

И. Я. Емельянов, В. В. Воскобойников, Б. А. Масленок

521.039.156

E 60

И. Я. Емельянов  
В. В. Воскобойников  
Б. А. Масленок

ОСНОВЫ  
КОНСТРУИРОВАНИЯ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ  
МЕХАНИЗМОВ  
УПРАВЛЕНИЯ  
ЯДЕРНЫХ  
РЕАКТОРОВ



|  
И. Я. Емельянов  
В. В. Воскобойников  
Б. А. Масленок  
|

ОСНОВЫ  
КОНСТРУИРОВАНИЯ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ  
МЕХАНИЗМОВ  
УПРАВЛЕНИЯ  
ЯДЕРНЫХ  
РЕАКТОРОВ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Под редакцией члена-корреспондента  
АН СССР И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВА



МОСКВА  
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ  
1987  
|

ББК 31.46  
Е60  
УДК 621.039.56

Рецензент П. И. Попов

Емельянов И. Я. и др.

Е60 Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов/И. Я. Емельянов, В. В. Воскобойников, Б. А. Масленок. Под ред. чл.-кор. АН СССР И. Я. Емельянова. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 232 с.: ил.

Обобщен и систематизирован отечественный и зарубежный опыт конструирования, отработки и эксплуатации механизмов управления. По сравнению с первым изданием (1978 г.) большее внимание уделено расчету, динамическим режимам, дискретным линейным электромагнитным приводам СУЗ.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся разработкой и эксплуатацией механизмов управления реакторов.

Е 2304000000-008  
051(01)-87 — 72-87

ББК 31.46

© Энергоатомиздат, 1987

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За сравнительно небольшой период, прошедший после выхода первого издания книги, в развитии ядерной энергетики произошли значительные изменения. Введены в действие крупные атомные электростанции с блоками единичной мощностью до 1500 МВт.

Получили дальнейшее развитие ядерные реакторы на быстрых нейтронах и высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем. АЭС стали играть важную роль в производстве электроэнергии. Прогресс в развитии реакторостроения потребовал дальнейшего совершенствования средств управления и реакторного оборудования, повышения их надежности и долговечности. Большое количество вводимых в эксплуатацию реакторных установок потребовало решения ряда проблем, связанных с охраной окружающей среды, повышением ядерной безопасности установок, подготовки значительного числа высококвалифицированных специалистов в области управления и регулирования ядерных реакторов. Указанные тенденции в развитии атомной техники, а также опыт авторов по созданию средств управления ядерными реакторами и их работа со студентами высших учебных заведений показали, что книга нуждается в доработке, связанной с более полным отражением современного уровня, достигнутого в области конструирования исполнительных механизмов СУЗ ядерных реакторов, являющихся важнейшими элементами системы управления, обеспечивающими ядерную безопасность.

Пересмотрена методика изложения материала книги. Учитывая, что успешная творческая работа должна базироваться на глубоком понимании основ данного вопроса, в книгу включена глава по физическим основам регулирования ядерных реакторов. В книге последовательно излагаются вопросы конструирования основных элементов исполнительных механизмов СУЗ, так как только на базе изучения составных элементов конструкции может быть получено точное количественное представление о конструкции в целом.

Для более полного понимания вопроса в книгу включена глава, содержащая примеры расчета электромеханического и электромагнитного исполнительных механизмов СУЗ с получением численных результатов рассчитываемых величин. Численные примеры ограничиваются только расчетами, специфическими для механизмов СУЗ.

Из книги исключены главы, в которых рассматриваются вопро-



сы надежности и экономичности исполнительных механизмов СУЗ, так как эти вопросы имеют самостоятельное значение, являются предметом отдельных исследований.

Из книги исключено описание конструкций исполнительных механизмов СУЗ, не получивших распространения в реакторостроении. Особое внимание уделено современным тенденциям по созданию исполнительных механизмов СУЗ, а именно линейным электромагнитным механизмам. Расчет и конструирование этих механизмов изложены достаточно подробно.

Новая глава, посвященная современным тенденциям в развитии и совершенствовании исполнительных механизмов СУЗ, поможет инженерам сосредоточить свои творческие возможности на решении новых проблемных задач в области создания более совершенных средств управления ядерными реакторами.

Книга написана в основном на базе обобщения отечественного опыта по разработке исполнительных механизмов СУЗ ядерных реакторов.

Главы 1 и 2 написаны И. Я. Емельяновым; гл. 3, 7 и 8 — совместно И. Я. Емельяновым и В. В. Воскобойниковым; гл. 4, 5, 9 и 10 — В. В. Воскобойниковым, гл. 6 — Б. А. Масленком.

*Авторы*

## Глава первая

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

### 1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Ядерный реактор* — это устройство, в котором происходит управляемая цепная реакция деления ядер, в процессе которой выделяются тепловая энергия и ионизирующее излучение.

Основные элементы реактора показаны на рис. 1.1. Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) 1 совместно с замедлителем нейтронов 5 образуют активную зону, которая размещена в отражателе 6, уменьшающем утечку нейтронов из активной зоны. В активную зону вводятся регулирующие органы (РО) 3 системы управления и аварийной защиты 4, выполненные из материалов, поглощающих нейтроны. В зоне отражателя размещаются детекторы 2 плотности потока нейтронов. Детекторы 2 могут устанавливаться и в активную зону. ТВЭЛы омываются циркулирующим теплоносителем. Реактор окружен биологической защитой 7, которая снижает ионизирующее излучение до уровня, безопасного для обслуживающего установку персонала.

Детекторы нейтронов представляют собой устройства, осуществляющие формирование электрического сигнала, пропорционального плотности потока нейтронов.

Регулирующие органы 3 и 4 системы управления и аварийной защиты представляют собой устройства, предназначенные для изменения уровня мощности реактора или быстрой его остановки (прекращения цепной реакции при аварийных ситуациях) перемещением их в активной зоне.

Тип ядерного реактора определяется его назначением, энергией нейтронов, при которой происходит большинство делений, видами топлива, замедлителя и теплоносителя. Подробная классификация ядерных реакторов приведена в [16].

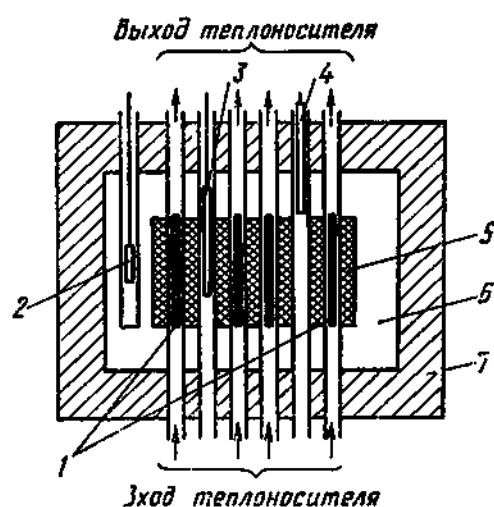


Рис. 1.1. Основные элементы реактора

## 1.2. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Работа ядерного реактора определяется самоподдерживающейся цепной реакцией деления ядер. К делящимся материалам, обеспечивающим цепную реакцию, относятся естественный нуклид  $^{235}\text{U}$  и искусственные нуклиды  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$ . Деление ядра урана вызывается захватом нейтрона. Составное ядро делится, освобождая 2—3 вторичных нейтрона на каждый акт деления. Некоторые продукты деления, как, например,  $^{135}\text{Xe}$ , обладают большим сечением захвата, другие в процессе радиоактивного распада испускают дополнительный нейтрон. Эти процессы являются определяющими при управлении ядерным реактором.

Отношение плотности нейтронов данного поколения к плотности нейтронов поколения, ему непосредственно предшествующего, называется *коэффициентом размножения* и определяется как

$$k = \nu_f \Sigma_f / \Sigma_a, \quad (1.1)$$

где  $\nu_f$  — среднее число нейтронов на одно деление;  $\Sigma_a$  — макроскопическое сечение захвата среды активной зоны;  $\Sigma_f$  — макроскопическое сечение деления. Из (1.1) следует, что для равновесного состояния  $k$  должно быть равно 1. При  $k > 1$  интенсивность цепной реакции растет. При  $k < 1$  процесс прекращается.

При создании реакторов и систем их обслуживания необходимо учитывать наличие в них больших запасов энергии, достаточных для полного разрушения реактора и выброса больших количеств радиоактивных продуктов. Кроме того, выделение этой энергии возможно за короткий промежуток времени. Для оценки состояния реактора введено понятие «реактивность», которая выражается как

$$\rho = (k_{\text{эф}} - 1) / k_{\text{эф}}, \quad (1.2)$$

где  $k_{\text{эф}}$  — эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Динамика реактора, т. е. изменение интенсивности процесса деления, а следовательно, и энерговыделения, определяется уравнениями кинетики. Уравнения, описывающие ядерный реактор без учета пространственных эффектов и зависимости от энергии нейтронов, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= n(t) k_{\text{эф}} (1 - \beta) / l + \sum_{i=1}^b \lambda_i C_i - n(t) / l; \\ \frac{dC_i(t)}{dt} &= n(t) \beta_i k_{\text{эф}} / l - \lambda_i C_i, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

где  $l = l_0 / k_{\text{эф}}$  — время генерации. С учетом (1.2) уравнения (1.3) примут вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= [n(\rho - \beta)] / l + \sum_{i=1}^b \lambda_i C_i; \\ \frac{dC_i}{dt} &= n \beta_i / l - \lambda_i C_i. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

В этих выражениях:  $n(t)$  — текущая плотность потока нейтронов;  $\beta$  — доля запаздывающих нейтронов;  $C_i$  — плотность предшественников запаздывающих нейтронов  $i$ -й группы;  $\lambda_i$  — постоянная распада  $i$ -й группы;  $l_0$  — время жизни нейтронов.

Из (1.4) следует, что при  $\rho=0$  реактор находится в критическом состоянии, которое характеризуется протеканием цепной реакции с постоянным уровнем генерации нейтронов, а следовательно, постоянством энерговыделения. При  $\rho>0$  интенсивность реакции увеличивается (положительная реактивность), а при сохранении этого неравенства мощность неограниченно возрастает. Реактор находится в надкритическом состоянии. При  $\rho<0$  интенсивность реакции уменьшается (отрицательная реактивность), и при сохранении этого неравенства цепная реакция прекращается. Реактор находится в подкритическом состоянии.

Как следует из (1.4), на скорость изменения мощности ядерного реактора оказывает влияние доля запаздывающих нейтронов в данной активной зоне, реактивность и режимы управления регулирующими органами. Для реакторов на тепловых нейтронах с топливом  $^{235}\text{U}$  суммарная доля запаздывающих нейтронов  $\beta$  составляет 0,0065.

Решением системы уравнений (1.4) является сумма экспонент

$$n(t) = \sum_{i=1}^I A_i \exp(\omega_i t). \quad (1.5)$$

Все корни этих экспонент определяются, за исключением одного, который имеет тот же знак, что и реактивность  $\rho$ .

Поэтому с ростом времени будет определяющей одна экспонента

$$n(t) = A_0 \exp(\omega_0 t),$$

где  $\omega_0$  — алгебраически наибольший корень.

При положительном значении реактивности плотность нейтронов (энерговыделения) экспоненциально возрастает при сохранении исходного значения реактивности.

Период реактора определяется как  $T=1/\omega_0$ . Период реактора является временем, необходимым для увеличения мощности в  $e$  раз (в 2,71 раза).

С достаточной степенью точности можно рассмотреть кинетику реактора с учетом одной группы запаздывающих нейтронов. Наиболее точным будет решение с использованием так называемой средневзвешенной группы, которая учитывает как время жизни ядер предшественников, так и их доли в общем потоке нейтронов.

Параметры этой группы будут

$$\beta = \sum_{i=1}^b \beta_i; \quad \lambda = \beta / \sum_{i=1}^b (\beta_i / \lambda_i),$$

где  $\beta_i$  и  $\lambda_i$  — доля и постоянная распада  $i$ -й группы ядер, предшественников запаздывающих нейтронов.

Решая уравнения с учетом одной эквивалентной группы запаздывающих нейтронов, а также анализируя влияние отдельных членов уравнения, получаем, что развитие будет происходить по экспоненте

$$n(t) = [n_0 \beta / (\beta - \rho)] \exp \lambda \beta t / (\beta - \rho).$$

Следовательно,  $T_{уст} = (\beta - \rho) / \lambda \rho$ .

Из этого выражения следует, насколько важно сопоставление между реактивностью  $\rho$  и общей долей запаздывающих нейтронов. Чем в большей степени приближается реактивность к значению  $\beta$  для данной активной зоны, тем интенсивнее будет приращение мощности. Когда  $\rho = \beta$  — реактор критический без запаздывающих нейтронов и это состояние характеризуется как мгновенная критичность. При  $\rho > \beta$  состояние реактора характеризуется как мгновенно надкритичное. При условии, когда  $\rho \geq \beta$ , процесс пойдет по закону

$$n(t) = n_1 \exp k_{изб} t / l,$$

где  $k_{изб}$  — свободная реактивность, не скомпенсированная регулирующими органами при данном состоянии реактора. Учитывая, что время жизни  $l$  для тепловых нейтронов лежит в диапазоне  $10^{-5} < l < 10^{-3}$  с, а для быстрых нейтронов порядка  $10^{-7}$  с, и если допустить, что  $\beta = +0,0065$  при среднем времени жизни, то за 1 с произойдет увеличение мощности

$$n(t)/n(0) = \exp(k_{изб}/l) = \exp(6,5 \cdot 10^{-3}/10^{-4}) = \exp 65,$$

т. е. произойдет разрушение всей системы.

**Состояние реактивности.** Для поддержания работы реактора в течение длительного времени на высоком уровне мощности (следовательно, и плотности нейтронного потока) необходимо иметь достаточно большое количество ядер деления и обеспечить некоторый запас реактивности. Этот запас используется для компенсации различных эффектов, связанных с физическими процессами в реакторе. Эти физические процессы приводят к изменению реактивности в основном в результате изменения изотопного состава топливной композиции, температуры топлива, теплоносителя и основного состояния теплоносителя, связанного с перегрузкой тепловыделяющих сборок (ТВС).

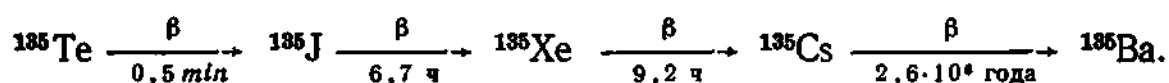
**Температурный коэффициент реактивности** характеризуется зависимостью реактивности от температуры компонентов активной зоны реактора. Изменение температуры происходит от быстро или медленно протекающих процессов. Быстрые процессы определяются эффектом Доплера, т. е. возрастанием резонансного поглощения нейтронов с ростом температуры. Медленные процессы определяются изменением температуры замедлителя и теплоносителя. При нагревании плотность воды уменьшается до 30 %, а следовательно, растет утечка нейтронов. Особенно большие изменения происходят при переходе жидкости в двухфазное состояние (образование пароводяной смеси), в котором изменение объема



пара в реакторе приводит к изменению поглощения нейтронов и реактивности. Эти изменения реактивности реактора при изменении температуры могут достигать примерно 10 %. Изменение паросодержания в активной зоне зависит от типа реактора. Как известно, кипящие реакторы могут быть водо-водяными, где теплоносителем и замедлителем является вода, и водо-графитовыми, в которых в качестве замедлителя используется графит, а теплоносителем является кипящая вода.

**Отравление продуктами деления.** Существенной причиной изменения реактивности является изменение изотопного состава горючего. С одной стороны, происходит уменьшение количества ядер деления, а с другой — образование новых ядер с большими сечениями захвата.

Так, образование  $^{135}\text{Xe}$  является одним из таких факторов, который оказывает значительное воздействие на реактивность.  $^{135}\text{Xe}$  образуется непосредственно при делении  $^{235}\text{U}$  в количестве 0,37 %, а также в результате распада ядер теллура:



По этой цепной реакции происходит примерно 6,1 % образований ядер.  $^{135}\text{Xe}$  обладает большим сечением захвата тепловых нейтронов ( $3,4 \cdot 10^6$ ). Выход  $^{135}\text{Xe}$  из системы происходит по двум путям: во-первых, вследствие радиоактивного распада и, во-вторых, вследствие захвата нейтрона и перехода в  $^{136}\text{Xe}$  с малым сечением захвата.

Образование ксенона можно рассматривать как еще один эффект обратной связи по реактивности, который может вызвать колебания мощности в объеме активной зоны.

В больших энергетических реакторах возможны временные и пространственные колебания плотности нейтронного потока. Большое отравление в одной части активной зоны приводит к неравномерности энерговыделения по объему зоны. Пространственные эффекты становятся особенно важными при учете переходных процессов в больших активных зонах.

**Регулирование реактивности.** Как следует из теории ядерных реакторов, состояние ядерного реактора, его устойчивая работа, продолжительность кампании определяются реактивностью. Ранее были рассмотрены процессы, приводящие к изменению реактивности во время работы. Происходящие при этом изменения состояния реактора можно рассматривать как результат воздействия обратных связей по реактивности. Эти изменения характеризуются значительными амплитудой и фазой.

Реактивность изменяется вследствие выгорания топливных композиций в процессе работы, а также вводимых в активную зону элементов, связанных с экспериментальными работами для получения дополнительных эффектов с использованием радиоактивного излучения. Для компенсации этих изменений реактивности за-

грузка ядер деления должна обеспечить соответствующий запас положительной избыточной реактивности, в ряде случаев составляющий десятки процентов, т. е.  $(20 \div 31)\beta$ .

Избыточная реактивность определяется как реактивность, которой обладает активная зона, когда в реакторе отсутствуют все виды отрицательной составляющей реактивности и все подвижные органы компенсации реактивности.

Эта избыточная реактивность должна компенсироваться регулирующими органами РО системы управления и защиты ядерного реактора.

Кроме того, в целях обеспечения ядерной безопасности должен быть предусмотрен запас отрицательной реактивности, который во всех случаях должен быть в состоянии прекратить цепную реакцию и надежно удерживать реактор в подкритическом состоянии.

Запас отрицательной реактивности (разность реактивностей в критическом состоянии и в положении минимальной реактивности — в подкритическом состоянии) определяет эффективность РО.

Важно также знать необходимую отрицательную реактивность, по которой определяют эффективность РО при необходимости остановки реактора во время аварийной ситуации.

При одnogрупповом приближении решение кинетического уравнения развития процесса деления будет

$$n(t) = n_0 \left[ \frac{\beta}{\beta - \rho} \exp \frac{\lambda \rho t}{\beta - \rho} \right].$$

Из (1.5) следует, что в начальный момент ( $t=0$ ) будет происходить снижение мощности, существенно зависящей от значения и скорости ввода отрицательной реактивности. Так, допуская, что реактивность введена скачком и пренебрегая первыми сотыми долями секунды, можно показать, что в начальный период мощность падает не мгновенно, но достаточно быстро — в десятые доли секунды.

Из изложенного следует, что на РО возлагаются следующие задачи:

компенсация положительной реактивности, в несколько раз превышающей безопасную долю положительной реактивности;

регулирование мощности во время нормальной эксплуатации в соответствии с возникающими физическими процессами, приводящими к изменению реактивности;

аварийная защита, обеспечивающая при любых ситуациях ввод в активную зону отрицательной реактивности, которая должна не только достаточно быстро вводиться (при некоторых возможных авариях, например при нарушении герметичности контура теплоносителя), но и удерживать реактор в подкритическом состоянии в течение неограниченно длительного времени;

выравнивание полей энерговыделения по всему объему активной зоны реактора.

### 1.3. СТРУКТУРА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Регулирование реактивности осуществляется с помощью систем управления и защиты (СУЗ). СУЗ предназначена для оперативного контроля за ходом цепной реакции деления в активной зоне ядерного реактора и управления этим процессом в следующих режимах: первоначальной загрузки и перегрузки топлива; пуска реактора из подкритического состояния; вывода на мощность, работы в энергетическом диапазоне (изменение или поддержание заданного уровня мощности); регламентной или аварийной остановки реактора; контроля и поддержания подкритического состояния. СУЗ должна исключить возможность неконтролируемого развития цепной реакции в активной зоне или распространения радиоактивности во всех эксплуатационных режимах и аварийных ситуациях. Воздействие на реактивность во всех перечисленных режимах осуществляется с помощью РО, перемещаемых в активной зоне с помощью исполнительных механизмов СУЗ.

Система управления и защиты состоит из устройств, преобразующих нейтронный поток, пропорциональный мощности реактора, в электрические сигналы электромеханического, электронного оборудования и исполнительных механизмов СУЗ. Техника регулирования ядерных реакторов подробно изложена в [10, 11].

Рассмотрим регулирование реактора на энергетическом уровне мощности, так как на этом уровне мощности реактор выделяет большое количество энергии и необходимо обеспечить безопасную эксплуатацию вблизи предельных значений технологических параметров.

**Структура автоматического регулирования (АР) мощности реактора.** Регулирование мощности энергетического реактора, как правило, осуществляется с помощью системы АР в диапазоне мощности от 1 до 100 %. Система АР начинает работать при плотности потока нейтронов в реакторе  $10^{10}$ — $10^{12}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с), в месте расположения внезонных детекторов — при  $10^7$ — $10^8$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с).

Рассмотрим в общем виде структуру АР реактора. В активной зоне реактора и вне ее устанавливаются нейтронные датчики, в качестве которых обычно используют различного типа ионизационные камеры (рис. 1.2). Ионизационные камеры преобразуют нейтронный поток в электрические сигналы, пропорциональные мощности реактора. Эти сигналы поступают в схему сравнения, где сравниваются с сигналом заданной мощности и вырабатывается сигнал ошибки между заданной и действительной мощностью реактора. Сигнал ошибки подается в усилительное устройство, где усиливается до значения, достаточного для приведения в действие исполнительного механизма СУЗ (ИМ СУЗ), включающего РО. Привод ИМ СУЗ снабжен датчиком положения РО, который обычно электрически связан с указателем положения, представляющим собой прибор стрелочного или цифрового типа

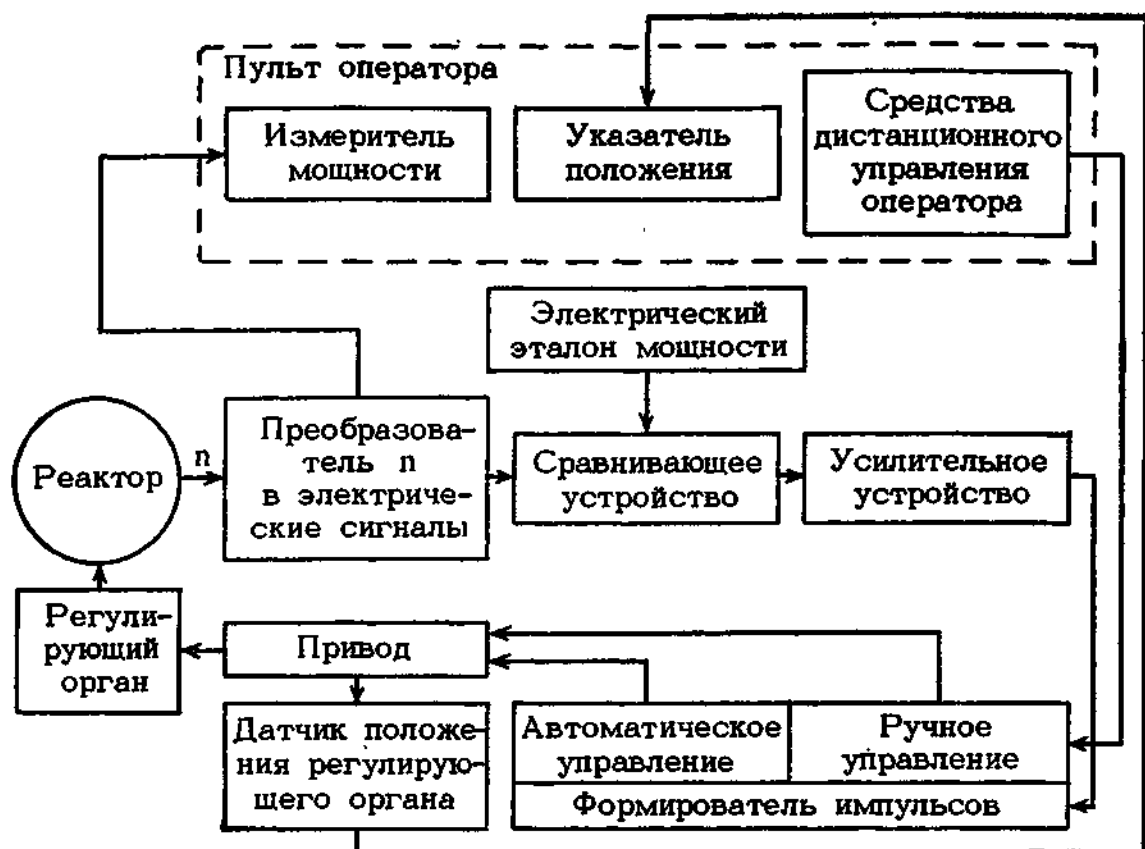


Рис. 1.2. Схема автоматического регулирования реактора

и расположенным на пульте оператора. Оператор может при необходимости отключить АР от системы регулирования и перейти на ручное управление.

Общим требованием, предъявляемым к системе АР, является ограничение эффективности регулирующего органа значением  $(0,7 \div 0,8) \beta_{\text{эф}}$  из-за опасности полного извлечения регулирующего органа АР при отказе схемы управления, которое сделало бы недопустимо коротким период разгона реактора.

Система АР мощности энергетических реакторов должна быть оснащена не менее чем двумя независимыми каналами с автоматическим резервированием друг друга. Автоматический переход с работающего АР на резервный осуществляется при достижении РО работающего АР заранее установленных положений. Чтобы обеспечить компенсацию реактивности любого знака, резервный РО должен находиться в среднем положении.

**Система аварийной защиты (АЗ) ядерного реактора.** В ядерном реакторе могут возникнуть условия, при которых происходит превышение установленного уровня мощности или скорости разгона, приводящее к перегреву оболочек твэлов, их разрушению и возможности радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Для ядерного реактора устанавливаются пределы допустимых значений основных параметров и условия безопасной эксплуатации. Для прекращения цепной реакции при возникновении в ре-



Рис. 1.3. Схема аварийной защиты реактора

акторе или во всей установке аварийных ситуаций предназначена система АЗ. Действие АЗ заключается в быстром введении в активную зону отрицательной реактивности. Срабатывание АЗ должно быть как автоматическое, так и ручное дистанционное.

Схема АЗ реактора показана на рис. 1.3. В этой схеме АЗ наряду с преобразователями нейтронного потока в электрические сигналы, усилителями и сравнивающими устройствами имеется также формирователь периода нарастания мощности. Аварийное выключение реактора по периоду бывает необходимо при работе в режимах пуска и разгона, если мощность реактора изменяется недопустимо быстро. В диапазоне рабочих мощностей используется АЗ по уровню мощности. Для обеспечения высокой надежности АЗ имеет не менее двух независимых групп РО.

Следует отметить, что внеплановая остановка крупной ядерной энергетической установки дает большие экономические потери, поэтому при разработке систем АЗ проводится дифференциация защитных действий в зависимости от вида аварийной ситуации. Так, при возникновении таких аварийных ситуаций, как снижение расхода теплоносителя, локальное повышение плотности нейтронного потока, достаточно только снизить уровень мощности.

**Структура активных зон крупных реакторов.** Современное реакторостроение, особенно создание АЭС, характеризуется, с одной стороны, повышением единичных мощностей реакторных блоков и, с другой стороны, увеличением энергонапряженности активных зон. Это требует создания развитой СУЗ и сложной структуры активных зон, в которых устанавливается большое количество РО нейтронных и других датчиков измерительных каналов.

На рис. 1.4 показана картограмма размещения групп поглощающих элементов СУЗ, нейтронных измерительных каналов в активной зоне и ионизационных камер СУЗ реактора ВВЭР-1000 В блока Нововоронежской АЭС [31]. Система управления и защиты В блока Нововоронежской АЭС включает 109 ИМ СУЗ, каж-





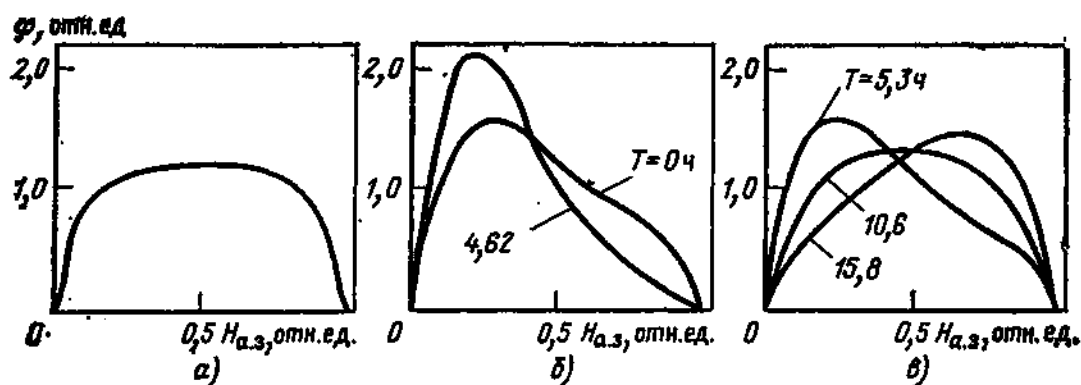


Рис. 1.5. Осовое распределение плотности потока нейтронов в реакторе ВВЭР-1000 в режиме изменения нагрузки:

*а* — мощность реактора 100 %, регулирующие органы извлечены из активной зоны; *б* — мощность реактора снижена до 50 %, регулирующие органы опущены на высоту активной зоны, равную  $0,4 H_{a.з}$ ; *в* — мощность реактора увеличена до 100 % после работы на уровне мощности 50 % в течение 5,3 ч

Особенностью реакторов большой мощности, в том числе и водо-водяных реакторов ВВЭР-1000, является возможность возникновения пространственных колебаний мощности в объеме активной зоны. Так, в реакторе ВВЭР-1000 наибольшие возмущения поля вследствие ксеноновых колебаний возникают в режиме работы с изменением уровня мощности, как это показано на рис. 1.5. Оперативная информация о распределении мощности в активной зоне позволяет производить выравнивание полей энерговыделения, что достигается извлечением или опусканием определенных групп поглощающих элементов. Для коррекции деформаций поля по высоте активной зоны предусмотрены группы РО с половинной высотой поглощающего вещества (рис. 1.6).

Еще более сложной является структура активной зоны канального уран-графитового кипящего реактора АЭС РБМК-1000. Картограмма расположения регулирующих органов СУЗ и детекторов потока нейтронов в реакторе РБМК-1000 показана на рис. 1.7.

Реактор РБМК-1000 обладает качественно новыми динамическими свойствами, обусловленными большими физическими размерами активной зоны и существенными изменениями коэффициентов реактивности в процессе эксплуатации реактора. Реакторы типа РБМК оснащены автоматической системой управления, обеспечивающей не только, как обычно, управление полной мощностью, но и поддержание заданной формы энергораспределения.

Управление полной мощностью и подавление наиболее быстро развивающихся деформаций энергораспределения по радиусу реактора осуществляются системой локальных автоматических регуляторов (ЛАР). Обладая высоким быстродействием, эта система обеспечивает перевод мощности с одного уровня на другой и снижает скорость развития отклонения формы энергораспределения от заданной до такого предела, когда коррекция искажений этой формы не представляет трудностей для оператора. Формирование и поддержание заданной формы энергораспределения во всем

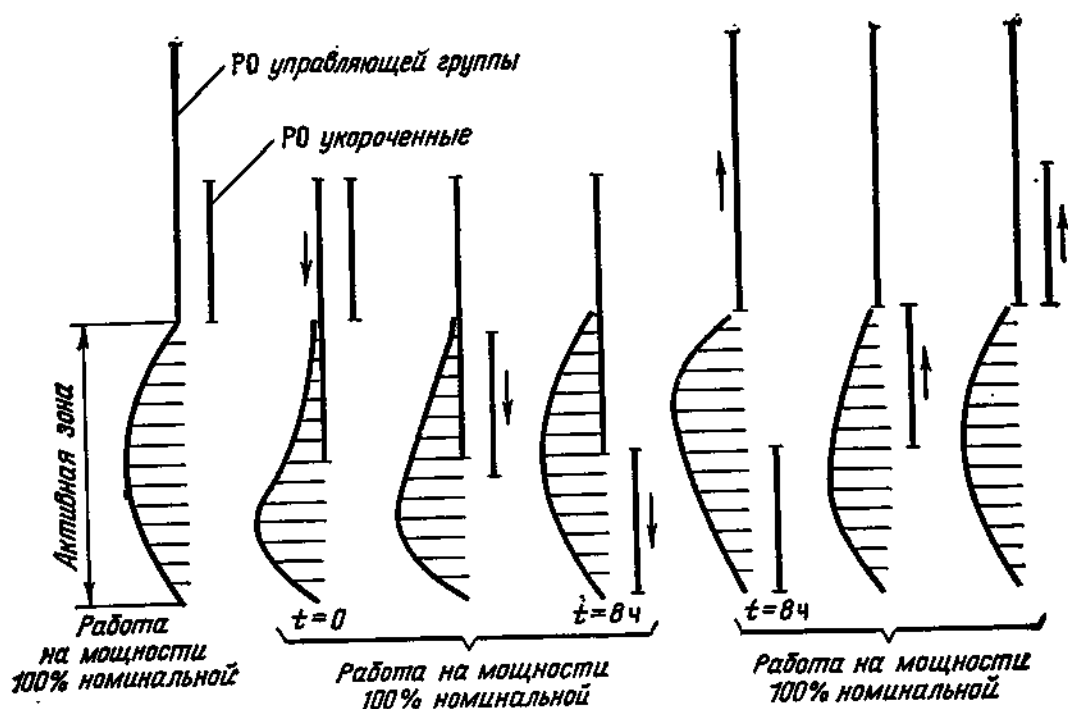


Рис. 1.6. Схема движения регулирующих органов для подавления пространственных ксеноновых колебаний по высоте активной зоны реактора ВВЭР-1000

объеме реактора ведутся оператором с использованием всех РО ручного регулирования (РР) и датчиков системы контроля энергораспределения (СКЭ).

Создание развитой системы автоматического регулирования реактора потребовало разработки системы локальной аварийной защиты (ЛАЗ). Такая аварийная защита предназначена для блокировки ЛАР и снижения мощности при превышении заданной локальной мощности в зоне ЛАР. Выравнивание энергораспределения по высоте активной зоны осуществляется перемещением в ней укороченных поглощающих элементов (УПЭ), вводимых в активную зону снизу.

В состав СУЗ реактора РБМК-1000 входят детекторы потока нейтронов [пусковые камеры деления (КД), внезонные ионизационные камеры (ИК) со специальными устройствами для размещения их в аппарате — подвесками камер и внутризонные камеры деления], поглощающие элементы, исполнительные механизмы для перемещения РО, аппаратура для синхронизации перемещения РО АР, комплекс электронной полупроводниковой аппаратуры для измерения и соответствующего преобразования информации от детекторов, логические схемы управления, выполненные на бесконтактных логических и релейно-контакторных элементах, обеспечивающих заданный алгоритм работы системы. Упрощенная структурная схема СУЗ реактора РБМК-1000 (без системы ЛАР и ЛАЗ) показана на рис. 1.8.

Исполнительные механизмы СУЗ предназначены для оперативного регулирования реактивности ядерного реактора, выравнива-

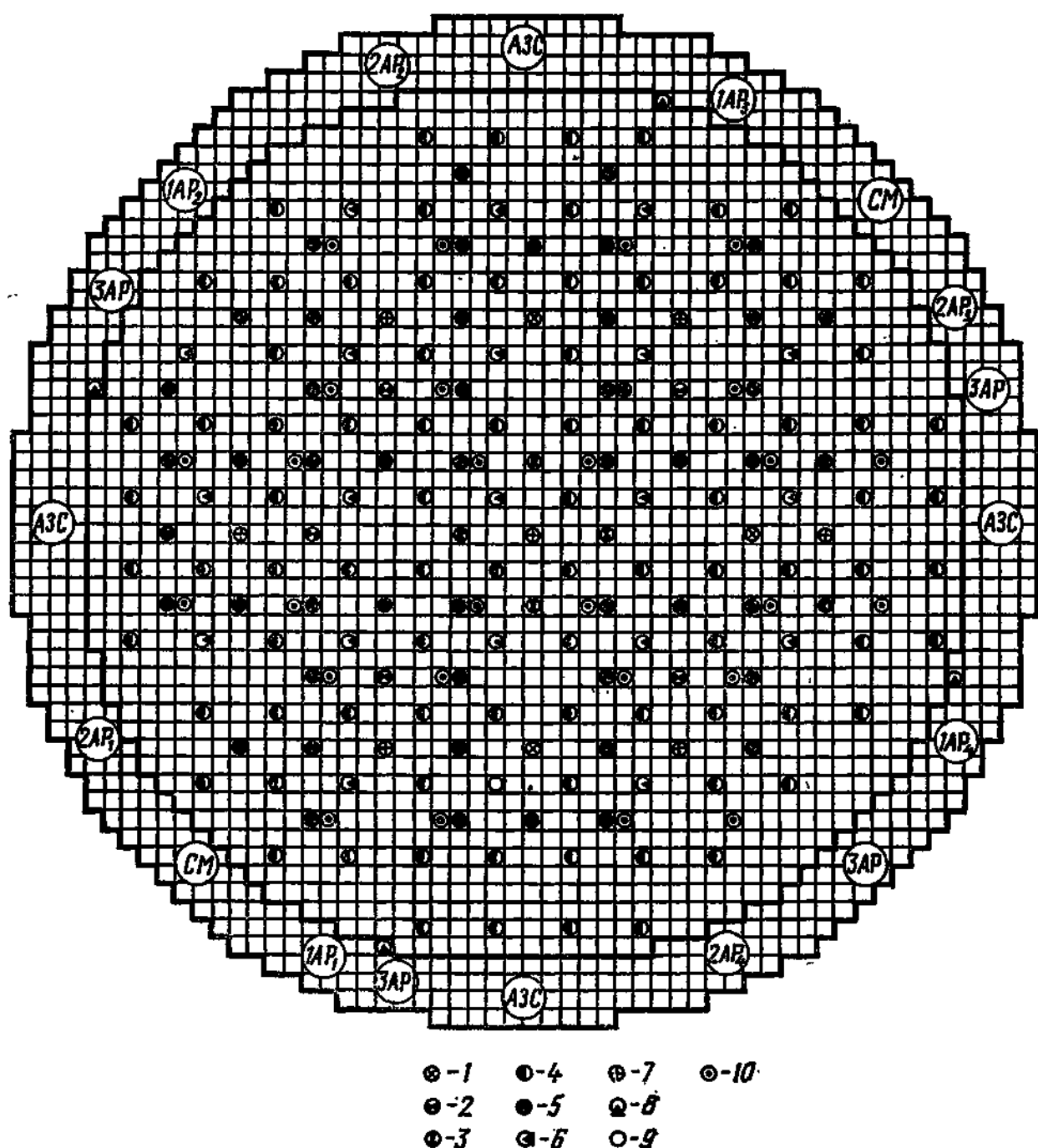
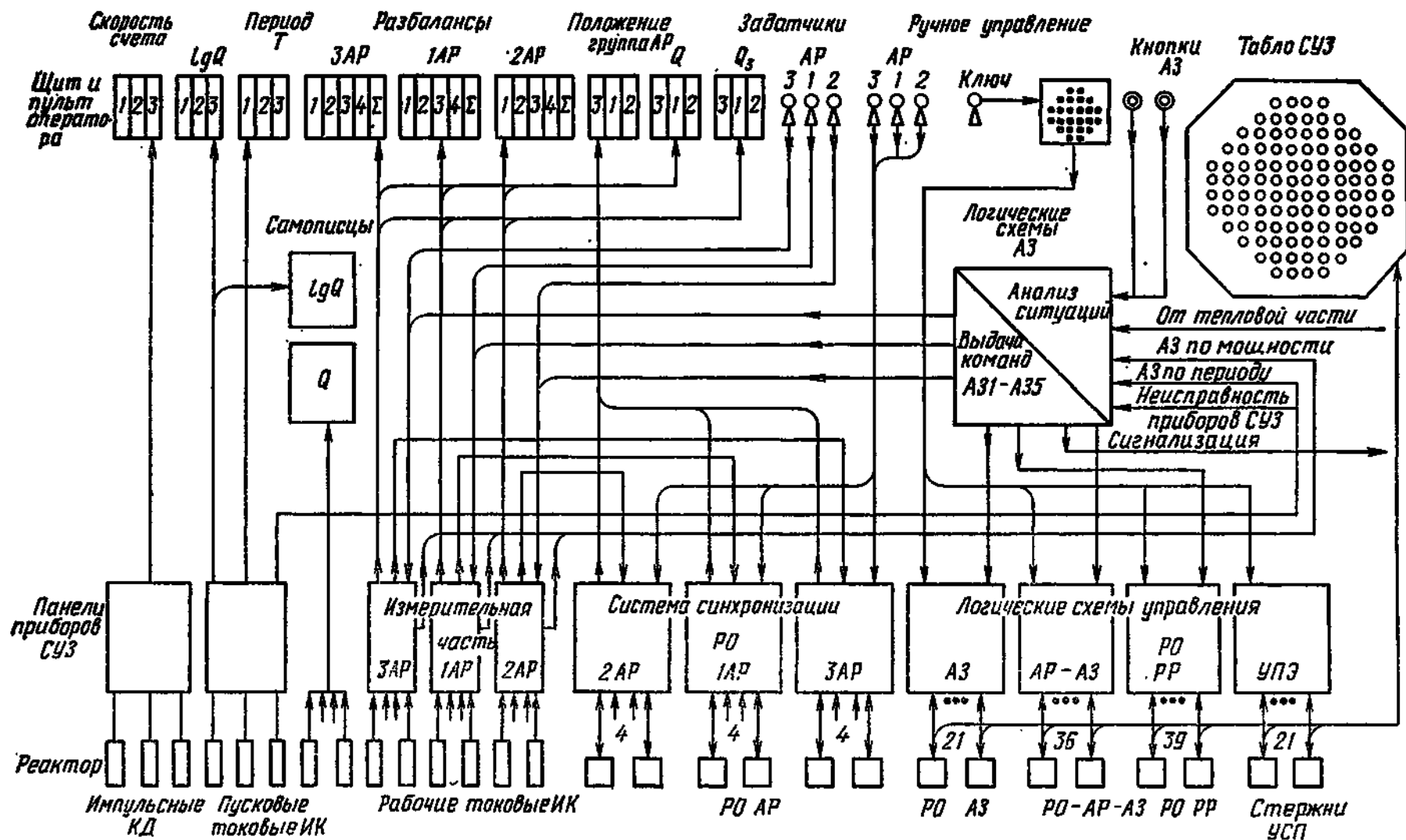


Рис. 1.7. Картограмма расположения регулирующих органов и детекторов СУЗ реактора РБМК-1000:

1 — регулирующие органы 1АР; 2 — регулирующие органы 2АР; 3 — регулирующие органы 3АР; 4 — регулирующие органы РР; 5 — регулирующие органы АЗ и регулирующие органы АЗ перекompенсации; 6 — УПЭ; 7 — регулирующие органы ЛАР; 8 — внезонные камеры деления; 9 — внезонные ИК; 10 — внутризонные датчики, выполненные на основе триаксиального кабеля; CM — камеры самописца мощности

ния энерговыделения по всему объему активной зоны, а также для обеспечения аварийной защиты реактора. Для эффективного решения этих задач ИМ СУЗ должны удовлетворять ряду требований, которые будут изложены в следующей главе.





## Глава вторая

# ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМАМ СУЗ

## 2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Исполнительные механизмы ядерных реакторов должны удовлетворять специфическим требованиям эксплуатации, а также конструктивно-технологическим и экономическим требованиям.

К эксплуатационным требованиям относятся: качество выполнения основных функций в системе управления и аварийной защиты реактора, обеспечение ядерной безопасности реактора, надежность, простота обслуживания, ремонтпригодность, габаритные размеры и масса.

К конструктивно-технологическим: защита от внешних факторов, конструктивная преемственность и технологичность.

К экономическим: затраты времени, труда, материальных и денежных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию механизмов.

Указанные требования взаимосвязаны между собой. Часто выполнение одних приводит к менее полному выполнению других. Поэтому создание оптимальной конструкции ИМ, наиболее полно отвечающей всем перечисленным требованиям, является сложной задачей, решаемой конструктором при разработке механизма.

## 2.2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

**Качество выполнения основных функций системы СУЗ.** В процессе эксплуатации ИМ должны надежно обеспечивать: требуемую скорость перемещения РО или диапазона скоростей; управление положением РО; контроль за положением РО и аварийное срабатывание РО.

Рассмотрим подробнее эти функции ИМ.

*Скорость перемещения регулирующего органа.* ИМ должен перемещать орган в направлении увеличения или уменьшения реактивности приблизительно со скоростью  $10^{-4} \delta k/s$  в той части активной зоны реактора, где РО наиболее эффективен. Скорость перемещения  $v$ , мм/с,

$$v = (L/Fk) \cdot 10^{-4},$$

где  $L$  — длина активной зоны, мм;  $k$  — полная эффективность РО в  $\delta k$ ;  $F$  — коэффициент, отражающий эффективность в рабочей точке по сравнению со средней эффективностью. Если есть кривая зависимости эффективности РО от его положения, то коэффициент  $F$  можно определить точно.

Рассмотрим конкретный пример. В реакторе компенсирующая способность каждого РО составляет  $0,02 \delta k$ . Ход РО 3600 мм,

$F=4$ , тогда

$$v = \frac{3600}{4} \cdot \frac{1}{0,02} \cdot 10^{-4} = 4,5 \text{ мм/с.}$$

В ряде случаев, например для автоматических регуляторов, необходимо иметь возможность изменять скорость РО. При этом нужно учитывать время переходного процесса, в течение которого изменяется скорость. Это время определяет качество регулирования реактора. Кратность регулирования скорости обычно не должна быть ниже 4:1. Перемещение РО может производиться как непрерывно, так и дискретно, т. е. шагами. Шаг, отрабатываемый ИМ, определяется вводимой при этом реактивностью.

*Управление положением регулирующего органа.* ИМ СУЗ должен перемещать регулирующий орган в требуемое положение с необходимой точностью. Для этого в конструкции механизма управления необходимо предусматривать устройства для остановки РО после отключения питания двигателя и предотвращения недопустимого выбега. Время срабатывания таких устройств колеблется от 0,2 с до нескольких миллисекунд в зависимости от требований, предъявляемых к системе регулирования реактора. Остановка РО обычно должна производиться с точностью  $2 \cdot 10^{-5} \delta k$ . В этом случае погрешность положения РО, мм,

$$\Delta = (2L/(Fk)) \cdot 10^{-5}.$$

При дискретном перемещении шаг РО не должен превышать погрешность  $\Delta$ . ИМ обычно воспринимает различные усилия, действующие на РО в реакторной установке (воздействия потока теплоносителя, вибрации и т. п.). Возникающие под действием этих усилий перемещения не должны превышать долей  $\Delta$ .

*Контроль положения регулирующего органа.* Для управления реактором необходимо знать положение РО в активной зоне. Поэтому в конструкции ИМ должны быть предусмотрены устройства (датчики), контролирующие положение РО на всей длине его хода. В качестве этих устройств могут использоваться датчики положения непрерывного или дискретного действия. В первом случае датчик положения выдает непрерывный сигнал о положении РО. Во втором — сигнал выдается через определенные отрезки хода. Дискретные отрезки хода, через которые подается сигнал датчиком положения, определяются допустимой реактивностью, вводимой РО. Сигнал от датчика положения поступает на указатель положения, расположенный на пульте управления реактором. Точность такой системы индикации должна быть выше допустимой погрешности при остановке РО.

Положение РО может указываться в единицах длины его перемещения в процентах перемещения или в единицах реактивности (рис. 2.1). Желательно, чтобы дискретный датчик положения выдавал сигналы через отрезки хода, кратные десяти.

Сигналы от датчика положения могут подаваться в ЭВМ, управляющую реактором; при этом надо стремиться, чтобы сигналы

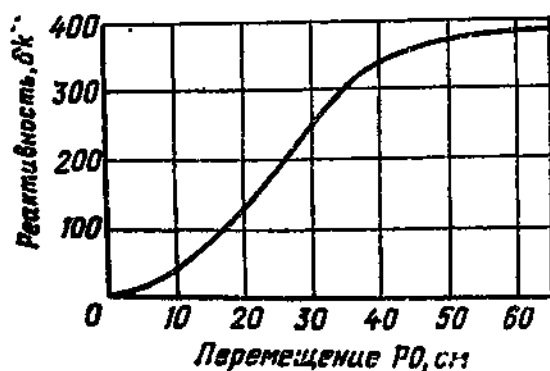


Рис. 2.1.

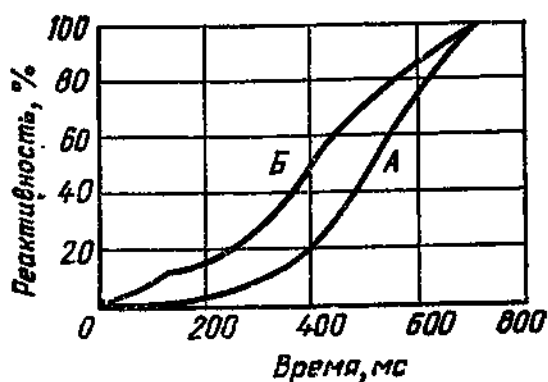


Рис. 2.2.

Рис. 2.1. Зависимость эффективности регулирующего органа от глубины погружения в активную зону

Рис. 2.2. Зависимость эффективности регулирующего органа от времени движения:

А — падение под действием силы тяжести; Б — падение с заданной начальной скоростью

датчик выдавал в двоичном коде. После исчезновения электропитания индикация положения РО может нарушаться. Однако важно, чтобы после восстановления питания можно было точно определить положение РО. Для индикации крайних положений РО должны быть предусмотрены конечные выключатели, подающие сигналы на пульт оператора или в управляющую ЭВМ.

**Аварийное срабатывание регулирующего органа.** Независимый (автономный) источник потенциальной энергии (сила тяжести, упругая сила и т. п.) должен действовать на РО при быстром вводе его в реактор в сторону уменьшения реактивности. Обычно при работе реактора аварийные РО находятся во взведенном состоянии, из которого они могут быстро вводиться в активную зону. Применение аварийных РО сочетается с другими средствами управления (компенсирующие РО, добавление бора в теплоноситель и др.). Аварийные РО взводятся или приводятся в состояние готовности перед тем, как начнется разгон реактора.

При разработке механизмов аварийной защиты необходимо учитывать, что эффективность РО в зависимости от погружения в активную зону представляет собой функцию  $\int \sin^2 x dx$ , т. е. изменяется нелинейно (см. рис. 2.1). С самого начала падения полностью выведенного из активной зоны РО его эффективность изменяется незначительно, поэтому можно не извлекать полностью РО и держать их в той точке активной зоны, падение с которой будет вызывать значительные линейные изменения реактивности. Существует и другой путь — сообщать полностью выведенному из активной зоны РО ускоряющий импульс, что также вызовет более резкое изменение реактивности (рис. 2.2).

При аварийном сбросе РО должен быть остановлен в положении его наибольшей эффективности.

**Обеспечение ядерной безопасности.** Ядерная безопасность реакторной установки обеспечивается устойчивостью работы реак-

тора вследствие отрицательного температурного коэффициента реактивности и надежностью системы управления и аварийной защиты. В СУЗ особо жесткие требования предъявляются к надежности функционирования ИМ, являющихся важнейшим звеном обеспечения ядерной безопасности. Отказ в срабатывании при аварийных ситуациях ИМ может привести к значительному увеличению температуры твэлов и других элементов реактора, что может вызвать разрушения и другие аварии.

Некоторые требования к системам СУЗ по обеспечению ядерной безопасности приведены в [10]. Рассмотрим только требования по обеспечению ядерной безопасности, предъявляемые к ИМ.

*Надежное обеспечение перемещения регулирующих органов в направлении уменьшения реактивности* должно обеспечиваться во всех случаях эксплуатации, даже при искривлении РО или канала, в котором он перемещается, и исчезновении электропитания. В последнем случае должны быть предусмотрены независимые аккумуляторы энергии достаточной мощности. Следует стремиться к тому, чтобы направление движения в сторону уменьшения реактивности совпадало с направлением действия силы тяжести.

В ИМ корабельных ядерных энергетических установок должны быть предусмотрены устройства, позволяющие производить перемещение РО в направлении уменьшения реактивности в условиях кренов и дифферентов судна и в других случаях его эксплуатации.

В конструкции ИМ при необходимости должны быть предусмотрены устройства, позволяющие развивать дополнительные усилия для ввода РО в активную зону реактора в случаях увеличения трения или выхода из строя электродвигателей или других источников перемещения.

*Ограничение скорости ввода реактивности.* Скорость перемещения РО при вводе реактивности должна быть во всех случаях ограничена определенным пределом. Скорости электродвигателей и особенно гидро- и пневмодвигателей ИМ при любых неисправностях не должны превышать установленного предела ввода положительной реактивности.

*Исключение возможности выброса регулирующих органов из активной зоны реактора.* Выброс РО из активной зоны на работающем или остановленном реакторе может произойти под действием потока теплоносителя (например, при разгерметизации первого контура из-за разрыва герметичного корпуса ИМ), при воздействии сейсмических динамических нагрузок. В корабельных реакторах выброс РО может произойти вследствие качки судна или переворачивания его вверх килем.

В ИМ должны быть предусмотрены устройства, исключающие возможность такого выброса при любых нагрузках и неисправностях в механизме. Выброс РО из активной зоны может привести к резкому увеличению реактивности, разрушению реакторной установки и выбросу радиоактивных продуктов деления.

ИМ должны воспринимать в процессе эксплуатации вибраци-

онные, ударные и другие динамические нагрузки, при этом колебания РО не должны превышать установленного значения.

*Обеспечение быстрогодействия.* При возникновении аварийных ситуаций РО должны перемещаться в направлении уменьшения реактивности с необходимой максимальной скоростью. При этом время освобождения РО не должно превышать заданных значений. В ряде случаев может быть задано время прохождения РО начального участка всего хода.

Требования быстрогодействия распространяются и на нормальную работу механизмов. Скорость перемещения РО должна быть такова, чтобы можно было оперативно справляться со всеми возможными нестабильностями при работе реакторной установки на мощности и при ее пуске.

*Надежное освобождение регулирующего органа.* По аварийному сигналу РО должен освобождаться от ИМ за минимально короткое время для перемещения его в активную зону реактора. Устройства, удерживающие РО, должны отвечать требованиям высокой надежности срабатывания и быстрогодействия. Должны быть приняты меры, обеспечивающие срабатывание таких устройств даже в случаях их засорения продуктами коррозии, образования на трущихся парах накипи и в других возможных во время эксплуатации случаях.

*Предотвращение разгерметизации первого контура реактора.* В реакторах, работающих под давлением, РО и связанные с ними подвижные элементы перемещаются в среде теплоносителя или в сухих каналах, проходящих через активную зону реактора. В первом случае механизм герметизируется с помощью прочного корпуса привода и фланцевого соединения. Во втором случае герметизация осуществляется сухим каналом. В обоих случаях нарушение герметичности канала или корпуса привода может повлечь за собой серьезную аварию реакторной установки, выброс регулирующего органа и активного теплоносителя. Поэтому надежности герметизации ИМ следует уделять особое внимание.

В ИМ, в которых РО перемещается в сухих каналах, часто приходится вводить дополнительную герметизацию корпуса привода на случай нарушения герметичности канала. Герметичные электродвигатели, у которых ротор отделен от статора тонкостенной гильзой, опирающейся на корпус статора, следует заключать в прочный корпус во избежание выхода теплоносителя при разрыве гильзы. Конструкция механизмов, работающих под давлением, а также герметизирующие каналы и чехлы должны отвечать правилам устройства и безопасной эксплуатации оборудования АЭС [21] и рассчитываться в соответствии с нормами расчета на прочность [20].

*Обеспечение охлаждения регулирующих органов.* При захвате нейтронов РО СУЗ могут нагреваться до высокой температуры. В оболочках, куда заключены поглощающие нейтроны материалы, могут выделяться газы, поэтому должны быть приняты меры, обеспечивающие непрерывное и эффективное охлаждение РО



для обеспечения целостности оболочек и предохранения РО от коробления, заедания или разрушения. На реакторах, где существует самостоятельная система охлаждения РО СУЗ, необходимо устанавливать специальную измерительную аппаратуру для контроля за параметрами охлаждающей среды и наличием активности в контуре.

*Обеспечение надежного сцепления и расцепления ИМ с РО на всей протяженности перемещения.* Это необходимо для извлечения РО в случае его заклинивания или поломки, а также для осуществления перегрузочных операций. При перегрузке топлива все РО должны находиться в активной зоне, так как к концу перегрузки реактор будет иметь большую избыточную реактивность. Если ИМ в корпусных реакторах находятся на крышке реактора, то они должны расцепляться с РО и на время перегрузки удаляться вместе с крышкой. Необходимо предусмотреть индикацию сцепления и расцепления механизма управления с РО.

**Надежность.** В комплексе средств автоматизации ядерных установок ИМ занимают важное место, обеспечивая поддержание необходимых режимов работы установки и ее ядерную безопасность. Они должны обладать высокой надежностью, т. е. обеспечивать безотказную работу в течение заданного срока эксплуатации. Неправильное функционирование или отказы ИМ могут привести к остановке крупных АЭС, создав перебои в работе энергосистем. Обеспечить идеальную надежность ИМ невозможно, однако уровень надежности может быть значительно повышен. Следует отметить, что в настоящее время уровень надежности ИМ еще недостаточно высок. Так, на АЭС США около 5 % всех неисправностей падает на ИМ, свыше 14 % простоев вызвано неисправностями систем и ИМ [8].

Надежность в значительной мере определяется техническим и организационным уровнем предприятий, на которых изготавливаются механизмы. Повышение надежности связано с дополнительными затратами материальных и денежных средств.

Однако эти затраты окупаются повышением ресурса работы ИМ СУЗ на ядерных энергетических установках без замены механизмов и ремонта их элементов.

Важное условие, определяющее уровень надежности, — возможность ремонта и замены ИМ на работающем реакторе. На уран-графитовых реакторах АЭС канального типа (Ленинградская АЭС) с большим числом ИМ выход из строя одного или нескольких механизмов не приводит к остановке АЭС. Кроме того, имеется возможность замены неисправных механизмов на работающем реакторе.

На реакторах с водой под давлением типа ВВЭР замена ИМ сопряжена с остановкой реактора, разгерметизацией первого контура и простоями АЭС.

Максимально возможный уровень надежности ИМ должен задаваться для реакторов, эксплуатируемых на кораблях и космических установках, где их замена во время эксплуатации практи-

чески невозможна или связана с опасностью для обслуживающего персонала.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к ИМ, является обеспечение надежности срабатывания механизма при поступлении аварийного сигнала при любых условиях эксплуатации, в том числе при воздействии сейсмических и других динамических нагрузок.

Уровень надежности ИМ может быть повышен следующими путями: упрощением кинематической схемы; сокращением числа конструктивных узлов, расположенных в первом контуре реактора (особенно трущихся пар и передач); применением материалов с улучшенными характеристиками; унификацией конструкций; улучшением технологии изготовления и повышением организационно-технического уровня на предприятии-изготовителе.

Практическую реализацию этих направлений повышения уровня надежности можно проследить на примере ИМ, разработанных американскими фирмами Westinghouse (электромагнитный) и General Electric (гидравлический). В этих ИМ значительно упрощены кинематические схемы и сокращено до минимума число деталей, находящихся в среде теплоносителя реактора. В ИМ фирмы Westinghouse использованы обмоточные провода, рассчитанные на высокую температуру, что позволило отказаться от принудительного охлаждения механизма. В дальнейшем фирмы унифицировали конструкции и отработали технологию изготовления. Это позволило использовать механизмы на большинстве АЭС с кипящими реакторами и реакторами с водой под давлением. Анализ, проведенный в США для группы реакторов, показывает, что на 75 % исследуемых реакторов, оснащенных ИМ фирм Westinghouse и General Electric, количество неисправностей было соответственно в 4,6 и 3,2 раза меньше, чем на 25 % остальных исследуемых реакторов, оснащенных механизмами, разработанными другими фирмами [8].

При оценке уровня надежности ИМ необходимо учитывать также надежность систем управления. Например, конструкция гидравлического привода в ряде случаев может оказаться более простой и надежной по сравнению с электромеханическим приводом. Однако система управления гидроприводом включает в себя многочисленные элементы: клапаны, дроссели, трубопроводы и т. п., которые снижают надежность системы.

Таким образом, уровень надежности механизмов должен определяться в каждом отдельном случае с учетом типа ядерного реактора, его назначения и перечисленных выше факторов [6].

### 3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом находятся в эксплуатации ядерные реакторы различного типа и назначения. Для них созданы многочисленные конструкции ИМ, которые отличаются большим разнообразием принципиальных схем и используемых источников энергии.

ИМ разрабатываются применительно к конкретным реакторным установкам и являются их составными элементами. Конструкции ядерных реакторов и ИМ тесно взаимосвязаны: конструкция ядерного реактора оказывает существенное влияние на конструктивное выполнение ИМ. В свою очередь принятая конструкция ИМ приводит к определенному конструктивному выполнению отдельных элементов реактора и его активной зоны. Поэтому конструкции ИМ целесообразно рассматривать совместно с реакторной установкой, для которой он спроектирован, с учетом специфических условий ее работы и особенностей системы управления, которая также оказывает большое влияние на выбор принципиальной конструктивной схемы механизма. С учетом этого ниже будут рассмотрены конструкции ИМ применительно к конкретным реакторам (энергетическим, исследовательским, судовым). Указанные реакторы имеют существенные отличия как по условиям эксплуатации и конструкции, так и в построении систем управления и аварийной защиты, что в свою очередь вызывает различный подход к выбору конструкций ИМ [19].

На примерах рассмотренных в этой главе ИМ можно проследить, какое влияние оказывают на их конструкцию условия эксплуатации и как выполняются основные требования, приведенные в гл. 2.

### 3.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СУЗ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Рост мощностей АЭС связан с увеличением размеров активных зон ядерных реакторов, что потребовало наряду с регулированием средней мощности реактора также и регулирования отдельных областей активной зоны. Поддержание требуемого энерговыделения отдельных групп ТВС в реакторах крупных АЭС осуществляется ручными или локальными автоматическими регуляторами, выполняющими также функции локальной аварийной защиты. Кроме того, они регулируют определенную область активной зоны на основе сигналов, поступающих от датчиков энерговыделения, установленных в этой области.

Исполнительный механизм СУЗ реактора РБМК Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина. Общий вид реактора РБМК показан на рис. 3.1. Реактор, размещенный в бетонной шахте, представля-

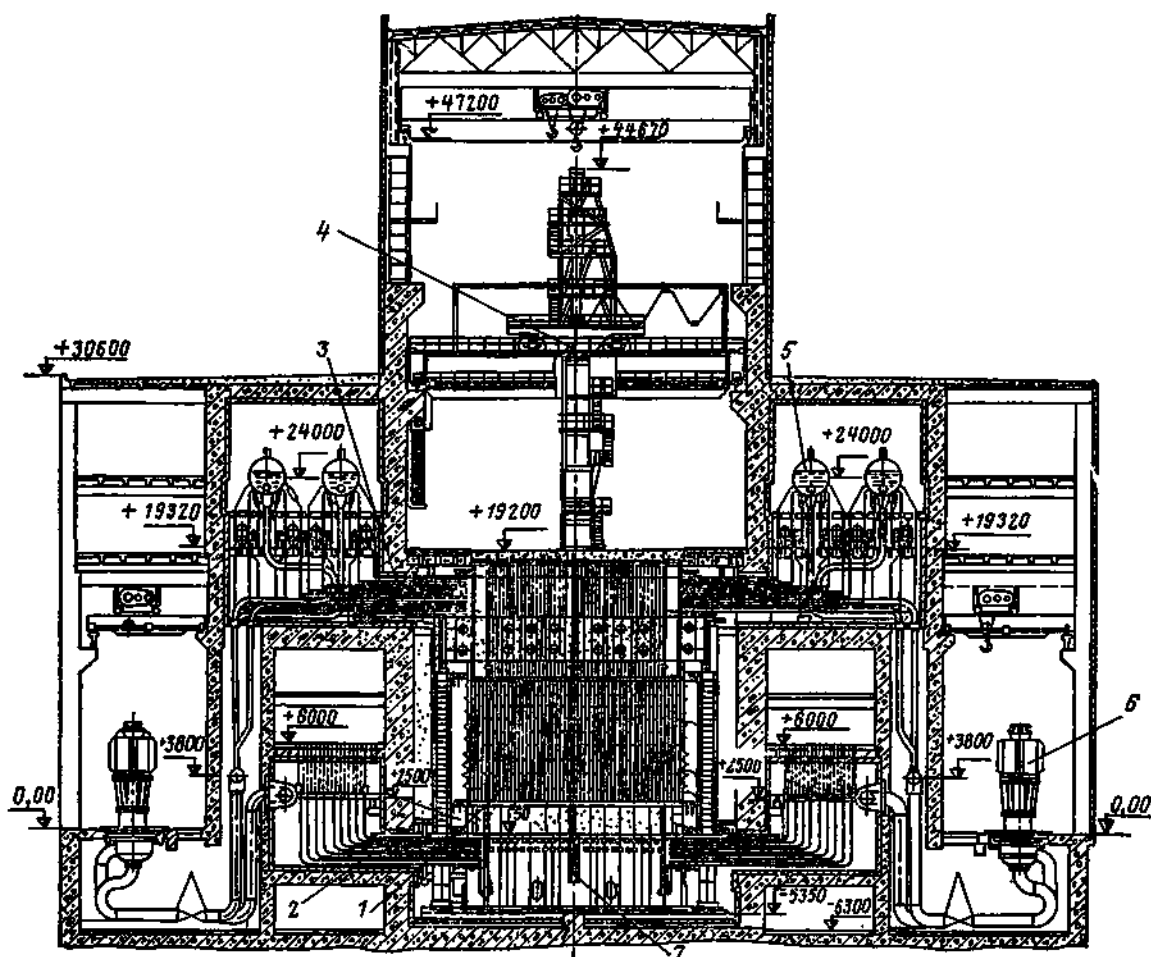


Рис. 3.1. Разрез реактора РБМК:

1 — активная зона; 2 — коммуникация трубопроводов; 3 — пароводяные коммуникации; 4 — разгрузочно-загрузочная машина; 5 — барабан-сепаратор; 6 — главный циркуляционный насос; 7 — канал ИМ

ет собой цилиндрическую кладку, состоящую из вертикальных графитовых колонн, в центральных отверстиях которых расположены технологические и специальные каналы, а также каналы СУЗ. Схема расположения каналов приведена на рис. 1.7. Графитовая кладка находится в герметичной полости. Для предотвращения окисления графита и улучшения его охлаждения герметичная полость заполнена смесью азота и гелия.

Система управления и защиты реактора должна обеспечивать устойчивое автоматическое поддержание мощности на заданном уровне, выравнивать нейтронный поток по радиусу и высоте активной зоны реактора и компенсировать выгорание топлива.

Условия эксплуатации ИМ следующие. Исполнительные механизмы устанавливаются в каналах СУЗ, по которым циркулирует (сверху вниз) вода с температурой 40—70 °С. Температура воздуха над каналом СУЗ составляет 60 °С (при аварийных ситуациях температура воздуха может достигать 250 °С в течение 1 ч), относительная влажность окружающего воздуха 98 %. Габаритные размеры над верхней головкой канала СУЗ ограничены по-



перечными размерами  $250 \times 250$  и высотой 375 мм. Биологическая защита реактора обеспечивает допустимую санитарными нормами радиационную обстановку над верхними головками каналов СУЗ.

На реакторе РБМК используются следующие разновидности поглощающих элементов (пэлов): автоматического регулирования (АР) мощности; компенсации реактивности (ручного регулирования) и аварийной защиты (РР-АЗ); выравнивания энерговыделения по высоте активной зоны (УЭП), в которых используются укороченные пэлы.

Наибольший интерес представляет ИМ компенсации реактивности (РР) и аварийной защиты (РР-АЗ). Установка этого ИМ на реакторе показана на рис. 3.2. Механизм включает в себя привод 2, установленный в биологической защите под плитным настилом 11 центрального зала реактора. Привод с помощью уплотнительных прокладок устанавливается на головке 4 канала СУЗ. В нижней части привода смонтирован хвостовик, через который поступает вода для охлаждения канала СУЗ. На барабан привода наматывается трос 6, связанный с тягой 7, которая в свою очередь соединена с пэлом 9. Пэл состоит из ряда полых трубчатых звеньев, содержащих поглотитель нейтронов — карбид бора, очехлованный трубами из алюминиевого сплава. Для большей подвижности отдельные звенья пэлов соединены шарнирно.

К пэлу прикреплен вытеснитель 10, служащий для вытеснения воды из той части активной зоны реактора, в которой не находится пэл. Использование вытеснителей дает возможность уменьшить потери нейтронов в активной зоне реактора 8. Подвод электропитания к механизму осуществляется через герметичный ввод 1.

Биологическая защита в канале СУЗ осуществляется охлаждающей водой, металлом хвостовика привода, специальной защитной пробкой 3, имеющей ступенчатую форму, и защитным слоем 5, расположенным над активной зоной.

Исполнительный механизм РР-АЗ имеет следующие основные характеристики: рабочий ход пэла и вытеснителя  $6250 \pm 25$  мм, рабочая скорость 0,4 м/с, максимально допустимое усилие на тросе (грузоподъемность) 650 Н; удерживающее усилие электромагнитной муфты привода, приведенное к тросу, не менее 750 Н; максимально допустимая температура внутри привода при работе его в номинальном режиме  $85^\circ\text{C}$ .

Привод ИМ РР-АЗ показан на рис. 3.3. Конструктивно он состоит из корпуса 1, выполненного из алюминиевого сплава, в котором смонтированы все элементы, показанные на кинематической схеме (рис. 3.4). На валу 2, укрепленном на шарикоподшипниках, смонтирован барабан 15, на который наматывается трос 14. Вал получает вращение от электродвигателя 8 через редуктор 12, с которым связаны также сельсин 3 и кулачки, воздействующие на концевые выключатели 9. Герметизация вала 2 от охлаждающей воды производится с помощью манжетных уплотнений 13 и 16. Полость между манжетными уплотнениями заполняется маслом под давлением, создаваемым в резервуаре 7, кото-

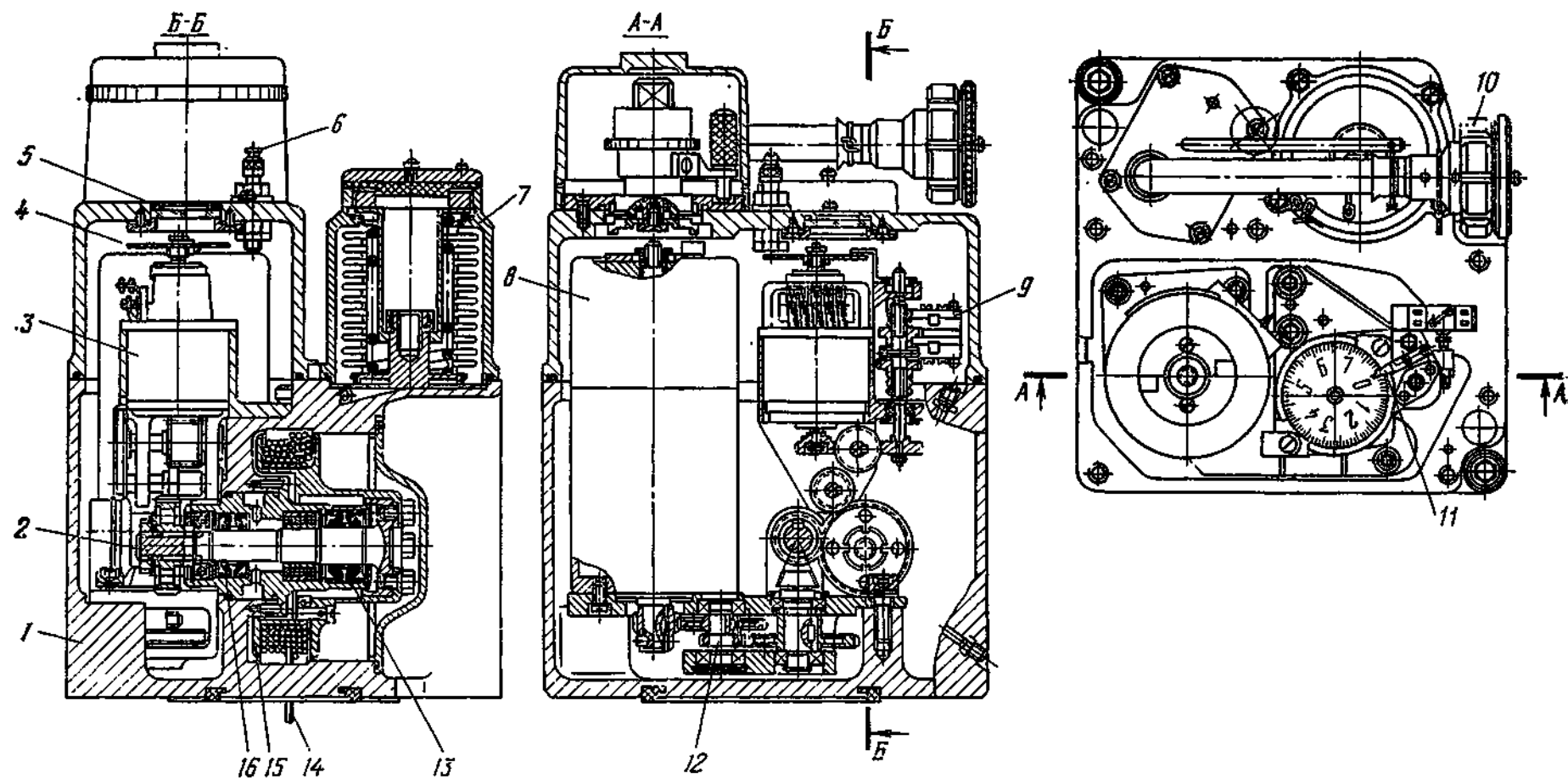


Рис. 3.3. Конструкция привода СУЗ РР-А3 реактора РБМК

рый состоит из корпуса с упругим элементом-сильфоном и пружиной, создающей давление во внутренней полости резервуара при заполнении его жидкостью. В резервуаре имеется отверстие для заливки рабочей жидкости, закрываемое пробкой. При заполнении резервуара рабочей жидкостью специальным приспособлением создается предварительное сжатие сильфона. Масло в межманжетную полость из резервуара подается по каналу в корпусе. В корпусе имеется также дренажный канал, соединенный с межманжетной полостью.

На валу сельсина 3 укреплен циферблат 4, а в корпусе установлена стрелка 11. Циферблат со стрелкой образуют встроенный указатель положения, по которому можно установить положение пэла в случае исчезновения электропитания или поломки элементов контроля. За показаниями на шкале можно наблюдать через стекло 5.

На валу электродвигателя 8 установлен упор для сцепления с поводком ручного привода, которым можно воспользоваться для опускания пэла в активную зону при выходе из строя электродвигателя. Температура электродвигателя контролируется первичным измерительным преобразователем, приклеенным к его корпусу. В корпус привода через ниппель 6 закачивается сухой азот под избыточным давлением, предотвращающий попадание внутрь корпуса воды из канала СУЗ.

Подвод питания к приводу осуществляется специальным электроразъемом 10, состоящим из гибкого металлорукава, на одном конце которого герметично установлена розетка. В нерабочем положении розетка закрыта крышкой. Другой конец металлорукава герметично запаян в плиту электроразъема, которая крепится к корпусу привода. Работу привода лучше рассмотреть по схеме на рис. 3.4. Исполнительный механизм РР-АЗ приводится в действие электродвигателем постоянного тока 4, имеющим встроенную электромагнитную муфту, тормозящую вал электродвигателя при подаче напряжения на обмотку муфты. Электродвигатель через передачу 5 передает вращение на барабан 6, на который наматывается трос, связанный с пэлом 7. Через кинематическую передачу 1 вращение передается сельсину-датчику 8 типа БД-404А и кулачкам 3, воздействующим на микровыключатели 2 крайнего верхнего и нижнего положений пэла.

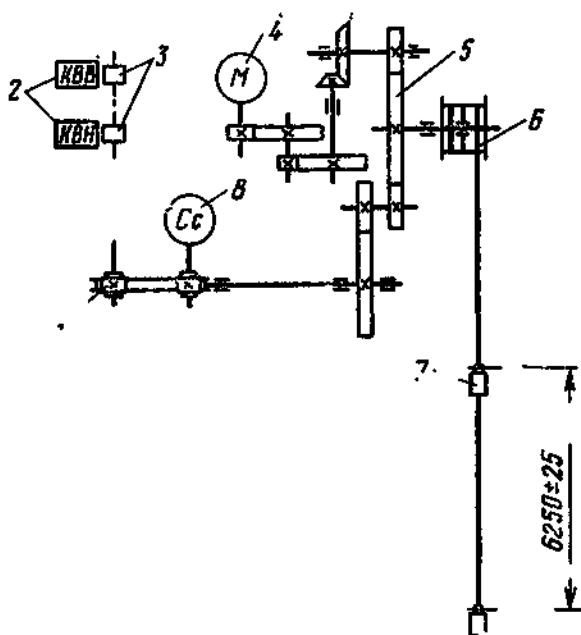


Рис. 3.4. Кинематическая схема привода СУЗ РР-АЗ реактора РБМК



*Работа ИМ в режиме компенсации.* При отсутствии команд на подъем или опускание пэла электрические цепи якоря и обмотки возбуждения электродвигателя обесточены, цепь обмотки электромагнитной муфты находится под напряжением, а барабан с тросом и пэлом — в заторможенном состоянии.

При извлечении пэла из активной зоны от источника питания подается напряжение на якорь и обмотку возбуждения электродвигателя и одновременно обесточивается цепь электромагнитной муфты. Тормоз муфты отключается, и двигатель может перемещать пэл. При срабатывании верхнего конечного микровыключателя или при снятии команды на перемещение пэла электрические цепи якоря и обмотки возбуждения двигателя обесточиваются и подается питание на муфту двигателя — пэл затормаживается.

Введение пэла в активную зону (опускание) может происходить подачей импульса напряжения в цепь якоря для уменьшения времени переходного процесса (импульс форсировки) или без подачи импульса форсировки. Опускание пэла при подаче импульса в цепь якоря производится следующим образом. Подается полное напряжение источника на якорь и обмотку возбуждения и снимается питание с муфты, привод начинает работать на опускание в двигательном режиме. После окончания импульса обмотка якоря отключается от источника напряжения, а напряжение на обмотке возбуждения уменьшается до заданного значения. Привод продолжает работать на опускание (под действием веса пэла) в режиме динамического торможения. При размыкании нижнего конечного микровыключателя (или при снятии команды) обесточивается цепь обмотки возбуждения и подается питание на муфту — пэл затормаживается.

Опускание пэла без подачи импульса напряжения в цепь якоря происходит следующим образом. Подается питание на обмотку возбуждения, муфта обесточивается, и привод под действием веса пэла начинает работать на опускание в режиме динамического торможения с ослабленным потоком. При размыкании нижнего конечного микровыключателя (или при снятии команды) снимается напряжение с обмотки возбуждения и подается питание на муфту — пэл затормаживается.

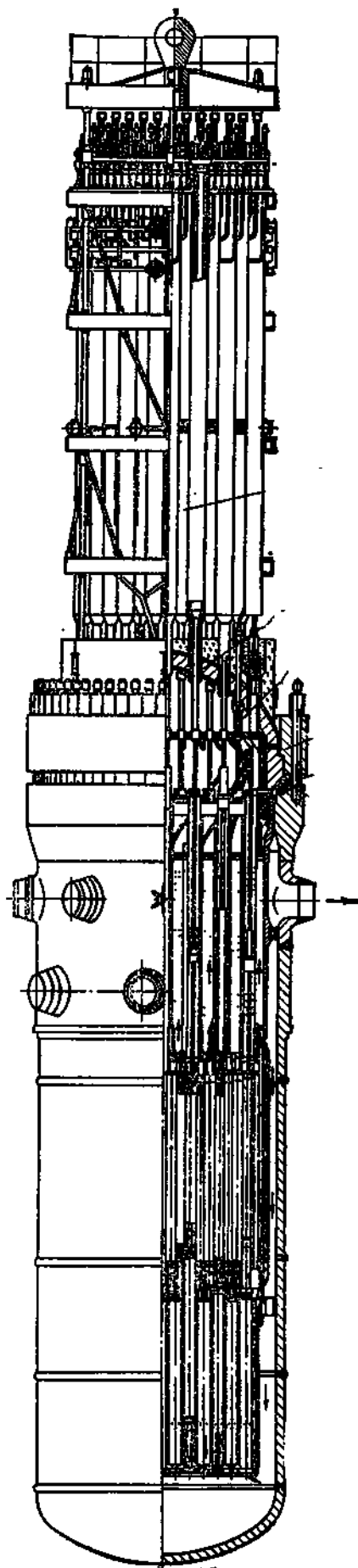
*Работа ИМ в режиме АЗ.* При подаче сигнала АЗ электромагнитная муфта обесточивается, и привод под действием веса пэла начинает работать на опускание в режиме динамического торможения с самовозбуждением. При размыкании нижнего конечного микровыключателя подается питание на муфту. После срабатывания муфты привод затормаживается. При исчезновении напряжения, питающего муфту, привод также останавливается, но при полном разматывании троса.

Пэлы реактора РБМК имеют значительный рабочий ход. Использование в преобразователе движения барабана с тросом позволяет при значительном ходе пэла получить компактную конструкцию привода с небольшими габаритными размерами, установить привод в биологической защите под плотным настилом

центрального зала и относительно просто осуществить биологическую защиту канала СУЗ. Использование в приводе двигателя постоянного тока с самовозбуждением дает возможность осуществить относительно просто электродинамическое торможение пэла. Использование этих же двигателей в приводах АР позволяет получить значительный диапазон регулирования скорости.

Наряду с перечисленными достоинствами ИМ этого типа имеют ряд недостатков. Одним из основных недостатков является быстрое изнашивание троса, особенно в приводах АР, ввиду малого диаметра барабана и большого числа изгибов троса. Это обстоятельство вызывает частую замену ИМ. Другой недостаток — необходимость поддержания во внутренней полости привода избыточного давления азота и в межманжетном уплотнении вала барабана — избыточного давления масла во избежание попадания воды, охлаждающей канал СУЗ, во внутреннюю полость привода. Использование гибкой связи (трос) между пэлом и приводом механизма требует принятия специальных мер по предотвращению всплытия пэла с вытеснителем. Применение двигателя постоянного тока для механизмов АР требует довольно сложной системы электрической синхронизации отдельных механизмов АР или их групп.

Несмотря на отмеченные недостатки, эксплуатация ИМ этого типа показала их относительно высокую надежность, что объясняется тщательной отработкой их конструкции и технологии на заводе-изготовителе. Следует также иметь в виду, что на реакторах канального типа замена вышедших из строя ИМ может производить-



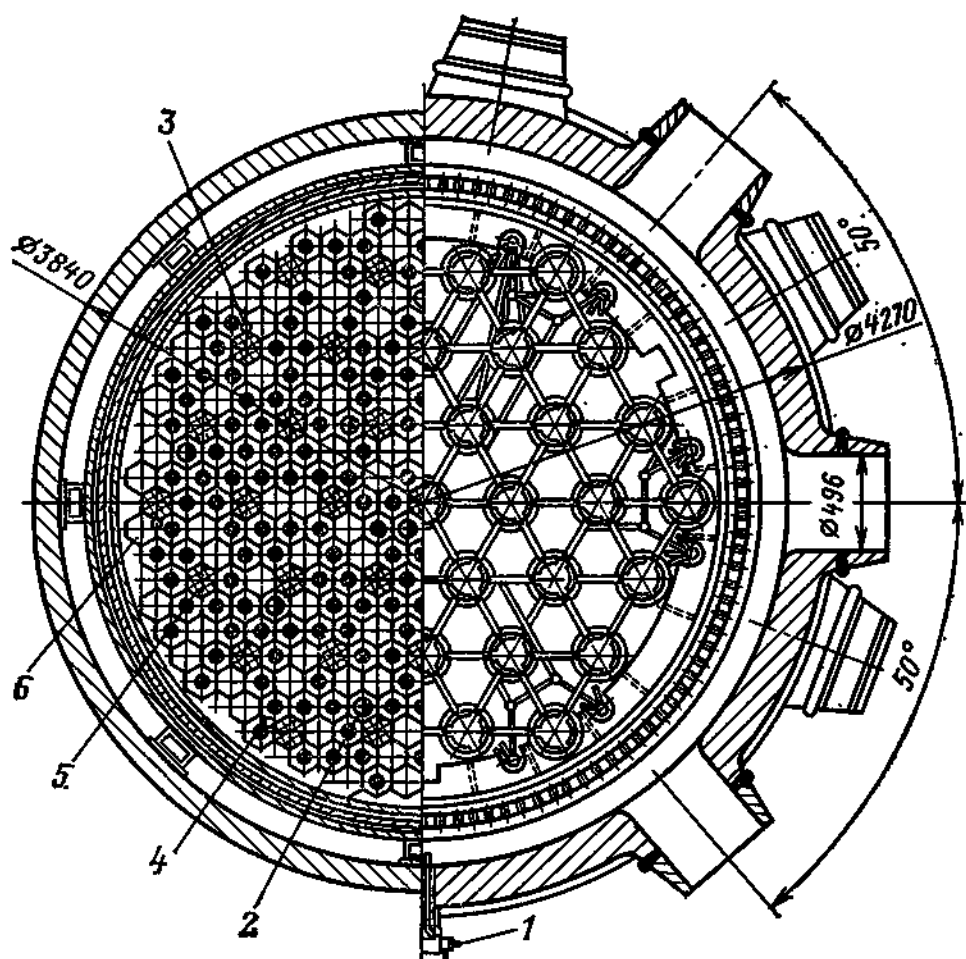


Рис. 3.6. Активная зона реактора ВВЭР-440.

1 — штуцер для измерения перепада давления в активной зоне; 2 — канал для измерения нейтронного потока; 3 — канал для объемного теплоконтроля; 4 — канал теплового контроля ТВС; 5 — регулирующая ТВС; 6 — рабочая ТВС

ся на работающем реакторе и не вызывает особых трудностей.

Для таких реакторов наиболее перспективными могут быть ИМ дискретного типа с силовым шаговым электродвигателем, который наряду с обеспечением высокого быстродействия позволяет обойтись без громоздкой схемы электрической синхронизации перемещения пэлов.

**Исполнительный механизм СУЗ серийного реактора ВВЭР-440.** Водно-водяные энергетические реакторы типа ВВЭР-440 в настоящее время являются одним из основных типов энергетических реакторов для действующих и строящихся АЭС в СССР и за рубежом в странах СЭВ — ГДР, ЧССР, НРБ, ВНР, ПНР, СРР. Реакторы данного типа экспортируются также в Финляндию.

Общий вид серийного реактора ВВЭР-440 показан на рис. 3.5 [16]. Активная зона реактора расположена в цилиндрическом корпусе с эллиптическим днищем и сферической крышкой, с уплотнением и торовым компенсатором, изготовленными из высокопрочной углеродистой стали. В верхней части корпуса расположены два ряда выштампованных (в некоторых случаях выфрезеро-

ванных) патрубков для подвода и отвода теплоносителя. Внутри корпуса установлена цилиндрическая шахта для крепления внутрикорпусных устройств реактора и организации потока теплоносителя. В шахту устанавливается внешняя корзина с активной зоной.

Активная зона (рис. 3.6) имеет 312 рабочих тепловыделяющих сборок (ТВС) и 37 регулирующих тепловыделяющих сборок (АРК). Сборки АРК состоят из двух частей: нижняя ТВС по типу рабочей и верхняя — сборка поглощающих элементов. В крайнем нижнем положении ТВС АРК помещаются в трубных каналах днища шахты. В нижней части трубных каналов, расположены штыри гидравлических демпферов, обеспечивающих снижение перегрузок при падении АРК в режиме АЗ. Над активной зоной реактора расположен блок защитных труб, обеспечивающий диаметрально дистанционирование кассет. В трубах верхнего блока располагаются промежуточные штанги, являющиеся соединительным элементом между приводом и регулирующей сборкой.

В блоке защитных труб установлены каналы для размещения первичных измерительных преобразователей температурного и нейтронного контроля по высоте и диаметру активной зоны. Реактор работает в режиме частичных перегрузок за кампанию, длительность рабочего периода между перегрузками 6500—7000 эф. ч. Для компенсации реактивности в теплоноситель вводится борная кислота.

Конструкция ИМ рассчитана на работу при следующих нормальных условиях эксплуатации: давление воды первого контура 12,5 МПа; температура теплоносителя в районе выхода из активной зоны примерно 300 °С; температура окружающего воздуха в зоне расположения механизмов до 75 °С и относительная влажность до 98 %. На серийных реакторах ВВЭР-440 применяются электромеханические механизмы с преобразователями движения рейка — шестерня.

На реакторах ВВЭР-440 применяются ИМ двух модификаций. Кинематическая схема первой модификации ИМ показана на рис. 3.7. Этот ИМ применен на Нововоронежской и Кольской АЭС, АЭС «Норд» в ГДР, Козлодуй в НРБ и др. Механизм состоит из герметичного электродвигателя синхронно-реактивного типа погружного исполнения с автономным охлаждением, что обеспечивает его работу в среде первого контура реактора при температуре обмотки не более 100 °С.

Конструкция электродвигателя показана на рис. 3.8. От ведущей шестерни электродвигателя вращение передается на редуктор.

Особенность данной модификации привода в том, что реечная шестерня закреплена не неподвижно, а прижимается к рейке усилием электромагнита. Такое решение позволяет обеспечить быстрый разгон (примерно 0,5 с) падающей рейки и связанной с ней сборки АРК до требуемой скорости (200—300 мм/с) по сигналу АЗ, а также предохранить редуктор от поломок при несрабате-

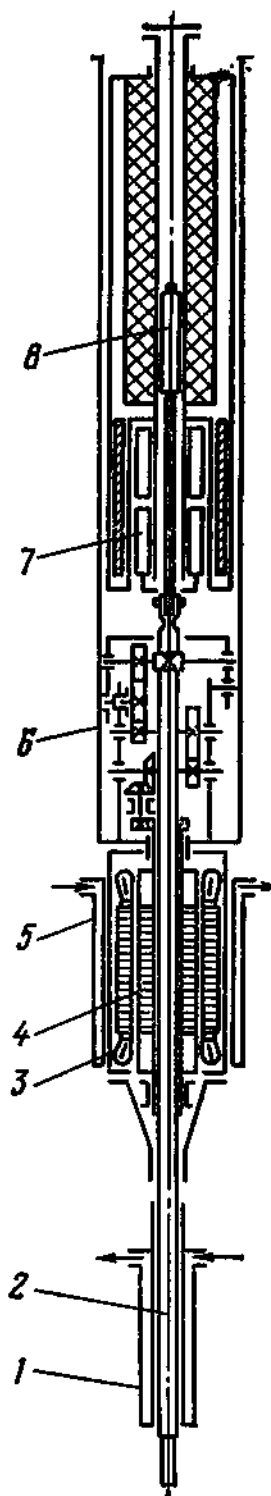


Рис. 3.7.

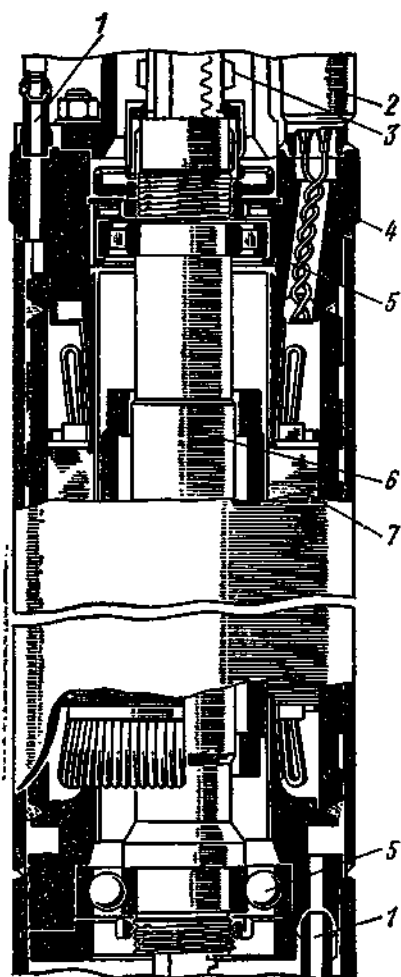


Рис. 3.8.

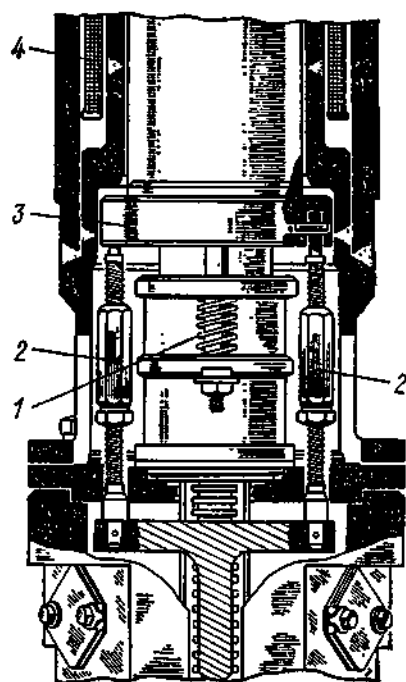


Рис. 3.9.

Рис. 3.7. Схема исполнительного механизма ВВЭР-440:

1 — охладитель; 2 — рейка; 3 — статор электродвигателя; 4 — ротор электродвигателя; 5 — охладитель; 6 — редуктор; 7 — узел отключателя; 8 — индуктивный датчик положения

Рис. 3.8. Конструкция электродвигателя:

1 — вход и выход охлаждающей воды; 2 — электроввод; 3 — ведущая шестерня; 4 — корпус; 5 — подшипник; 6 — ротор; 7 — статор

Рис. 3.9. Узел отключателя:

1 — пружина; 2 — тяга; 3 — подвижный сердечник; 4 — электромагнитная катушка

Рис. 3.10. Узел соединения рейки с промежуточной штангой

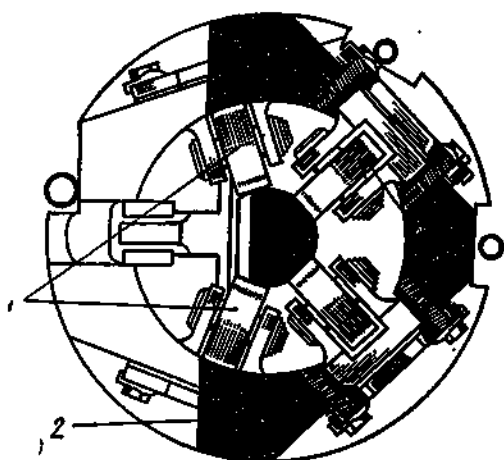
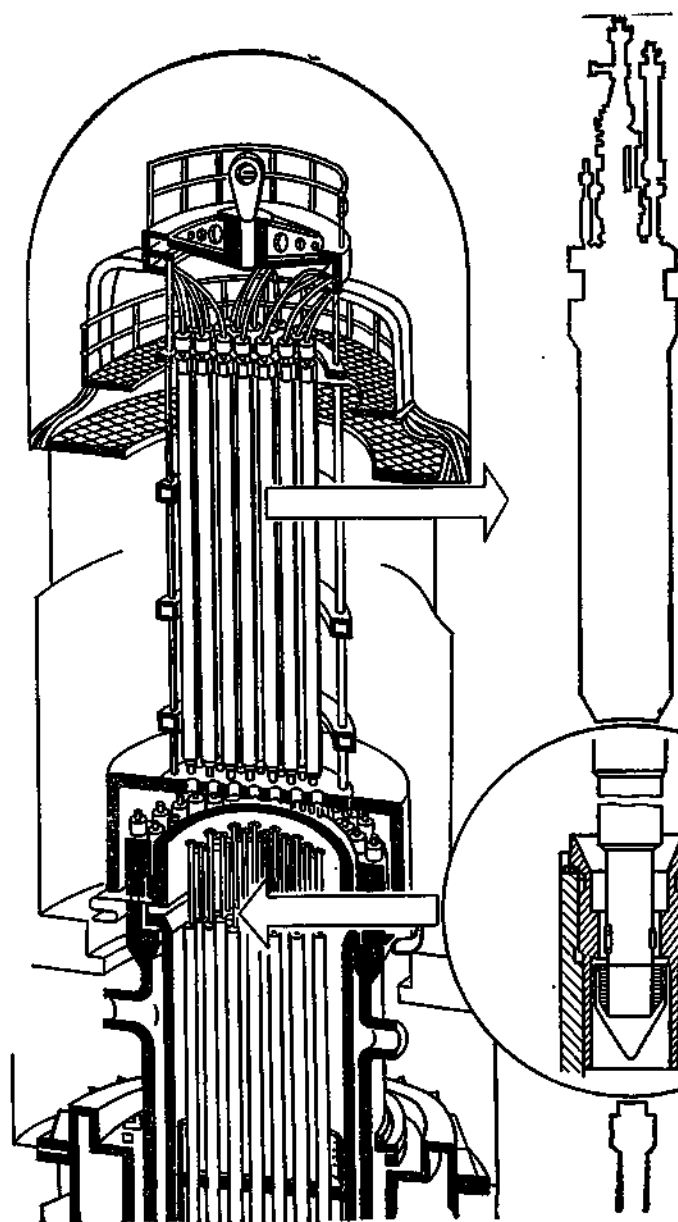


Рис. 3.11. Узел центровки рейки:

1 — направляющий ролик;  
2 — корпус редуктора

вании конечных выключателей. Конструкция узла отключателя показана на рис. 3.9. Рейка с промежуточной штангой соединяется с помощью байонетного затвора, конструкция которого показана на рис. 3.10. Управление байонетом вынесено на верхний конец рейки, где установлен также сердечник датчика положения. Центровка рейки обеспечивается специальными направляющими роликами, установленными в корпусе редуктора (рис. 3.11).

Особенностью этой модификации механизма является наличие специального устройства, обеспечивающего регулировку скорости падения рейки со сборкой АРК в режиме АЗ путем изменения гидравлического сопротивления перетечек через поршень, установленный на верхнем конце рейки. Этот же поршень выполняет роль демпфера при падении рейки в крайнее нижнее положение. Демпфирование при подходе рейки к подпружиненному упору осуществляется изменением гидравлического сопротивления по пути дви-

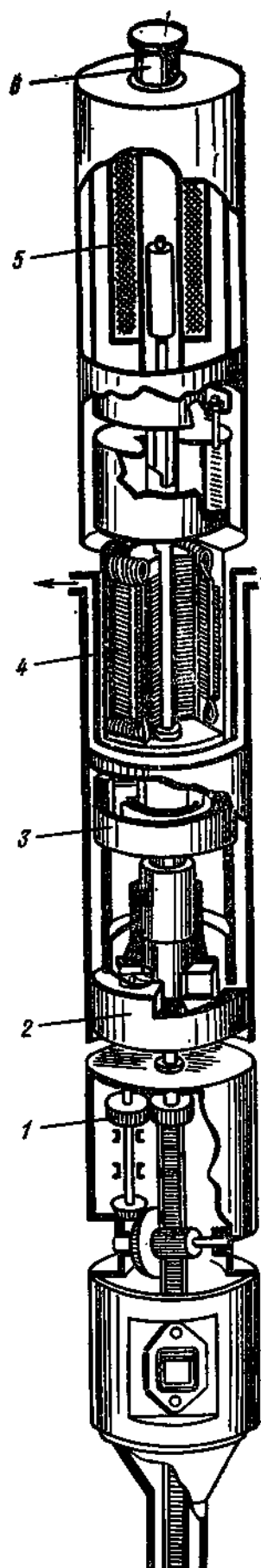


Рис. 3.12. Схема исполнительного механизма ВВЭР-440 (вторая модификация):

1 — редуктор; 2 — пружинный демпфер; 3 — центробежный тормоз; 4 — электродвигатель; 5 — датчик положения; 6 — электроввод

жения поршня в сужающемся канале. Первая модификация механизма СУЗ ВВЭР-440 прошла довольно значительную отработку на Нововоронежской АЭС и после внесения ряда конструктивно-технологических улучшений надежно работает на ряде действующих АЭС в СССР и за рубежом, причем первые комплекты механизмов без неполадок отработали установленный срок службы.

На некоторых действующих и строящихся АЭС в СССР и за рубежом (Ловиса в Финляндии) применена вторая модификация ИМ, отличающаяся от первой более простой кинематической схемой (рис. 3.12). Упростить кинематику данной модификации удалось использованием более низкооборотного электродвигателя, что позволило обеспечить требуемые характеристики разгона до скорости, соответствующей движению в режиме АЗ, без отсоединения реечной шестерни от рейки. Ограничение скорости падения рейки в режиме АЗ обеспечивается центробежным фрикционным регулятором. Привод СУЗ второй модификации показан на рис. 3.13.

В приводе применен более компактный по габаритным размерам, но более сложный по кинематике индуктивный линейный датчик положения. Для обеспечения надежного сброса в режиме АЗ между электродвигателем и датчиком положения установлена муфта предельного момента. Для создания нормальных условий работы электротехнических узлов в конструкции привода применена более совершенная система термозатвора. Рейка соединяется с промежуточной штангой байонетным затвором, но управление им осуществляется через внутренний канал в теле рейки. Эта конструкция механизма также прошла испытания на Нововоронежской АЭС и надежно эксплуатируется на действующих АЭС.

Исполнительный механизм СУЗ V блока Нововоронежской АЭС. Реактор ВВЭР-1000 электрической мощностью 1000 МВт, установленный на V блоке Нововоронежской АЭС,

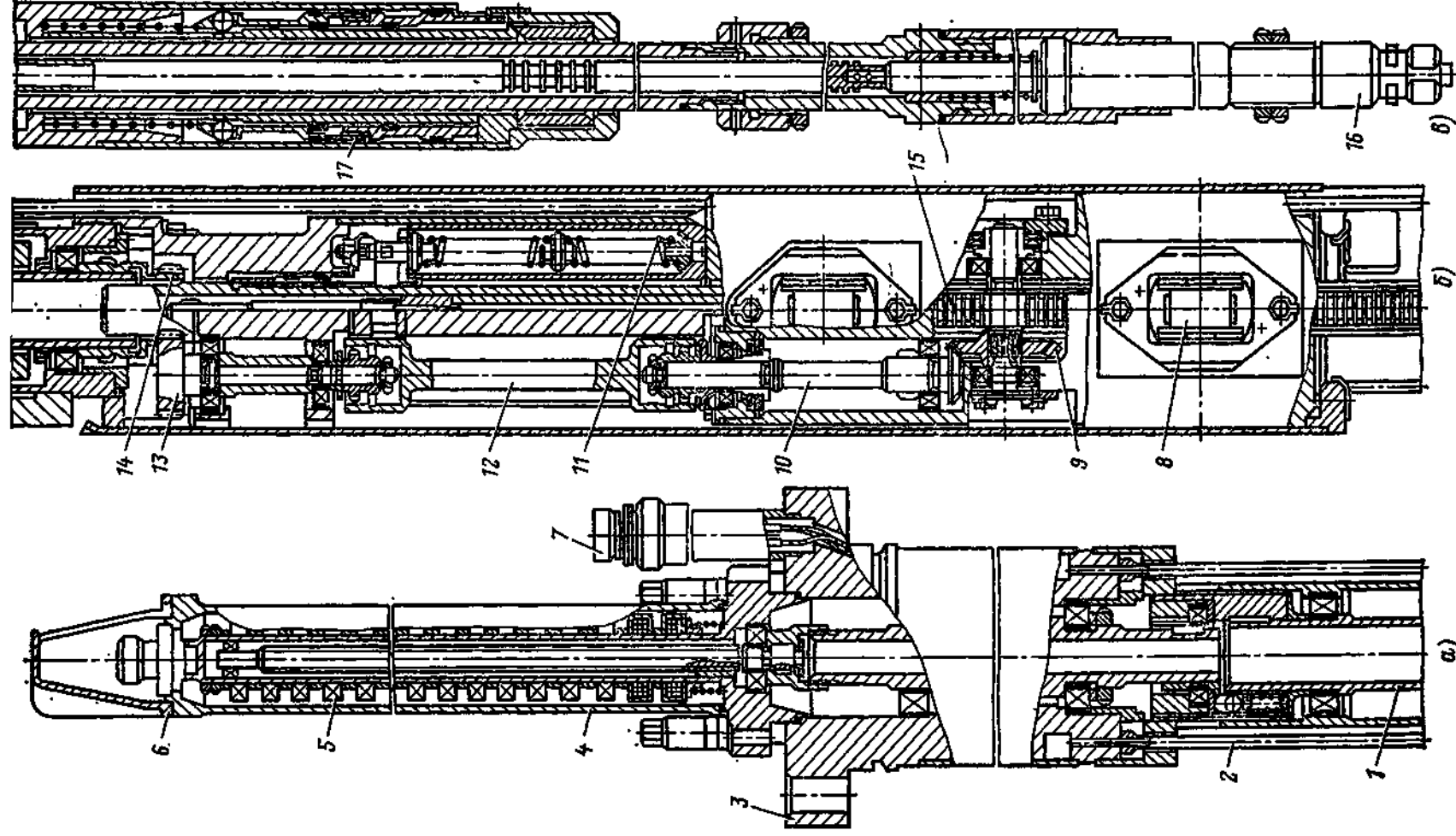
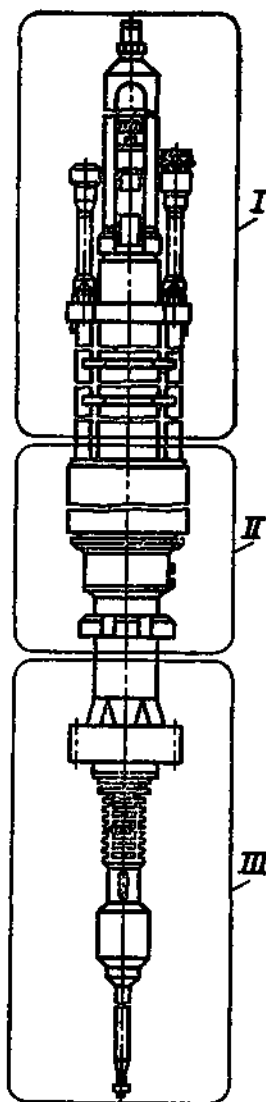


Рис. 3.13. Исполнительный механизм реактора ВВЭР-440 (вторая модификация):  
 а — верхняя часть; б — нижняя часть; в — средняя часть; 1 — вал; 2 — трубка для охлаждающей воды; 3 — электродвигатель; 4 — корпус датчика; 5 — индуктивная катушка датчика; 6 — крышка; 7 — электрический соединитель; 8 — направляющий ролик; 9 — коническая зубчатая передача; 10 — вал; 11 — демфер; 12 — валки; 13, 14 — шестерни; 15 — рейка; 16 — байонет; 17 — гидростопор



Рис. 3.14. Исполнительный механизм V блока Нововоро-  
нежской АЭС:

I, II, III — выносные элементы



оснащен современной системой управления и защиты с дискретными линейными электромагнитными механизмами СУЗ [11, 17]. Картограмма размещения ИМ СУЗ на реакторе приведена на рис. 1.4. ИМ СУЗ показан на рис. 3.14 и 3.15.

Основным элементом ИМ является четырех-  
фазный линейный шаговый электродвигатель. При коммутации в определенной последовательности от тиристорного преобразователя обмогок управления двигателя якорь, связанный с регулирующим органом, может перемещаться в ту или иную сторону фиксированными шагами. На якоре двигателя укреплен захват, соединяемый с РО байонетным зажимом. Регулирующий орган представляет собой несколько цилиндрических стерженьков из поглощающего нейтроны материала, укрепленных на траверсе и расположенных в отверстиях ТВС.

ИМ СУЗ снабжен датчиком положения РО, выполненным в виде индуктивных катушек с магнитопроводом. Катушки установлены в герметичной трубе, расположенной внутри прочного корпуса механизма. ИМ СУЗ содержит также датчик шага, выполненный в виде катушек индуктивности и расположенный в той же трубе, что и катушки датчика положения. Катушки датчика положения срабатывают от шунта, укреп-

ленного на якоре. Срабатывание катушек происходит через каждые 350 мм хода РО. Датчик шага выдает сигнал об отработке якорем двигателя каждого управляющего импульса, поданного на обмотки управления линейного шагового двигателя.

Для предотвращения выхода из активной зоны реактора РО при нарушении герметичности первого контура, например при трещине в прочном корпусе механизма, предусмотрен гидростопор, расположенный внутри якоря и выполненный в виде шариковой защелки с поршнем. Под действием усилия от перепада давления поршень перемещает шарики по конусной поверхности и заклинивает якорь.

Линейный шаговый электродвигатель представляет собой четырехфазную электрическую машину с пассивным якорем трубчатой формы. Магнитный поток замыкается через внутренний сердечник и наружный магнитопровод двигателя.

Исполнительный механизм рассчитан на перемещение подвижных частей общей массой 60 кг со скоростью 20—50 мм/с. ИМ работает в режимах фиксированного удержания якоря с РО и ди-

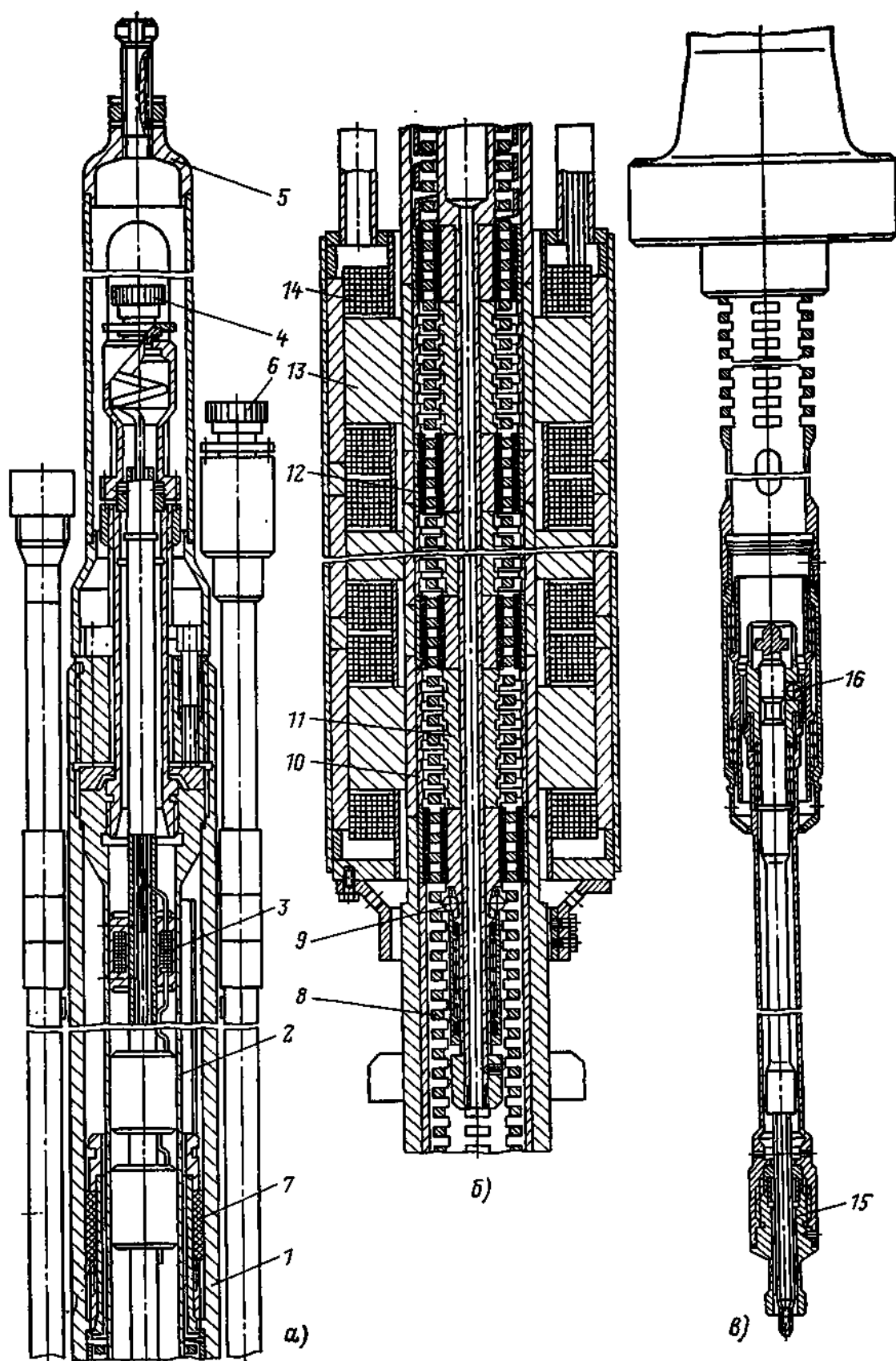


Рис. 3.15. Выносные элементы:

*а* — 1; *б* — II; *в* — III; 1 — корпус; 2 — чехол датчика положения РО; 3 — индуктивная катушка датчика положения РО; 4 — электрический соединитель датчика положения РО; 5 — защитный колпак; 6 — электрический соединитель ЛШД; 7 — подшипник; 8 — якорь ЛШД; 9 — гидростопор; 10 — полюсный наконечник; 11 — сердечник; 12 — подшипник; 13 — магнитопровод; 14 — катушка; 15 — байонетный зажим; 16 — замок

скретного перемещения РО шагами определенного значения. По сигналу АЗ питание двигателя отключается и РО под действием силы тяжести вводится в активную зону реактора.

#### Технические характеристики ИМ

Рабочий ход якоря, мм . . . . .	3500
Дискретный шаг перемещения якоря, мм . . . . .	4
Скорость перемещения якоря, мм/с . . . . .	20—50
Время сброса РО по сигналу АЗ с полной высоты, с . . . . .	3—4
Перегрузка на элементы РО при сбросе с полной высоты . . . . .	10
Масса, кг . . . . .	595

Основными преимуществами такой конструкции ИМ СУЗ являются: отсутствие в приводе механических передач — связь якоря со статором осуществляется только силами электромагнитного поля, создаваемого обмотками управления; электрическое (частотное) регулирование скорости перемещения РО; возможность синхронного перемещения ряда РО или их групп без дополнительных устройств синхронизации; высокое быстродействие и точность отработки шага.

В конструкции ИМ сведено к минимуму число механических элементов, подверженных износу. Линейный шаговый двигатель обеспечивает надежное удержание РО даже при воздействии сейсмических нагрузок. Замена двигателя может осуществляться на работающем реакторе без разгерметизации первого контура. При всех случаях эксплуатации надежно обеспечиваются требования ядерной безопасности.

Двигатель не может развить скорость перемещения РО, превышающую скорость ввода максимально допустимой реактивности. Может быть задана любая минимальная скорость изменения реактивности. При возникновении аварийных ситуаций обеспечивается надежное срабатывание РО при обесточивании обмоток двигателя, что подтверждено эксплуатацией таких механизмов на V блоке Нововоронежской АЭС.

Исполнительный механизм СУЗ для реакторов с водой под давлением. На большинстве ядерных реакторов с водой под давлением (PWR) за рубежом применяется электромагнитный ИМ с механическими защелками, впервые разработанный американской фирмой Westinghouse. В дальнейшем этот механизм был модифицирован и в настоящее время изготавливается многими зарубежными фирмами. На рис. 3.16 приведена конструкция линейного электромагнитного ИМ, используемая на АЭС Obrigheim (ФРГ) [17].

В механизме вокруг корпуса под давлением расположены три катушки электромагнитов: подъемная, захватывающая и удерживающая. В магнитном поле, создаваемом катушками, внутри корпуса могут перемещаться в определенной последовательности кольцеобразные якоря, которые через систему рычагов осуществляют захват защелками кольцевых выступов штока и подъем или опускание связанного с ним РО. При аварийном выключении ре-

Рис. 3.16. Электромагнитный привод реактора АЭС Obrigheim:

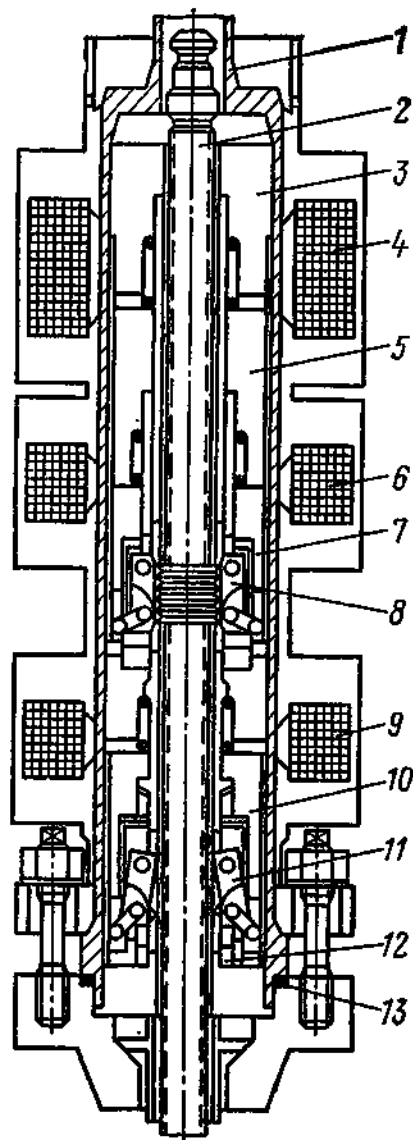
1 — корпус под давлением; 2 — штанга; 3 — магнитопровод; 4, 5 — соответственно катушка и якорь подъема; 6, 7 — соответственно катушка и якорь захвата; 8 — защелка; 9, 10 — удерживающие катушка и якорь; 11 — защелка; 12 — корпус защелок; 13 — уплотнительное кольцо

актора катушки электромагнитов обесточиваются, защелки выходят из кольцевых канавок штока и РО вместе с подвижной системой ИМ под действием силы тяжести вводится в активную зону реактора. Регулирующий орган перемещается дискретно, фиксированными шагами со сравнительно низкой скоростью. Каждому шагу соответствует несколько переключений катушек, имеющих значительные электромагнитные постоянные времени. Так, на реакторе АЭС Джинна, оснащенный таким ИМ, одному шагу РО соответствует цикл переключения катушек продолжительностью 0,78 с. Такой ИМ обеспечивает скорость перемещения РО 72 шаг/мин, или 114,7 см/мин.

Датчик положения РО состоит из комплекта катушек, смонтированных на верхней части герметичного корпуса. По данным, приведенным в [26], датчик положения РО ИМ такого типа может быть связан с ЭВМ, что позволяет реализовать программное управление реактором. Устройство индикации с помощью ЭВМ проверяет информацию о положении РО в каждом адресе и сравнивает ее с информацией предыдущего цикла. Если сведения изменились, ЭВМ вырабатывает сигнал прерывания, посылаемый в нее во время следующего цикла операций. ЭВМ сканирует сигнал прерывания с периодом 8 с и выдает сведения о положении всех РО.

Электромагнитные линейные механизмы управления с защелками работают от бесконтактной системы управления, которая снабжена устройствами обнаружения вышедшего из строя оборудования.

Приведенная конструкция исполнительного механизма СУЗ является универсальной, она позволяет выполнять в системе управления реактором функции автоматического регулирования, компенсации реактивности и аварийной защиты. Исполнительный механизм имеет относительно простую кинематику, содержит небольшое число элементов конструкции, расположенных в первом контуре реактора. В ИМ отсутствуют преобразователи одного ви-



**Таблица 3.1. Физико-химические свойства натриевого теплоносителя**

Характеристики	Обозначение	Значение
Температура плавления, °С	$t_{\text{п}}$	97,5
Рабочая температура в реакторе, °С	$t_{\text{р}}$	550—600
Давление паров при температуре 527 °С, Па	$P_{\text{п}}$	1003,9
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	$C_{\text{р}}$	1256
Теплопроводность при температурах 100—500°С, Вт/(м·°С)	$\lambda$	68,6—86,1
Наведенная удельная активность в работающем реакторе, Бк/л	—	$74 \cdot 10^{10}$

да движения в другой. Длительный опыт эксплуатации таких ИМ на ядерных установках с реакторами с водой под давлением позволил создать хорошо отработанную конструкцию, что позволило снизить затраты на проектирование, изготовление и испытание ИМ СУЗ для однотипных установок АЭС с реакторами PWR.

Вместе с тем конструкция этого ИМ имеет и ряд недостатков, к которым относятся:

относительно низкая скорость перемещения РО, которая при максимально допустимом шаге, определяемом габаритными размерами катушек и вводимой реактивностью, принципиально не может быть увеличена;

перемещение РО «вниз» (в активную зону) шагами только под действием силы тяжести, что не позволяет использовать такие ИМ для регулирования реакторов, имеющих небольшой вес РО, соизмеримый с силами трения, возникающими в трактах СУЗ при их перемещении;

наличие механических подвижных элементов, расположенных в первом контуре реактора, что снижает надежность и ресурс ИМ вследствие неизбежного износа этих элементов;

невозможность регулирования скорости перемещения РО.

Таким образом, электромагнитные исполнительные механизмы СУЗ с защелками могут использоваться только на реакторных установках, в которых по условиям конструкции активной зоны и регулирования возможно перемещать РО значительной массы с относительно небольшой скоростью.

**Исполнительные механизмы СУЗ для реакторов на быстрых нейтронах.** Реакторы на быстрых нейтронах занимают важное место в развитии ядерной энергетики, так как они способны осуществлять расширенное воспроизводство топлива и тем самым в будущем обеспечивать ядерным топливом новые поколения АЭС.

В построенных энергетических реакторах на быстрых нейтронах в качестве теплоносителя используется в основном жидкий натрий. Использование натрия в качестве теплоносителя требует учета ряда специфических условий при разработке ИМ СУЗ, к которым относятся: высокая химическая активность натрия с водой и воздухом; необходимость разогрева установки до залива теплоносителя; затвердевание натрия при температурах ниже 100 °С;

высокое давление паров натрия; значительная наведенная активность натрия.

Некоторые физико-химические свойства натриевого теплоносителя приведены в табл. 3.1.

Реакторы на быстрых нейтронах имеют ряд принципиальных отличий от реакторов на тепловых нейтронах:

доля запаздывающих нейтронов в реакторах на быстрых нейтронах на  $^{239}\text{Pu}$  примерно в 2 раза меньше, чем у реакторов на тепловых нейтронах, работающих на  $^{235}\text{U}$ ;

среднее время жизни нейтронов в реакторах на быстрых нейтронах значительно, примерно на 3—4 порядка меньше, чем у реакторов на тепловых нейтронах. Следовательно, при прочих равных условиях скорость возрастания потока нейтронов в реакторе на быстрых нейтронах при введении положительной реактивности значительно больше, чем у реактора на тепловых нейтронах;

потоки нейтронов и энергонапряженность в реакторах на быстрых нейтронах выше, чем в реакторах на тепловых нейтронах;

в реакторах на быстрых нейтронах отсутствует отравление ксеноном и самарием, а падение реактивности вследствие выгорания компенсируется накоплением горючего в зоне воспроизводства.

Указанные особенности обуславливают следующие отличия СУЗ быстрых реакторов:

точность поддержания мощности системой АР должна быть более высокой, чем в реакторах на тепловых нейтронах;

время срабатывания АЗ должно быть меньше, чем у реакторов на тепловых нейтронах.

Последние обстоятельства накладывают определенные требования обеспечения быстродействия точности перемещения РО и скорости их аварийного срабатывания при проектировании механизмов СУЗ.

Регулирующие органы и связанные с ними элементы конструкции ИМ СУЗ работают длительное время в среде натриевого теплоносителя первого контура реактора, его паров и инертного газа, в связи с этим должны приниматься соответствующие меры для предотвращения конденсации паров натрия в подвижных элементах ИМ.

Условия работы ИМ на быстрых ядерных реакторах требуют обеспечения многократного надежного сцепления и расцепления приводной части ИМ с РО при проведении перегрузок топлива. ИМ, как правило, размещаются на биологической поворотной пробке, используемой при перегрузке топлива.

Практическую реализацию указанных выше требований можно проследить на примере конструкций механизмов СУЗ отечественных ядерных реакторов на быстрых нейтронах БН-350 и БН-600 [14].

Картограмма расположения РО системы управления и защиты реактора БН-350 показана на рис. 3.17. Активная зона реактора образована шестигранными ТВС. Регулирующие органы системы управления и защиты реактора расположены в 12 ячейках.

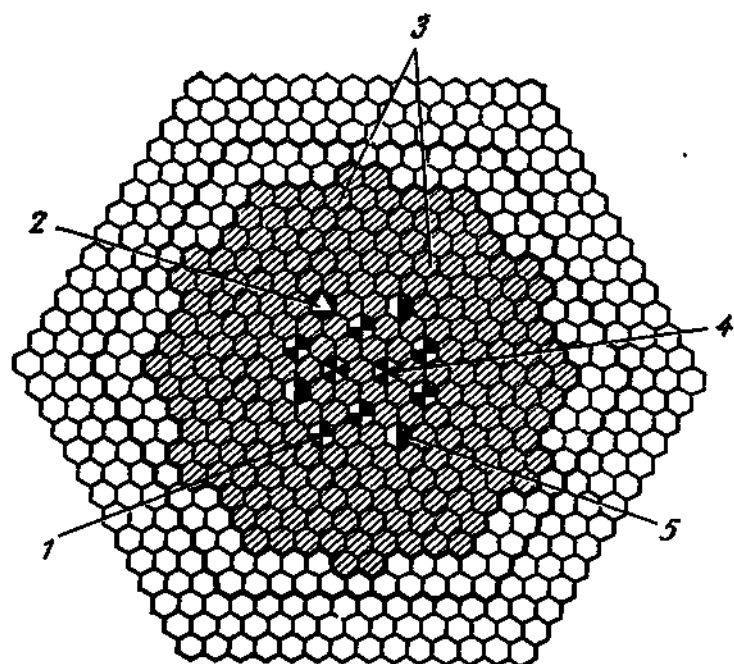


Рис. 3.17. Картограмма расположения регулирующих органов СУЗ реактора БН-350:

1 — регулирующий орган компенсации реактивности (топливный); 2 — регулирующий орган компенсации реактивности (борный); 3 — ТВС; 4 — регулирующий орган; 5 — регулирующий орган аварийной защиты

Автоматическое регулирование мощности осуществляется двумя регулирующими органами. Кинематическая схема ИМ регулирующего органа показана на рис. 3.18.

Конструкция исполнительного механизма РО показана на рис. 3.19—3.22. Исполнительный механизм состоит из электродвигателя, редуктора, реечного механизма, стойки со штангой и наконечника с захватами, связанного с РО. Привод соединен с реечным механизмом герметичного исполнения специальным кинематическим элементом — «кривым валом», позволяющим передавать вращательное движение в герметичную полость от вилки, насаженной на барабан привода.

Подробно конструкция этого элемента показана на рис. 3.23. Управление захватами для сцепления и расцепления механизма с РО осуществляется вручную с помощью специального привода. Герметизация ручного привода захватов обеспечивается сильфонами, установленными в колебательно-шестеренчатом механизме ручного привода. Индикация положения РО обеспечивается с помощью сельсина-датчика, установленного в сервоприводе. Конечный выключатель индуктивного типа ограничивает рабочий ход штанги с РО. Предусмотрены также промежуточные конечные выключатели.

Регулирующие органы охлаждаются теплоносителем первого контура реактора. Конструкция механизма позволяет заменять сервопривод и ручной привод захватов без разуплотнения полости реактора и использовать в конструкции сервопривода обычные элементы, применяемые в машиностроении (подшипники, смазочные материалы и др.).

Более компактной является конструкция механизма РО ядерного реактора БН-600, что позволило обеспечить свободный доступ к ИМ, размещенным на крышке реактора. Кинематическая

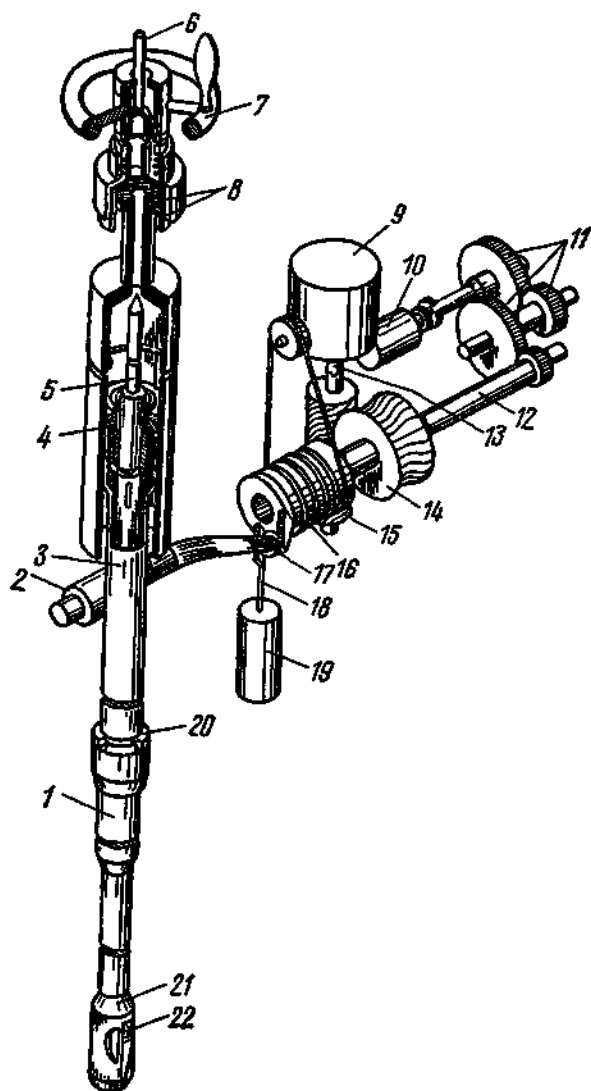


Рис. 3.18.

Рис. 3.18. Кинематическая схема исполнительного механизма СУЗ реактора БН-350:

1 — штанга; 2 — реечная шестерня; 3 — рейка; 4 — никелевый сердечник; 5 — верхний шток; 6 — стержень «солдатик»; 7 — маховик; 8 — шестерня; 9 — электродвигатель; 10 — датчик положения; 11 — шестерня; 12 — выходной вал; 13 — кулачковая муфта; 14 — червячное колесо; 15 — червяк; 16 — барабан; 17 — кривой вал; 18 — трос; 19 — груз; 20 — гайка; 21 — наконечник штанги; 22 — захваты

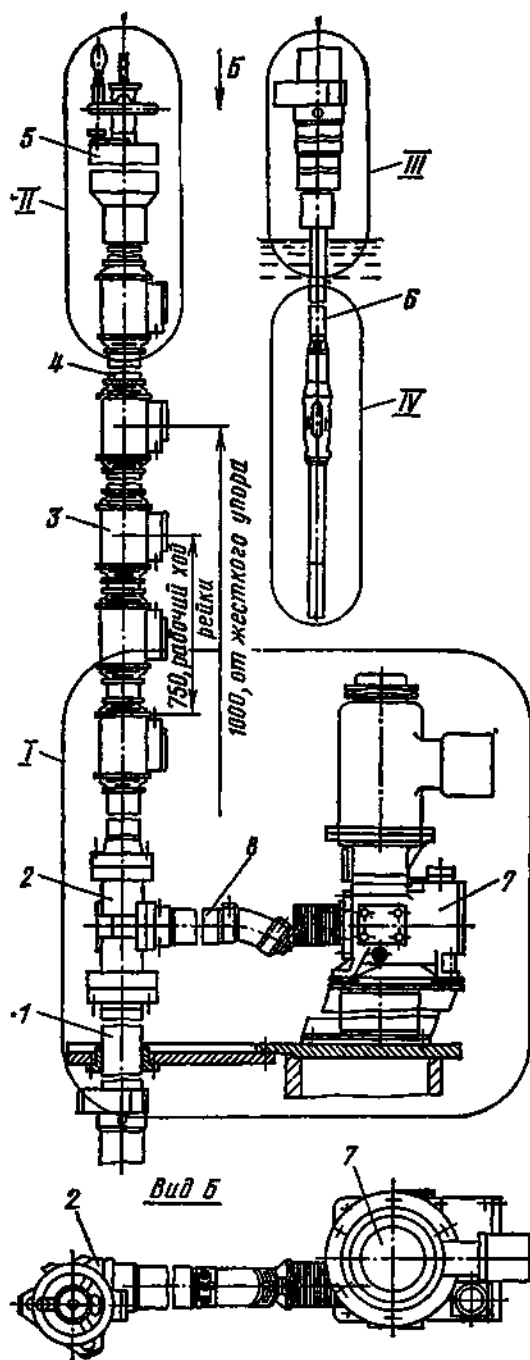


Рис. 3.19.

Рис. 3.19. Общий вид исполнительного механизма СУЗ реактора БН-350:

1 — стойка штанги; 2 — реечный механизм; 3 — конечный индуктивный выключатель; 4 — чехол; 5 — ручной привод; 6 — штанга; 7 — привод; 8 — узел уплотнения типа «кривой вал»



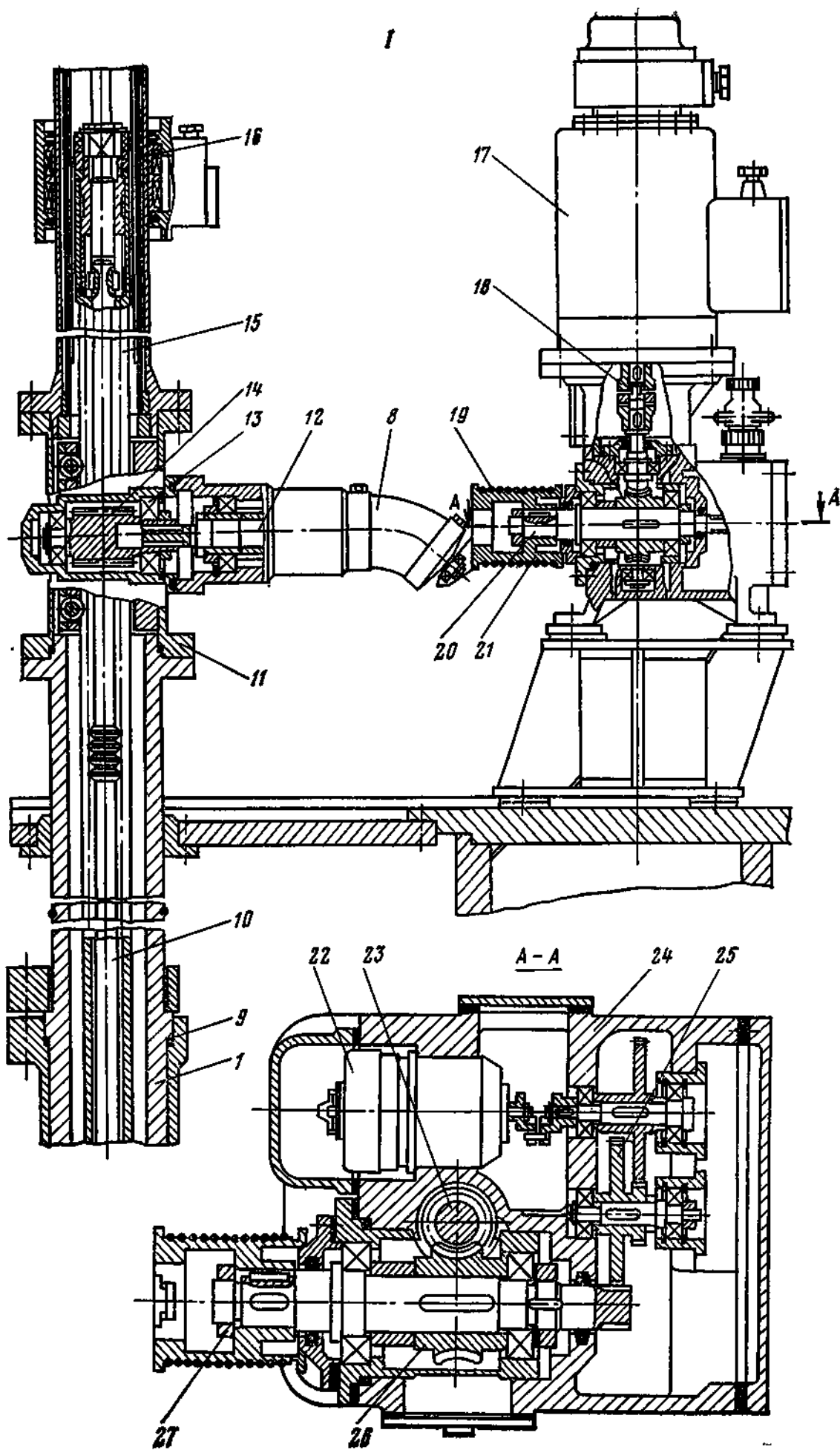


схема этого ИМ показана на рис. 3.24, а его конструкция на рис. 3.25—3.29.

Особенностью конструкции механизма РО реактора БН-600 является соосное расположение кинематических цепей приводов штанги и захватов.

Кинематическая цепь привода штанги включает в себя электродвигатель с тахогенератором, редуктор, торсионный вал, реечную передачу, штангу с захватами и датчик положения. Кинематическая цепь привода захватов включает в себя электродвигатель, редуктор, поворотную трубу, шток с наконечником и датчик импульсов. Привод штанги необходим для перемещения РО, а привод захватов служит для сцепления и расцепления штанги с РО.

Механизм снабжен датчиком положения РО, а также концевыми выключателями, вырабатывающими соответствующие сигналы о положении РО в крайних и промежуточных положениях и о сцеплении и расцеплении механизма с РО. Все узлы и детали ИМ работают в среде инертного газа первого контура реактора.

Конструктивное выполнение ИМ аварийной защиты и компенсации избыточной реактивности установок БН-350 и БН-600 в основном повторяет заложенные в этих механизмах конструктивные принципы электромеханической схемы. Отличие заключается в использовании расцепляющих и демпфирующих элементов в механизмах АЗ, обеспечивающих необходимую скорость перемещения аварийных РО при их сбросе и торможении. Подробно все эти конструкции рассматриваются в [14].

Рассмотренные электромеханические механизмы управления для реакторов на быстрых нейтронах основаны на традиционно используемых в машиностроении стандартных или нормализованных элементах и деталях машин, проверенных в нормальных условиях работы при длительной эксплуатации. Следует отметить также, что во время разработки этих механизмов еще не был накоплен в реакторостроении соответствующий опыт по созданию новых более перспективных технических средств, позволяющих значительно упростить кинематические схемы и габаритные размеры таких механизмов.

Повышение мощностей единичных блоков реакторов на быстрых нейтронах приведет к увеличению количества ИМ СУЗ, что потребует принципиально нового подхода к конструктивному формированию ИМ, обеспечивающего небольшие габаритные размеры и удобство обслуживания.

**Исполнительный механизм СУЗ реактора ВТГР.** В настоящее время в ряде стран ведутся работы по созданию и отработке вы-

Рис. 3.20. Выносной элемент I (см. рис. 3.19):

9 — прокладка; 10 — верхний шток; 11 — корпус реечного механизма; 12 — кривой вал; 13 — шарикоподшипник; 14 — реечная шестерня; 15 — рейка; 16 — никелевый сердечник; 17 — электродвигатель с тахогенератором; 18 — крестовая муфта; 19 — трос; 20 — выходной вал; 21 — барабан; 22 — датчик положения; 23 — червяк (входной вал); 24 — корпус редуктора; 25 — цилиндрическое колесо; 26 — червячное колесо; 27 — гайка

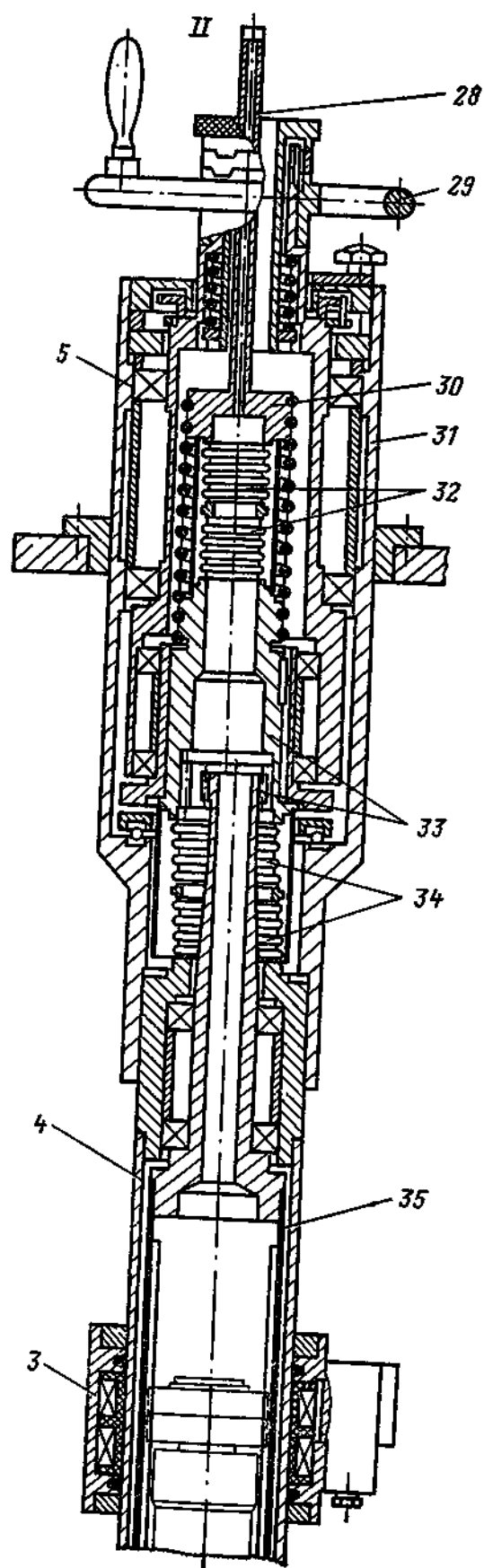


Рис. 3.21.

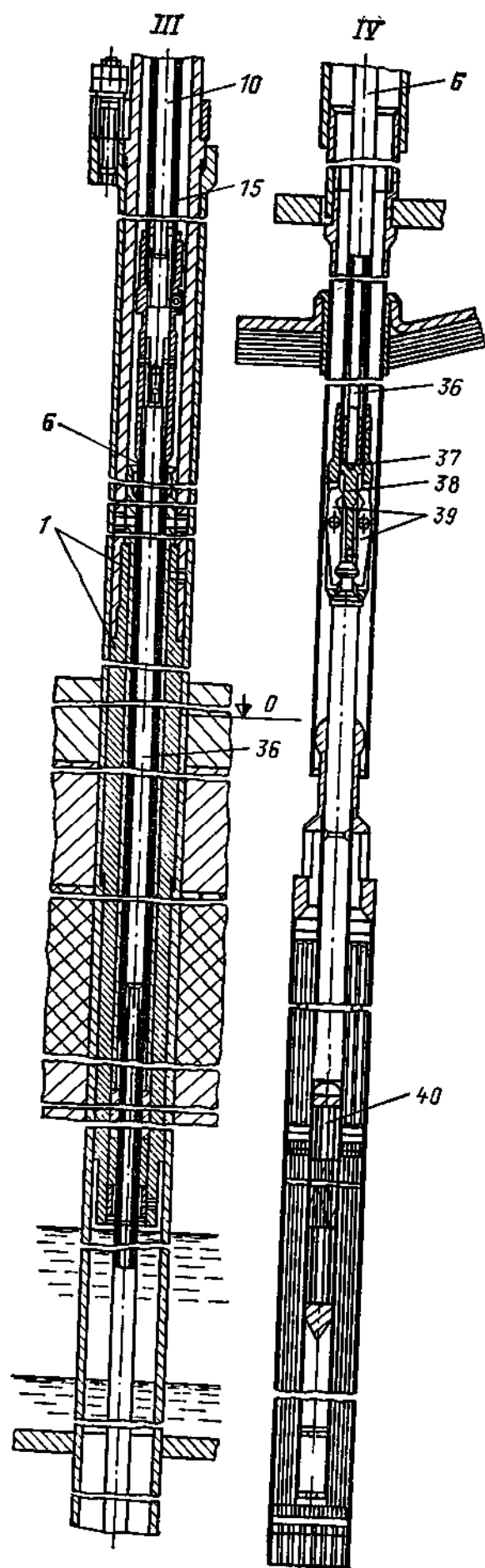


Рис. 3.22.

Рис. 3.21. Выносной элемент *II* (см. рис. 3.19); начало позиций на рис. 3.19 и 3.20:

28 — стержень «солдатик»; 29 — маховик; 30 — колпачок; 31 — корпус ручного привода; 32 — сильфоны колпачка; 33 — шестерни; 34 — сильфоны шестерни; 35 — поворотная труба

Рис. 3.22. Выносные элементы *III* и *IV* (см. рис. 3.19; начало позиций на рис. 3.19—3.21):

36 — нижний шток; 37 — наконечник штанги; 38 — наконечник штока; 39 — захваты; 40 — регулирующий орган

сокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с гелиевым теплоносителем. Активная зона таких реакторов представляет собой засыпку шаровых твэлов, внутри графитовой оболочки которых диспергировано ядерное топливо. Шаровая засыпка заключена в графитовом цилиндрическом отражателе. В нижней части она опирается на графитовый под конической формы с отверстиями для выгрузки твэлов.

Такие реакторы регулируются с помощью двух систем ИМ СУЗ, одна из которых включает в себя РО, расположенные в каналах графитового отражателя, вторая — РО, перемещаемые непосредственно в шаровой засыпке активной зоны. Так, например, регулирование реактора ТНТР-300 (ФРГ) осуществляется с помощью 36 РО, расположенных в каналах отражателя, и 42 РО, перемещаемых в шаровой засыпке [12]. Первая система РО используется для вывода реактора из подкритического состояния и для его остановки, вторая — для остановки реактора, удержания его в холодном подкритическом состоянии и компенсации изменений реактивности.

Конструкции ИМ, расположенных в отражателе, могут основываться на уже известных конструктивных решениях. Однако следует отметить специфическую особенность ВТГР с шаровыми твэлами: использование в качестве теплоносителя особо чистого гелия, находящегося при высоких давлении и температуре, и наличие графитовой пыли, которая является продуктом износа шаровых твэлов и оказывает на элементы конструкции абразивное воздействие. Кроме того, в среде особо чистого гелия материалы

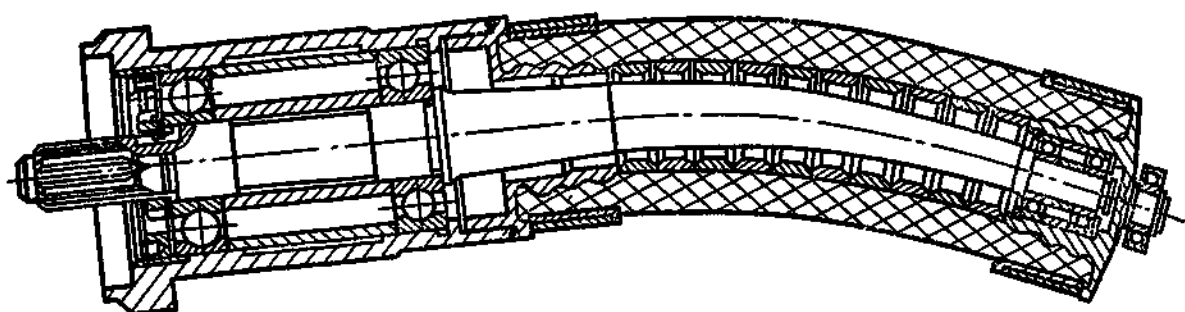


Рис. 3.23. Узел уплотнения при передаче вращательного движения с помощью кривого вала

Рис. 3.24. Кинематическая схема исполнительного механизма СУЗ реактора БН-600:

1 — нижний редуктор; 2 — коническое колесо; 3 — коническая шестерня; 4 — датчик положения; 5 — торсионный вал; 6 — верхний редуктор; 7, 8 — конические шестерни; 9 — червяк; 10 — червячное колесо; 11, 13 — электродвигатели; 12 — предохранительная муфта; 14 — шестерня; 15 — зубчатое колесо; 16 — редуктор; 17 — ротор; 18 — датчик импульсов; 19 — поворотная труба; 20 — рейка; 21 — реечная шестерня; 22 — штанга; 23 — наконечник штанги; 24 — захват

←

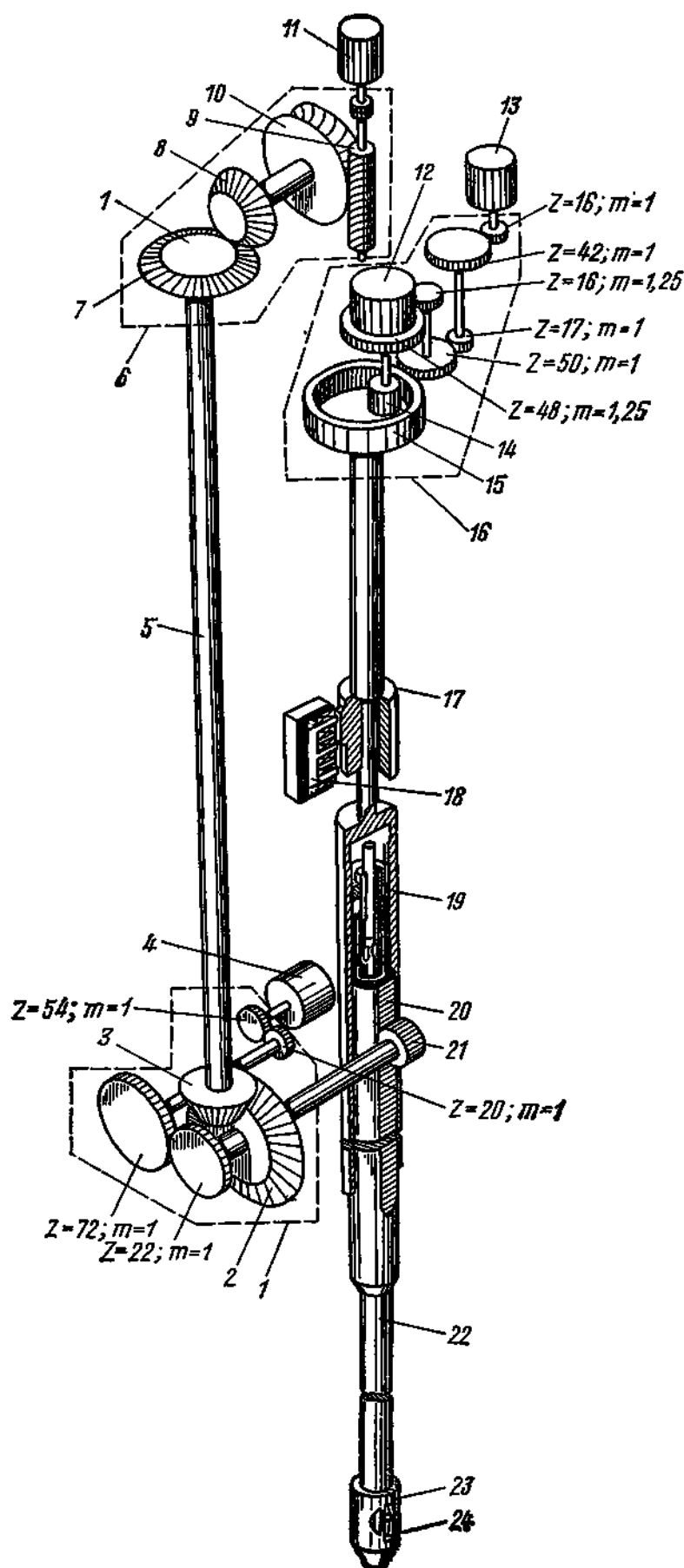


Рис. 3.25. Общий вид исполнительного механизма СУЗ реактора БН-600:

1 — исполнительный механизм; 2 — прокладка; 3 — кессонная труба

Рис. 3.26. Выносной элемент 1 (см. рис. 3.25):

4 — коническое колесо; 5 — верхний редуктор; 6 — изолятор; 7 — штепсельный разъем; 8 — электродвигатель; 9 — кулачковая муфта; 10 — переходник; 11 — вал; 12 — поводковая муфта; 13 — червяк; 14 — корпус; 15 — червячное колесо; 16 — вал-шестерня

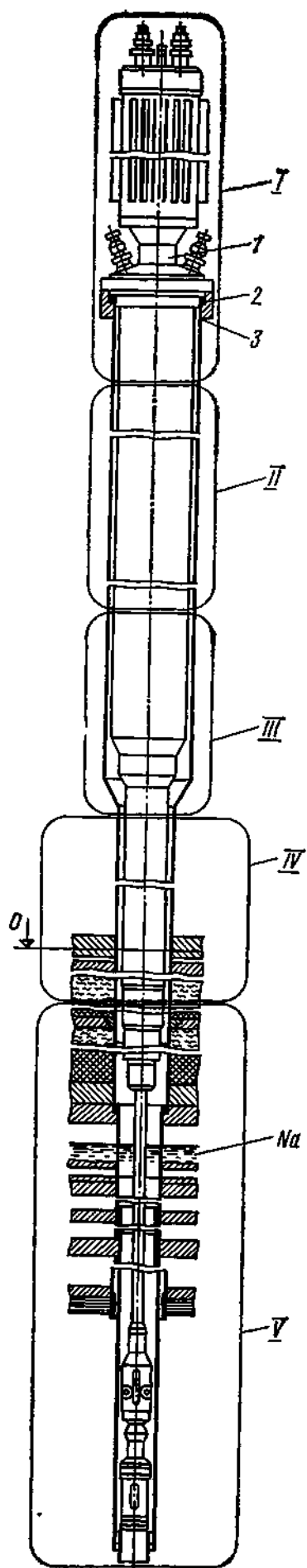


Рис. 3.25.

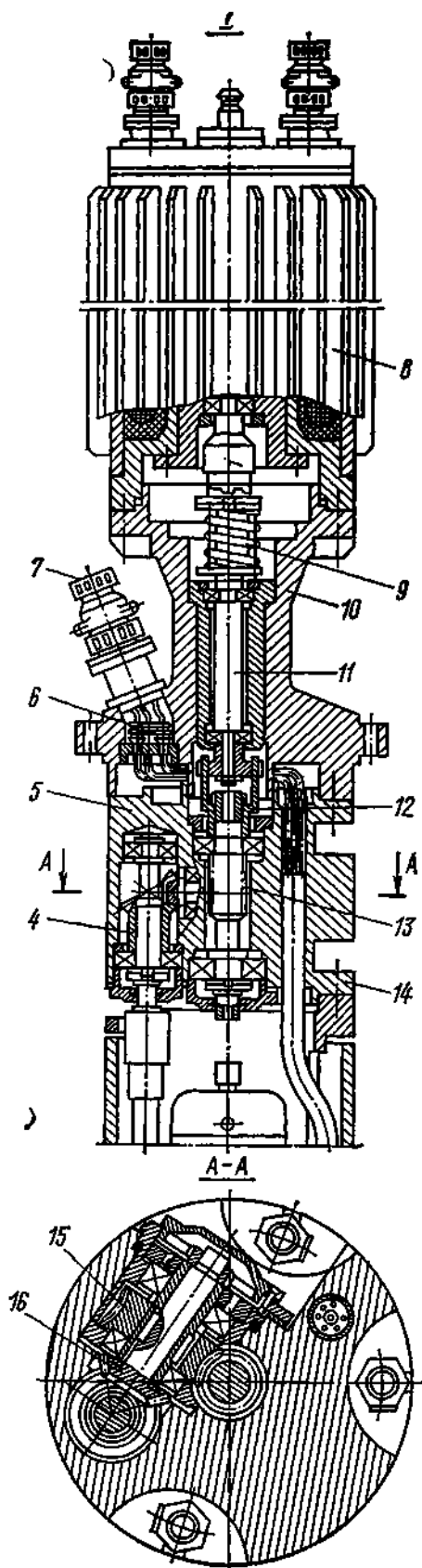


Рис. 3.26.

конструкций подвергаются самосвариваемости при разрушении окисной пленки, которая не восстанавливается. В связи с этим известные трудности представляет также выбор материала трущихся пар.

Эти специфические особенности ВТГР оказывают большое влияние на выбор электродвигателей для привода ИМ. Существующие в настоящее время электродвигатели с герметизирующей

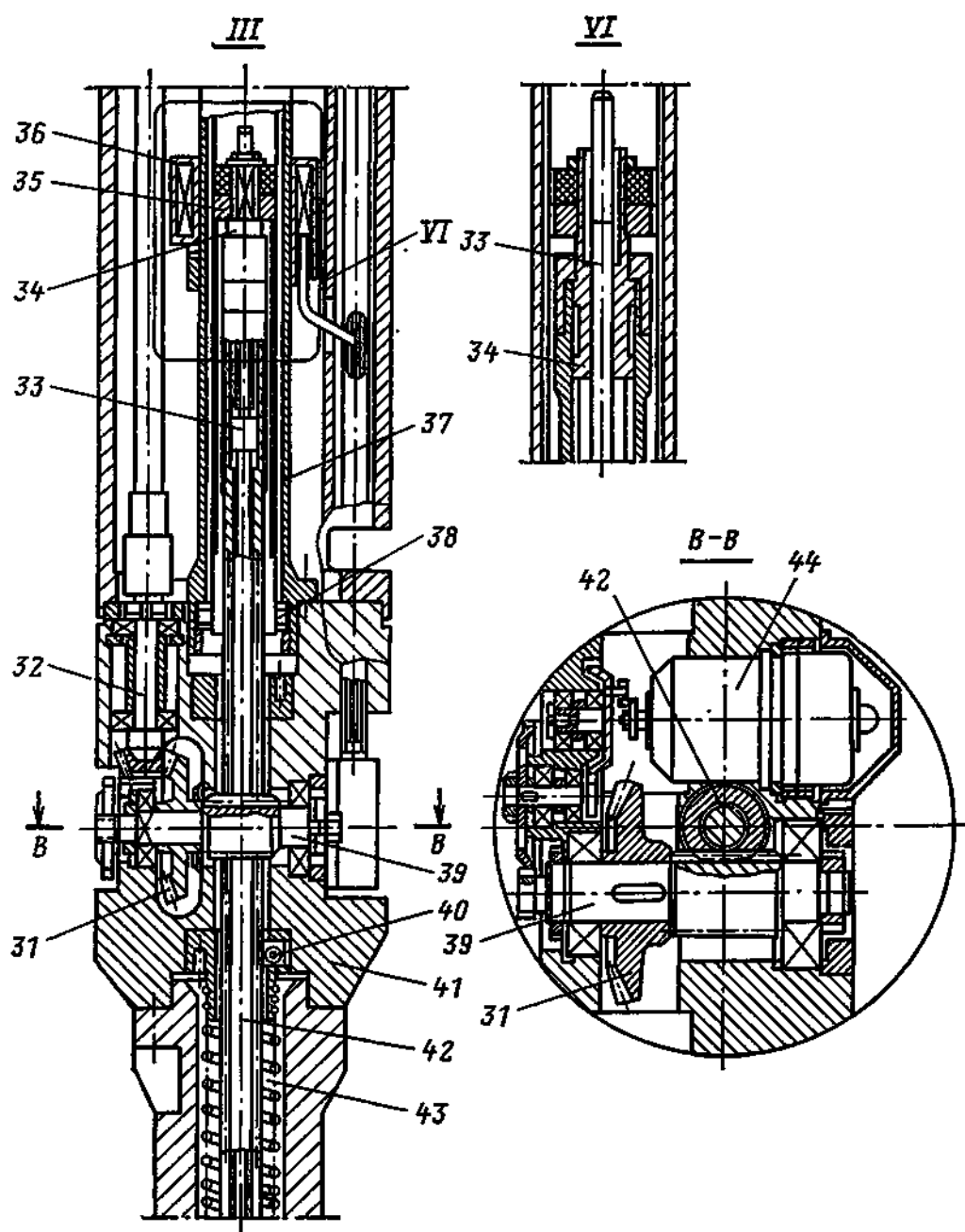


Рис. 3.27. Выносной элемент III (см. рис. 3.25; начало позиций на рис. 3.25, 3.26, 3.28)

31 — коническое колесо; 32 — вал-шестерня; 33 — верхний шток; 34 — гайка; 35 — сердечник; 36 — втулка; 37 — чехол с коническими индуктивными выключателями; 38 — подшипник; 39 — реечная вал-шестерня; 40 — обойма с роликами; 41 — нижний редуктор; 42 — рейка; 43 — демпфирующая пружина; 44 — датчик положения

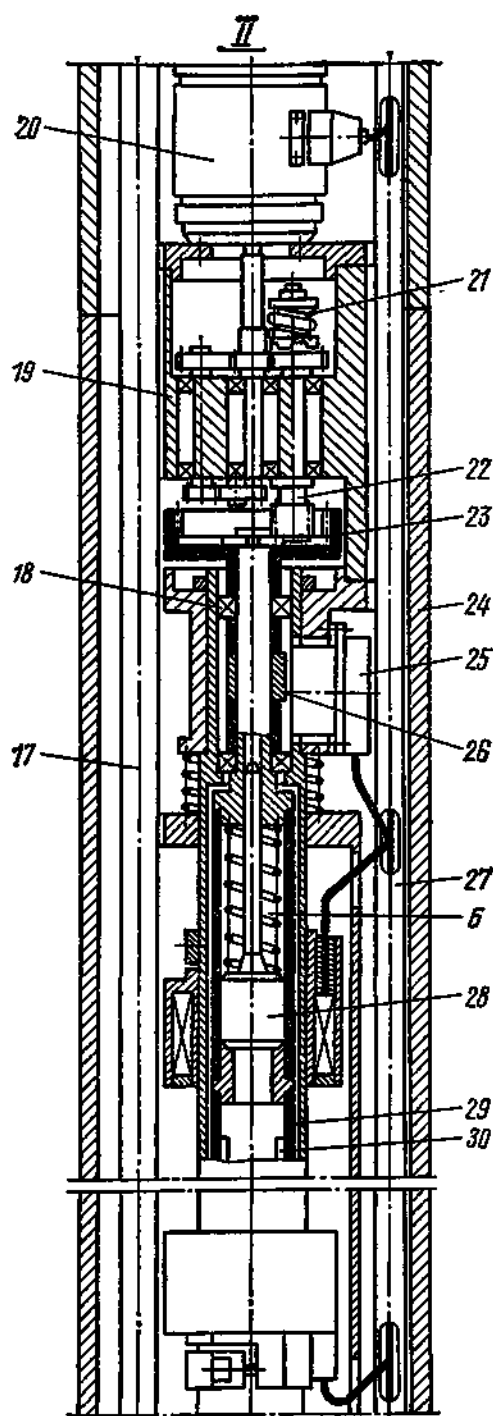


Рис. 3.28.

Рис. 3.28. Выносной элемент II (см. рис. 3.25; начало позиций на рис. 3.25 и 3.26):

17 — торсионный вал 18 — шарикоподшипник; 19 — редуктор; 20 — электродвигатель; 21 — предохранительная муфта; 22 — вал-шестерня; 23 — зубчатое колесо; 24 — труба; 25 — датчик импульсов; 26 — ротор; 27 — труба с приводом; 28 — сердечник; 29 — поворотная труба; 30 — шпонка

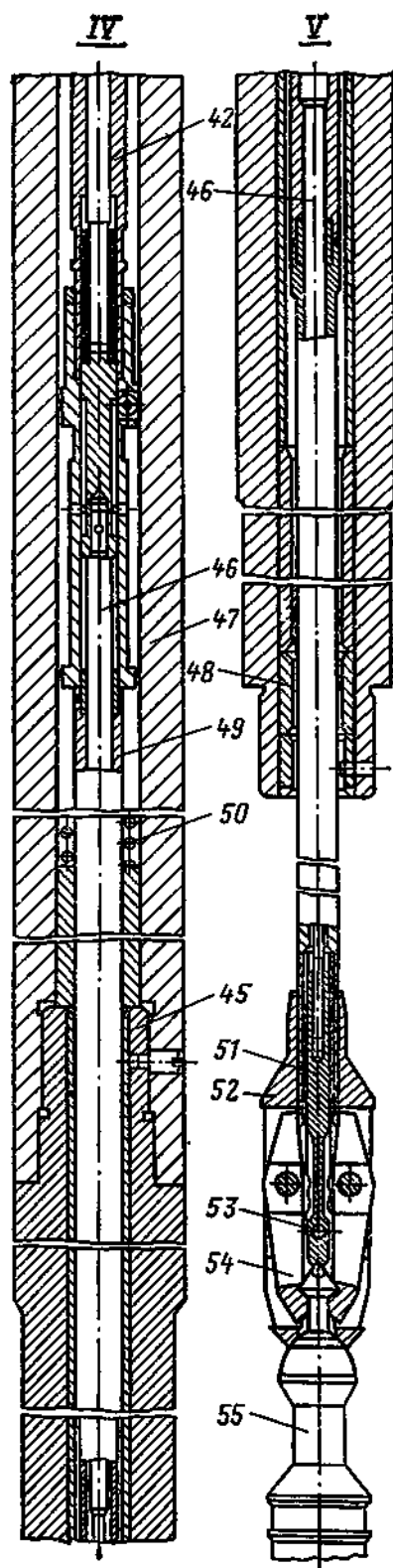


Рис. 3.29.

Рис. 3.29. Выносные элементы IV и V (см. рис. 3.25; начало позиций на рис. 3.25—3.28):

45 — вкладыш; 46 — нижний шток; 47 — защитная пробка; 48 — вкладыш; 49 — штанга; 50 — демпфирующая пружина; 51 — наконечник штока; 52 — наконечник штанги; 53 — палец; 54 — захват; 55 — регулирующий орган



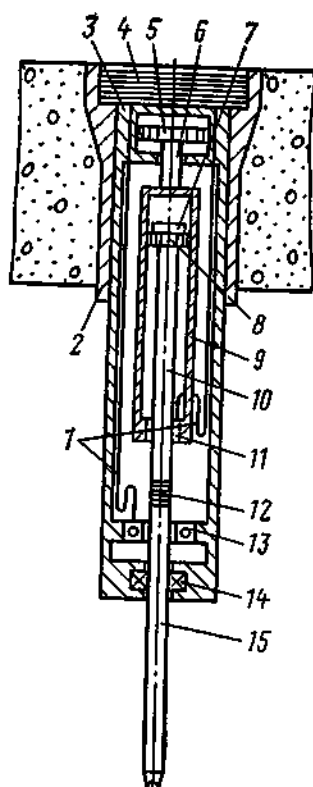


Рис. 3.30. Пневматический исполнительный механизм СУЗ реактора ТНТР-300

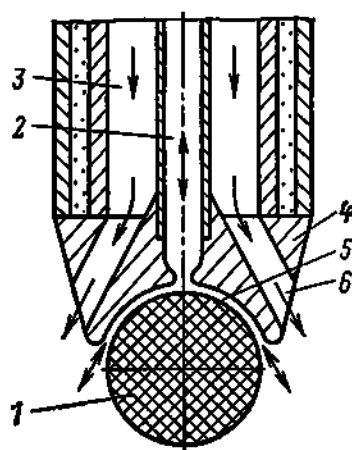


Рис. 3.31. Наконечник регулирующего органа с вогнутым углублением

оболочкой, отделяющей статор от ротора, или с герметичным прочным чехлом, в который заключены статор и ротор электродвигателя, требуют доработки, отвечающей отмеченным выше специфическим условиям эксплуатации.

Гораздо более сложную техническую проблему представляет собой создание ИМ для перемещения РО непосредственно в шаровой засыпке активной зоны. Это объясняется следующими факторами. При введении РО в активную зону возникают значительные усилия, которые зависят от плотности засыпки и могут достигать примерно 100 кН. Плотность засыпки не является постоянной и при введении каждого РО увеличивается. Кроме того, вводимый в засыпку РО может испытывать значительные изгибающие моменты. Для уменьшения усилий при введении РО принципиальное значение имеет выбор его геометрии, исключающей или сводящей к минимуму повреждение шаровых твэлов.

**Пневматические механизмы СУЗ.** Стремление упростить конструкции ИМ и избежать многих проблем, связанных с отработкой механических элементов конструкций, работающих в среде гелия, привело к созданию конструкций, в которых для перемещения РО используется усилие, создаваемое сжатым гелием. Сжатый гелий воздействует на систему поршневого типа с поступательным перемещением штока или цилиндра без вращательного движения РО.

Одна из конструкций с пневматическим поршневым ИМ для РО реактора ТНТР-300 показана на рис. 3.30. В корпусе 2 установлена гильза 3, в которой размещены два пневмоцилиндра: с длинноходовым поршнем 8 для быстрого ввода РО 15 в шаро-

вую засыпку активной зоны и короткоходовым (шаговым) поршнем 5. Пневмоцилиндр с длинноходовым поршнем необходим для обеспечения ядерной безопасности реактора. С его помощью РО быстро вводится в шаровую засыпку и перемещается в ней непрерывно. Шток 10 длинноходового поршня в нижней части выполнен так, что РО может там сцепляться или расцепляться. В нижней части корпуса ИМ находится транспортное устройство 11, блокирующее устройство 13 и нижний центрирующий подшипник 14.

Исполнительный механизм СУЗ работает следующим образом. Через клапанный блок 4 гелий под давлением 13 МПа поступает в пространство над длинноходовым поршнем 8, и поршень, соединенный со стержнем 15, перемещается вниз. Положение РО определяется датчиком по положению магнитной головки 7, укрепленной на длинноходовом поршне 8. Ход РО по высоте активной зоны реактора может составлять 3,2—5,27 м. Максимальное перемещение длинноходового поршня 5,6 м, а максимальное время перемещения 90 с. Температура поршня 40 °С в верхнем положении и 280 °С в крайнем нижнем положении. Короткоходовой поршень 5 перемещает РО шагами по 50 мм. Шток 6 поршня соединен с пневмоцилиндром 9 длинноходового поршня 8, который непосредственно связан с РО при помощи муфты 12. Для перемещения РО 15 на один шаг гелий из клапанного блока 4 подается в пространство над поршнем 5 и к транспортному устройству 11 по гибким шлангам 1, а давление с блокирующего устройства 13 сбрасывается. Поршень 5 перемещается на 50 мм вниз, когда давление гелия на верхнюю плоскость поршня 5 примерно 8 МПа. При давлении гелия в системе, равном 8 МПа, блокирующее устройство 13 сцепляется с РО, транспортное устройство освобождает РО за то же время, за которое освобождается объем в верхней части поршня. Давление гелия, поданное к нижней плоскости поршня 6 (8 МПа), перемещает шток поршня 6 и соединенный с ним пневмоцилиндр 9 в исходное положение. Аналогично РО извлекается из шаровой засыпки активной зоны, т. е. шагами по 50 мм — один шаг за 9 с. Рабочая температура поршня 6 40 °С.

Разработка конструкции пневмопривода РО потребовала большой экспериментальной проверки элементов ИМ, которые рассмотрены ниже.

Для уменьшения трения между наконечником РО и твэлами в системах с поступательным перемещением регулирующих органов используется конструкция наконечника, показанная на рис. 3.31. Наконечник имеет углубление с радиусом кривизны, равным радиусу шарового твэла, благодаря чему твэл захватывается в самом начале перемещения РО. При извлечении РО твэл удерживается газовым потоком, имеющим большую скорость, через одно или несколько отверстий в углублении наконечника РО. В кольцевой щели между поверхностью углубления и твэлом создается разрежение, которое надежно удерживает твэл в этом

положении. Эксперименты показали, что газовая струя с расходом всего в несколько десятков литров в секунду достаточна для удержания на конце РО шарового твэла диаметром 60 мм и массой примерно 200 г. Внутреннюю поверхность углубления, предназначенного для захвата твэла, желательно изготавливать из материала, который обеспечивает минимальное трение между захваченным твэлом и нижней частью наконечника РО. При возникновении касательных нагрузок от других твэлов засыпки захваченный твэл может вращаться более свободно, благодаря чему абразивный износ между ним и другими твэлами будет сведен к минимуму. Дальнейшее уменьшение трения может быть достигнуто путем подачи смазки через трубопровод и выходные отверстия, предусмотренные для этой цели. Смазку можно ввести в поток газа, который удерживает шаровой твэл. В качестве газообразной смазки используются  $\text{NH}_3$  или  $\text{CO}_2$ . Смазка в 2,5 раза уменьшает усилие введения РО в шаровую засыпку.

Подача газа через РО используется также для их охлаждения. В тех случаях, когда РО не охлаждаются, требуются высокопрочные стали, механические свойства которых сохраняются при высокой температуре. В конструкции РО, показанной на рис. 3.31, через предусмотренные каналы может подаваться холодный гелий для охлаждения РО как при нормальных режимах эксплуатации реактора, так и в аварийных ситуациях.

В качестве поглотителя в РО, как правило, используется материал на основе  $\text{B}_4\text{C}$ , который отвечает требованиям температурных условий работы ВТГР. Поглотитель обычно располагается в межтрубном пространстве по периферии РО, а центральная часть РО освобождается для подачи охлаждающего газа или смазки. Технология заполнения межтрубного пространства поглотителем может быть различной.

Конструкцию РО для ТНТР-300 длительное время отрабатывали, чтобы найти оптимальное решение с учетом подачи охлаждающего газа или смазки. Одна из конструкций предусматривает подачу газа через внутреннюю часть РО большого диаметра. Другой вариант конструкции РО показан на рис. 3.31. Как видно, она является более совершенной, так как предусматривает регулируемую подачу газа через центральный канал для удержания твэла в наконечнике РО. Для удержания твэла 1 в вогнутом углублении наконечника 4, когда РО перемещается вверх, необходимо, чтобы вогнутое углубление имело отверстие, через которое охлаждающий газ 2 проходит кольцевой зазор 5 между твэлом 1 и наконечником 4 и создает в нем разрежение, удерживающее твэл в углублении. Необходимо отметить, что не весь поток охлаждающего газа выходит в зазор: часть поступает в канал 3 для охлаждения РО.

Управляющий клапан (на рис. не показан) для регулирования потока охлаждающего газа может быть расположен в РО. Газ в процессе ввода и в состоянии покоя РО выходит через отверстия 6 и только в процессе извлечения — через кольцевой зазор

5 в вогнутом наконечнике 4. Таким образом, благодаря меньшему гидравлическому сопротивлению в отверстиях 6 для охлаждающего газа можно получить большую скорость его потока, а следовательно, лучшее охлаждение РО.

Одно из необходимых условий работы ИМ, показанного на рис. 3.30, — наличие поршней и газоплотной стенки пневмоцилиндра. Различие между поршнями: длинноходовой поршень работает при температуре до  $280^{\circ}\text{C}$ , но с относительно низкой циклическостью, равной  $10^3$ , шаговый — при  $40^{\circ}\text{C}$ , но с высокой циклическостью, равной  $10^5$ . Для уплотнения поршней в пневмоцилиндре используются поршневые кольца, материал и компоновка которых были подобраны оптимальными.

### 3.3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СУЗ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

Первые исследовательские реакторы в СССР были созданы для исследований по ядерной физике, связанных с разработкой промышленных реакторов. В дальнейшем они стали использоваться и в реакторной технологии для получения радиоактивных изотопов и других целей. Они сыграли важную роль в развитии ядерной энергетики, обеспечив отработку в полях излучений элементов конструкции реакторов, главным образом твэлов.

Особенностью исследовательских реакторов является использование петлевых и других каналов для облучения образцов в активной зоне. Наличие этих каналов накладывает определенные требования на конструкцию ИМ в отношении их расположения и габаритных размеров. Расположение механизмов на реакторе и их габаритные размеры не должны мешать установке экспериментальных каналов, оборудования и приборов для проведения разнообразных исследований, связанных с установкой различных облучаемых образцов в активную зону и с перегрузкой топливных кассет. При этом должны надежно обеспечиваться требования, связанные с регулированием реактора и обеспечением его ядерной безопасности. Ниже рассматриваются наиболее характерные механизмы исследовательских реакторов.

**Исполнительный механизм СУЗ КС — АЗ реактора МИР.** Металловедческий исследовательский реактор МИР пущен в декабре 1966 г. в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (г. Димитровград). Продольный разрез реактора показан на рис. 3.32.

Разборная кладка активной зоны высотой 1 м образуется из шестигранных бериллиевых блоков с центральными отверстиями, в которых устанавливаются рабочие и петлевые каналы. В рабочие каналы загружаются тепловыделяющие сборки, охлаждаемые водой под давлением, которая двигается в канале сверху вниз. Бериллиевые и графитовые блоки активной зоны и отражателя охлаждаются водой бассейна, циркулирующей в отдельном контуре.

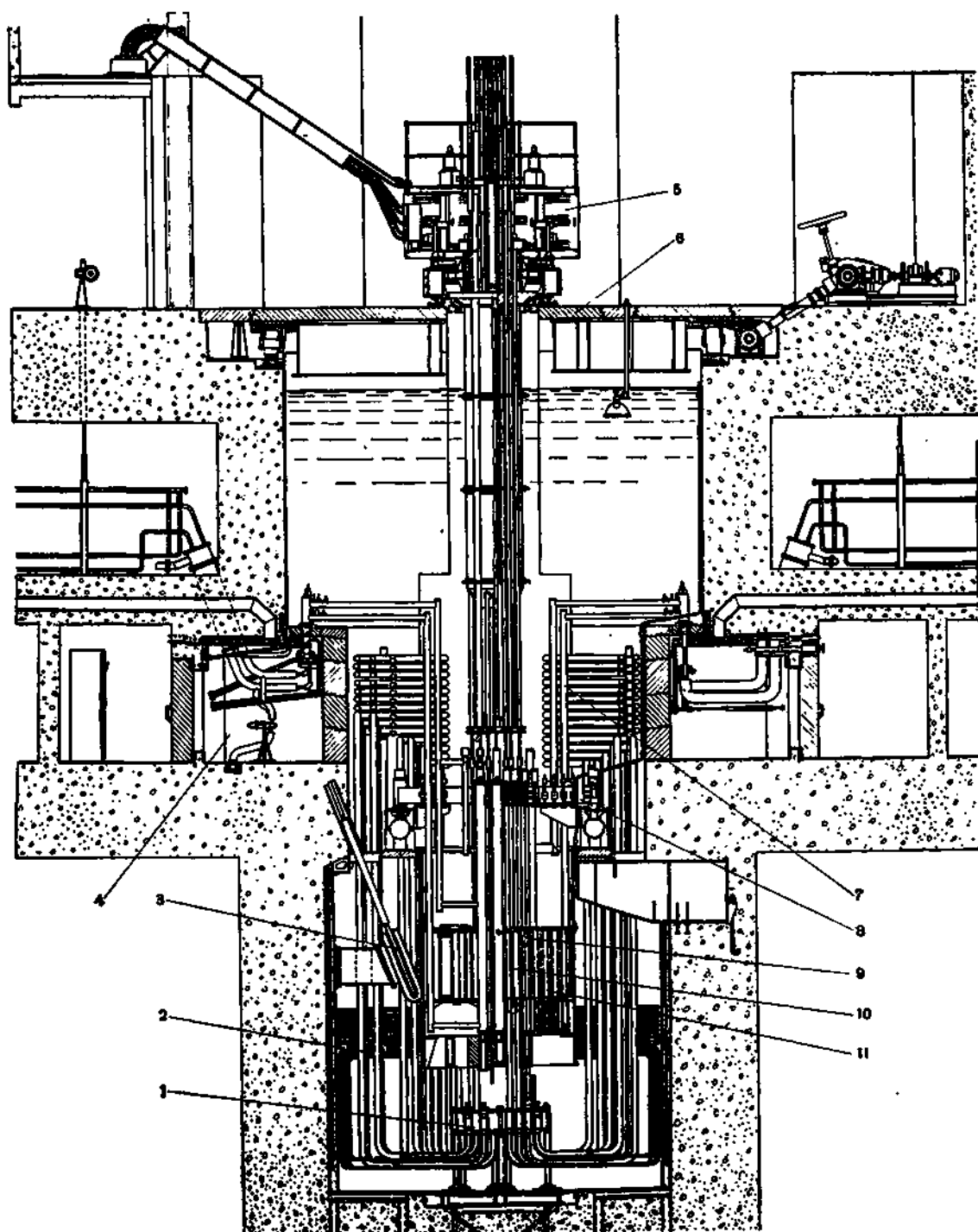


Рис. 3.32. Продольный разрез реактора МИР:

1 — узел нижних уплотнений; 2 — трубопроводы отвода теплоносителя от каналов; 3 — подвижная ионизационная камера; 4 — камера с оборудованием для подсоединения петлевых каналов к контурам охлаждения; 5 — передвижная тележка с приводами СУЗ и подвижных ТВЭЛов; 6 — поворотные плиты верхней защиты; 7 — петлевой канал; 8 — коллекторы для подвода теплоносителя; 9 — рабочий канал с подвижной тепловыделяющей сборкой; 10 — рабочий канал; 11 — блоки кладки активной зоны и отражателя

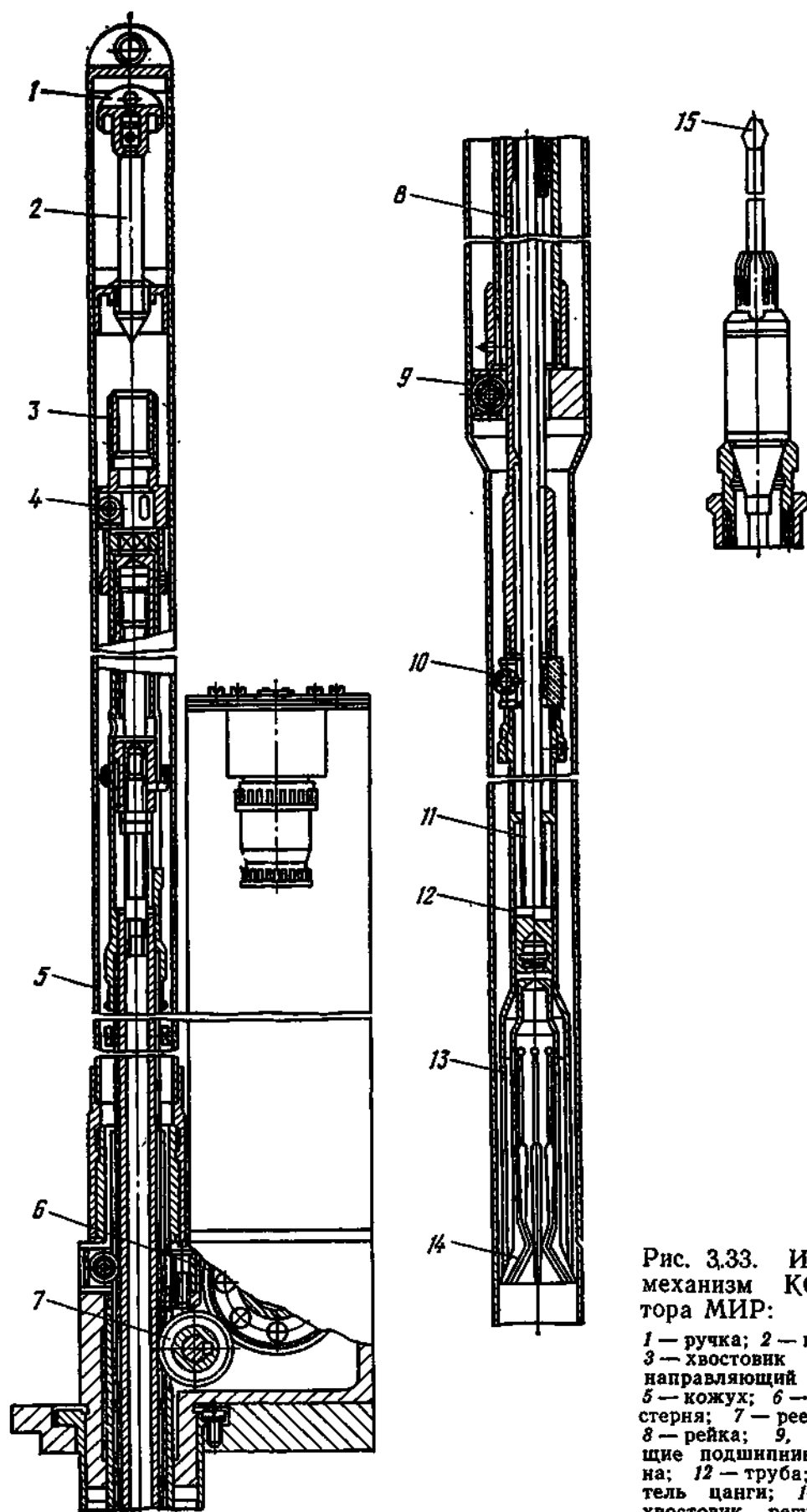
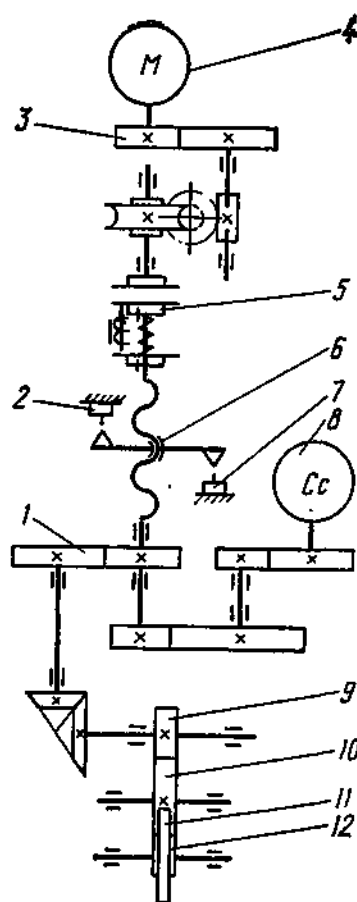


Рис. 3.33. Исполнительный механизм КС—А3 реактора МИР:

1 — ручка; 2 — крепежный болт; 3 — хвостовик с резьбой; 4 — направляющий подшипник; 5 — кожух; 6 — паразитная шестерня; 7 — реечная шестерня; 8 — рейка; 9, 10 — направляющие подшипники; 11 — пружина; 12 — труба; 13 — ограничитель цанги; 14 — цанга; 15 — хвостовик регулирующего органа

Рис. 3.34. Кинематическая схема исполнительного механизма КС — АЗ реактора МИР



Между блоками кладки установлены каналы с РО. В части рабочих каналов устанавливаются подвижные ТВС, которые вместе с компенсирующими ОР используются для регулирования и поддержания режимов испытания опытных твэлов в петлевых каналах. Приводы подвижных сборок и РО размещены на передвижной двухэтажной тележке, откатывающейся при проведении перегрузочных работ, производимых специальными машинами. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в активной зоне реактора МИР составляет  $5 \cdot 10^{14}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с).

Максимальная плотность потока быстрых нейтронов в реакторе ( $E > 0,5$  мэВ) равна  $5,5 \cdot 10^{14}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с).

Общий вид ИМ показан на рис. 3.33. Сцепление и расцепление механизма с РО производятся с помощью цангового захвата. Раскрытие цанги осуществляется при снятом кожухе специальным ключом.

После расцепления с РО цанга сжимается и убирается в канал, установленный на тележке СУЗ. Рейка поднимается приводом в крайнее верхнее положение и удерживается в нем винтовым захватом. После этого электрические соединители отсоединяются от приводов КС—АЗ и тележка СУЗ отводится от реактора, освобождая место для проведения перегрузочных операций. Сцепление с органом РО производится в обратной последовательности.

Кинематическая схема ИМ показана на рис. 3.34. Электродвигатель 4 через шестеренчатый и червячный понижающий редуктор 3 и электромагнитную муфту 5 передает вращение винту, по которому может перемещаться гайка 6. Далее от винта через редуктор 1 вращение передается сельсину-датчику 8 и шестерне 9, которая через промежуточную шестерню 10 приводит во вращение реечную шестерню 12, связанную с рейкой 11, к которой крепится узел цангового захвата с РО. В крайних положениях РО от упоров на гайке 6 срабатывают концевые выключатели 2 и 7 и отключают двигатель. Регулирующий орган при включенной электромагнитной муфте 5 удерживается в заданном положении само тормозящей передачей 3, предотвращающей вращение реечной шестерни.

При возникновении аварийных условий электромагнитная фрикционная муфта обесточивается, фрикционные диски расходятся и подвижная часть механизма падает в активную зону, рас-

кручивая передачу привода. В конце пути РО гайка воздействует через пружину на фрикционные диски муфты, вызывая торможение подвижной системы. Конструкция привода исполнительного механизма КС — АЗ приведена на рис. 3.35.

Такие приводы получили распространение на исследовательских реакторах, где не требуется герметизация механизма. Они надежно обеспечивают работу в режимах компенсации реактивности и аварийной защиты и могут в процессе эксплуатации заменяться и ремонтироваться. Основными недостатками таких механизмов являются их довольно сложная кинематика, износ деталей, потребность в смазке передач. Ввиду большого передаточного отношения понижающего редуктора их не всегда можно использовать в режиме автоматического регулирования, особенно когда требуется обеспечить значительные скорости перемещения РО. Засорение продуктами износа фрикционных дисков или попадание на них смазки изменяет зону торможения РО. Однако при регулярном обслуживании эти механизмы обеспечивают выполнение заданных функций в системе регулирования реактора.

**Исполнительный механизм КС реактора СМ-2.** Реактор СМ-2 является первым в мире исследовательским реактором, работающим на промежуточных нейтронах. Реактор предназначен для получения трансурановых элементов, а также для проведения материаловедческих и физических исследований [6]. Общий вид реактора представлен на рис. 3.36. Активная зона реактора образована из 28 ТВС сечением  $70 \times 70$  мм с пластинчатыми твэлами, установленными в корпусе реактора. Вода, циркулирующая сверху вниз в зазорах твэлов, служит одновременно теплоносителем и замедлителем.

В системе управления и аварийной защиты реактора предусмотрены два автоматических регулятора АР, четыре механизма компенсации реактивности КС и четыре механизма аварийной защиты АЗ. На реакторе СМ-2 используются механизмы КС электромагнитного типа, механизмы АР электромеханического типа и механизмы АЗ гидравлического типа. ИМ КС наряду с компенсацией реактивности могут также выполнять функции аварийной защиты.

Условия эксплуатации ИМ следующие: теплоноситель — дистиллированная вода, температура теплоносителя  $100^\circ\text{C}$ ; давление теплоносителя 50 МПа; температура окружающего воздуха над крышкой реактора  $40^\circ\text{C}$ ; относительная влажность воздуха над крышкой реактора 98 %; плотность потока тепловых нейтронов в активной зоне  $2 \cdot 10^{15}$  нейтр/(см<sup>2</sup>·с); ход РО 400 мм; максимальный диаметр механизмов, устанавливаемых на патрубке крышки реактора, не должен превышать 120 мм.

С конструктивной точки зрения наибольший интерес представляет механизм КС реактора СМ-2, показанный на рис. 3.37. Механизм состоит из РО 1, содержащего поглощающую нейтроны трубку из кадмия, очехлованную оболочкой из нержавеющей стали. РО 1 с помощью штанги 2 соединяется с нижним сердечни-



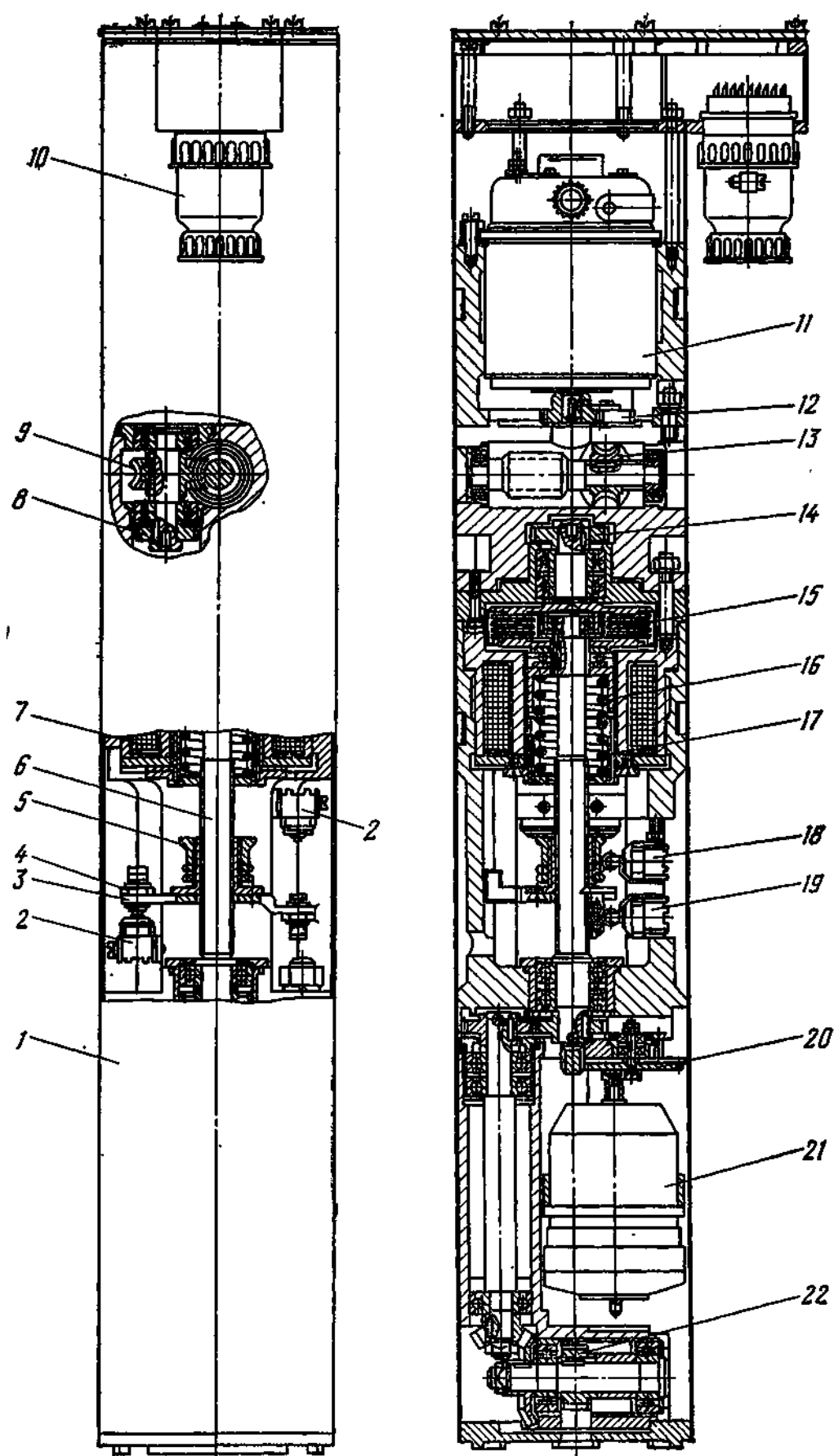


Рис. 3.35. Привод КС — АЗ реактора МИР:

1 — кожух; 2 — нижний и верхний концевые выключатели; 3 — пластина; 4 — подпружиненный упор; 5 — гайка; 6 — винт; 7 — электромагнит; 8, 12, 14 — шестерни; 9, 13 — червячные пары; 10 — электрический соединитель; 11 — электродвигатель; 15 — фрикционная муфта; 16 — пружина сцепления; 17 — пружина торможения; 18, 19 — промежуточные переключатели (30 и 70 % хода регулирующего органа; 20 — понижающая передача; 21 — сельсин-датчик; 22 — приводная шестерня

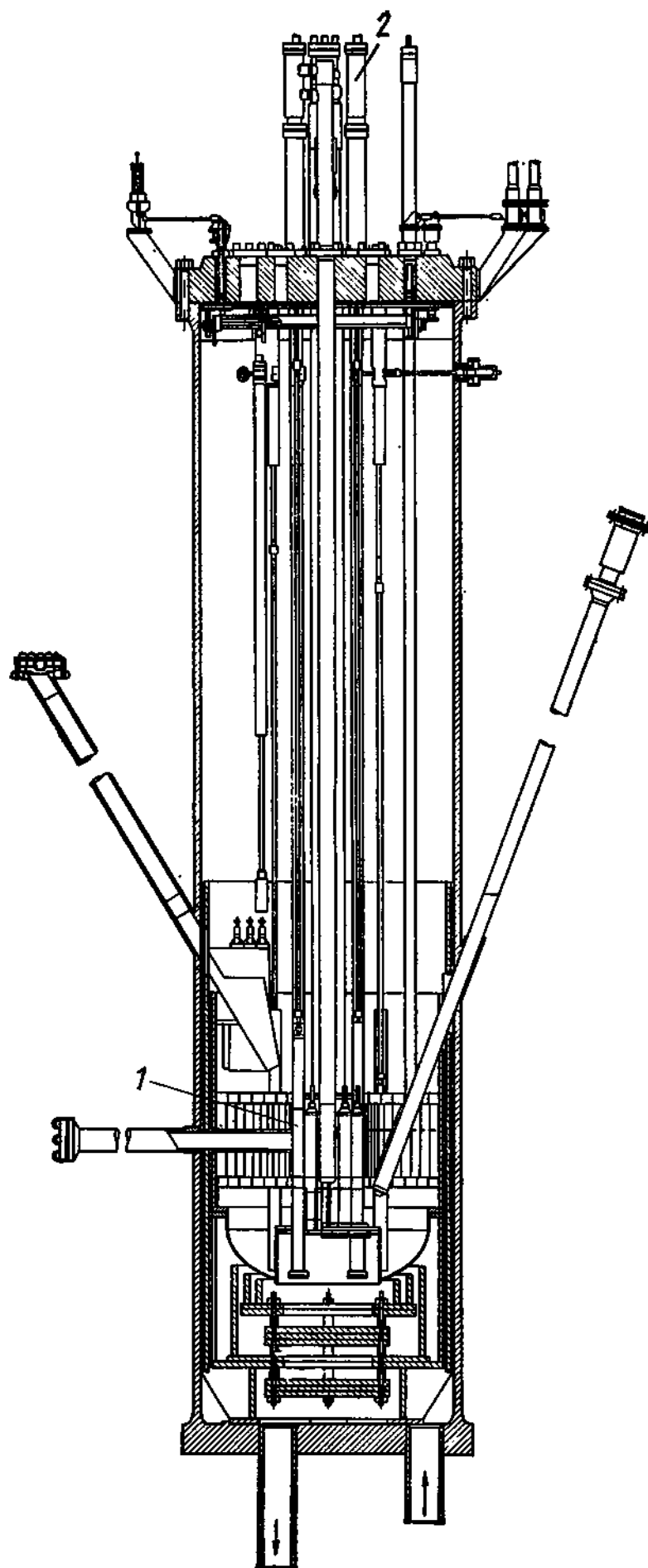
ком 8 электромагнитной системы захвата и сигнализации 3. В крайнем положении нижний сердечник 8 опирается на гидравлический демпфер 9 и может сцепляться магнитным полем с верхним сердечником электромагнитной системы, который в свою очередь шарнирно связан с винтом шариковой винтовой пары 11. Гайка винтовой пары жестко укреплена на роторе 10 шагового электродвигателя 4. На верхний конец ротора шагового электродвигателя насажена полумуфта герметичной магнитной муфты 12. Магнитная муфта 12 имеет ротор, на валу которого находится постоянный магнит, неподвижную герметичную оболочку из нержавеющей стали и полумуфту с постоянным магнитом, насаженную на ротор электродвигателя. Ротор магнитной муфты соединен с датчиком положения 5 компенсирующего РО. Датчик положения имеет понижающий редуктор 6, выходной вал которого связан с сельсином 7.

Исполнительный механизм КС работает следующим образом. В крайнем нижнем положении РО 1, когда нижний 8 и верхний сердечники также находятся в крайнем нижнем положении, подается напряжение на электромагнит системы захвата 3, и оба сердечника сцепляются магнитным полем. При подаче импульсов управления на шаговый электродвигатель 4 ротор двигателя 10 приводит во вращение шариковую гайку винтовой пары. Винт 11, связанный с сердечниками, вследствие этого может перемещать компенсирующий РО 1. Вращение от ротора двигателя через герметичную магнитную муфту 12 и редуктор 6 датчика положения 5 передается валу сельсина-датчика 7, электрически связанного с сельсином-приемником, расположенным на пульте оператора, управляющего реактором. Ротор сельсина-приемника, поворачиваясь на угол, пропорциональный ходу РО, с помощью стрелочного прибора показывает положение РО в активной зоне реактора. За полный ход РО сельсин-датчик поворачивается на угол, меньший 360°. Это позволяет в случае нарушения электропитания в системе индикации положения РО после восстановления питания точно установить, где находится РО.

В случае возникновения аварийной ситуации электромагнит системы захвата обесточивается, верхний и нижний сердечники расцепляются и РО под действием силы тяжести падает в активную зону реактора. Кинетическая энергия, накопленная подвижной системой при падении, поглощается гидравлическим демпфером 9. По достижении РО крайнего нижнего положения подается сигнал конечным индуктивным выключателем, смонтированным в

Рис. 3.36. Реактор  
СМ-2:

1 — регулирующие орга-  
ны; 2 — исполнительные  
механизмы СУЗ



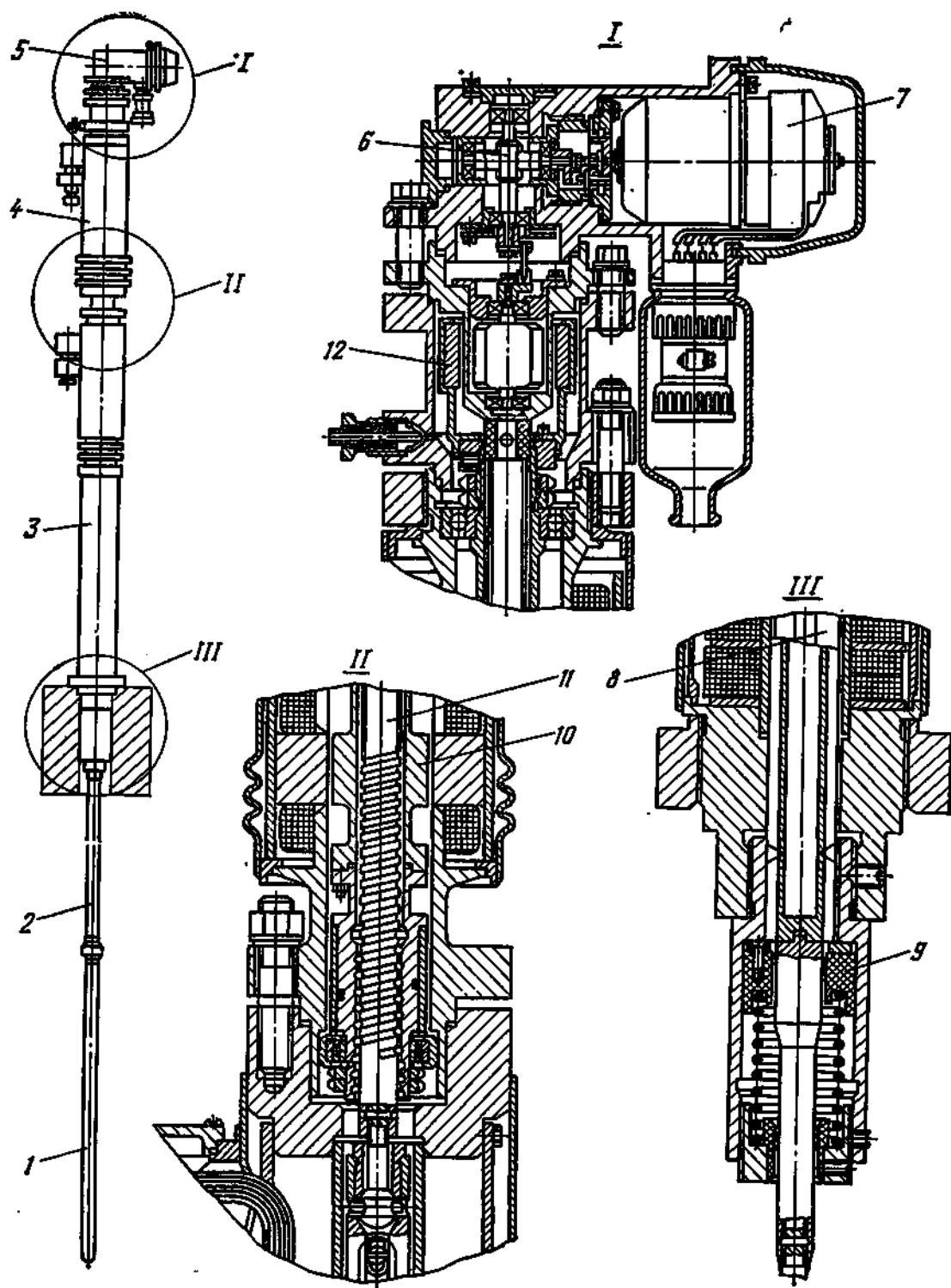


Рис. 3.37. Исполнительный механизм СУЗ реактора СМ-2

нижней части системы захвата 3. Такой же индуктивный выключатель подает сигнал о достижении РО крайнего верхнего положения.

Рассмотрим теперь, в какой степени ИМ удовлетворяет основным эксплуатационным требованиям. Механизм обеспечивает перемещение подвижной системы с РО общей массой до 70 кг.

Изменение реактивности производится дискретно, при этом каждому шагу двигателя соответствует допустимое изменение реактивности, не превышающее 0,001 %. Скорость перемещения РО 1,25 мм/с.

Для обеспечения ядерной безопасности необходимо в первую очередь обеспечить систему компенсации реактивности таким устройством, которое при любых обстоятельствах не могло бы развить скорость больше допустимой. Применение в механизме КС шагового электродвигателя позволяет задать минимальную скорость изменения реактивности. Это достигается тем, что импульсы управления, подаваемые на шаговый двигатель генератором импульсов, обеспечивают перемещение компенсирующего РО на строго определенное расстояние. Повторять импульсы можно с любым интервалом. Причем по верхней частоте импульсов шаговый двигатель имеет так называемое энергетическое ограничение, т. е. при определенной, заранее заданной наибольшей скорости двигателя не будет создавать момент, необходимый для перемещения РО.

Исполнительный механизм обеспечивает и другое обязательное требование ядерной безопасности, заключающееся в том, что при любых нарушениях в узлах механизма или источниках питания компенсирующий РО должен перемещаться в сторону увеличения отрицательной реактивности. В рассматриваемой конструкции это требование выполняется расцеплением компенсирующего РО с механизмом при обесточивании электромагнита системы захвата и самоходом винта, перемещаемого вниз при обесточивании обмоток управления шагового электродвигателя. Надежность освобождения компенсирующего РО достигается в конструкции расцеплением при обесточивании системы захвата верхнего и нижнего сердечников, которые удерживаются в сцепленном положении только силами электромагнитного поля. Важнейший вопрос при разработке механизма — обеспечение требования ядерной безопасности по предотвращению разгерметизации первого контура реактора. В данном случае это требование обеспечивается тем, что полюса статора шагового электродвигателя вварены в прочный корпус из немагнитной нержавеющей стали. Кроме того, на случай появления дефектов в сварных швах в расточку статора помещена тонкостенная рубашка толщиной 0,4 мм из нержавеющей немагнитной стали, надежно герметизирующая внутреннюю полость шагового двигателя, находящуюся под давлением первого контура реактора.

Механизм КС эксплуатируется на реакторе СМ-2 около 25 лет. В процессе эксплуатации 1 раз в месяц производятся его наружный осмотр и проверка сопротивлений изоляции электротехнических узлов. Демонтаж, разборка и промывка механизмов производятся 1 раз в 1—3 года, в основном для очистки шариковой винтовой пары.

Механизм защищен от воздействия внешних факторов путем заключения всех элементов, которые могут быть подвержены дей-

ствию этих факторов, в герметичные кожуха из нержавеющей антикоррозионных сталей. Попадание влаги в штепсельные разъемы предотвращается установкой на кабельные вводы кожухов из теплостойкой резины. Опыт эксплуатации механизмов КС на реакторе СМ-2 показал их высокую надежность.

**Универсальный исполнительный механизм СУЗ для исследовательских реакторов.** Несмотря на большое разнообразие исследовательских реакторов, их РО, как правило, имеют относительно небольшую массу (несколько килограммов). Длина ИМ зависит от размеров биологической защиты и составляет 5—10 м, в то время как ход РО обычно не превышает 0,5 м. Используемые до сих пор электромеханические ИМ имели значительные габаритные размеры, сложные кинематические схемы и затрудняли проведение экспериментальных работ на реакторе, занимая пространство в верхней части реактора над биологической защитой. Большие трудности представляло также использование таких механизмов в системах, где необходимо обеспечить синхронизацию нескольких автоматических регуляторов.

При разработке ряда исследовательских реакторов встала задача создания универсального ИМ, свободного от указанных недостатков. Последние достижения в области развития линейных электрических машин позволили решить эту задачу на основе использования линейного шагового электродвигателя (ЛШД), создающего благоприятные условия для проведения нейтронно-физических экспериментов, так как, во-первых, обеспечивается точное определение вводимой реактивности при строго фиксированном шаговом перемещении РО и, во-вторых, облегчается использование его для целей информации о положении РО (что необходимо при проведении нейтронно-физических экспериментов, например при исследовании энергораспределения по активной зоне реактора) вычислительной техники, так как при дискретном перемещении информация может поступать в вычислительную технику непосредственно в двоичном коде.

Схема конструкции ИМ показана на рис. 3.38.

ИМ СУЗ для исследовательских реакторов состоит из линейного шагового электродвигателя 4, линейного датчика положения 3 регулирующего органа, захвата 6, амортизатора 5 и гибких тоководов 2 со штепсельными разъемами 1 и узла сцепления 7.

ЛШД состоит из корпуса 8 из коррозионно-стойкой стали, на наружной поверхности которого размещены обмотки управления 9 четырех фаз ЛШД. В каждую фазу ЛШД входит одна обмотка управления, представляющая собой одну или несколько цилиндрических катушек. Внутри корпуса размещены полюсные наконечники статора с зубцовой зоной, выполненной из чередующихся втулок 10 и 11 из ферромагнитной и немагнитной сталей.

Внутри статора расположен якорь 12 ЛШД с зубцовой зоной, образованной из набора чередующихся втулок 13 и 14 из ферромагнитной и немагнитной сталей, аналогичных втулкам 10 и 11 статора. Якорь 12 выполнен гибким для компенсации влияния

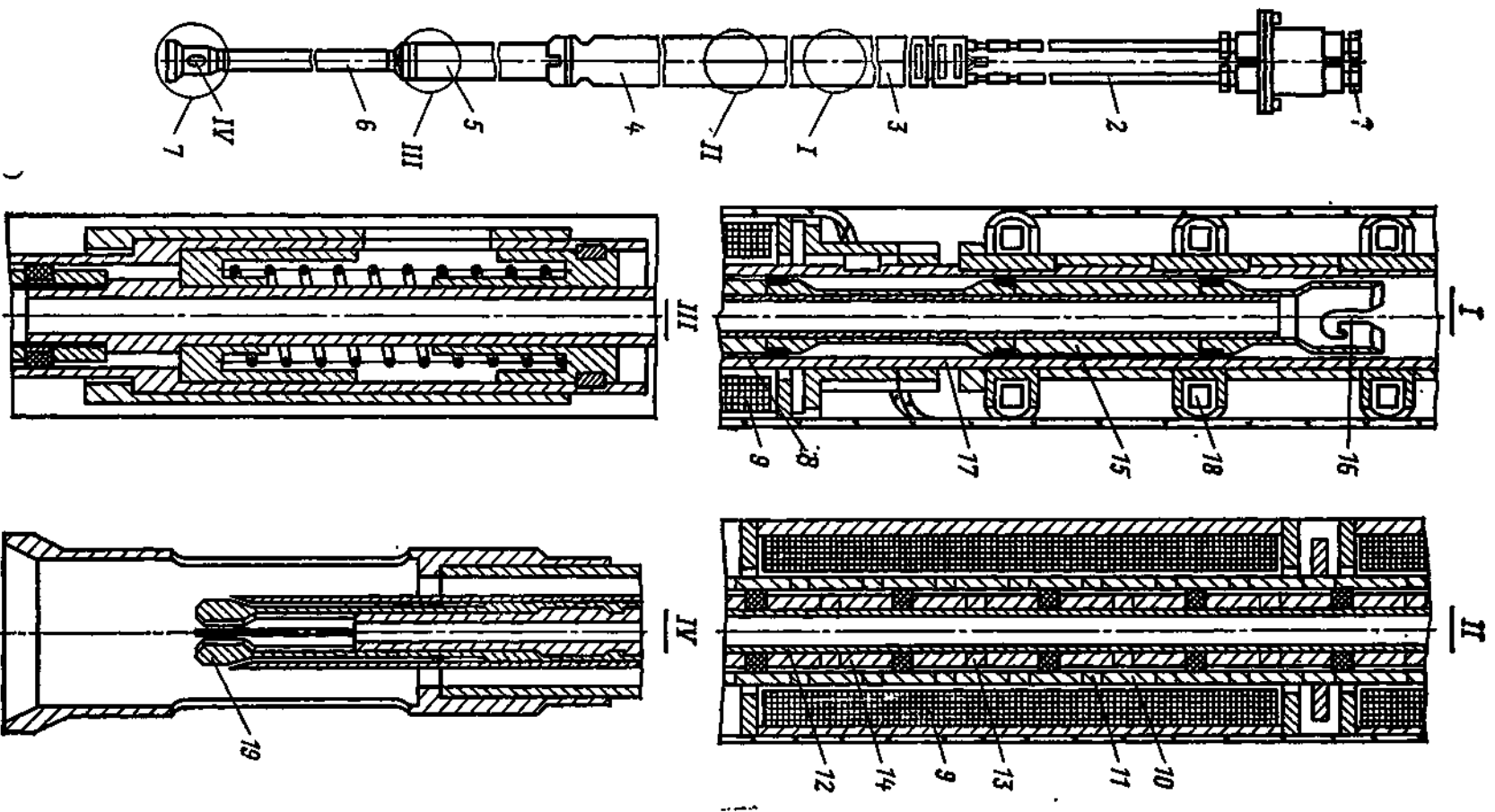


Рис. 3.38. Универсальный исполнительный механизм СУЗ для исследовательских реакторов

возможных перекосов статора и якоря на характеристики ЛШД. На верхнем конце якоря 12 закреплен постоянный магнит 15 линейного датчика положения и выполнена прорезь 16 под байонетное соединение для извлечения якоря из статора. На корпусе 17 ЛШД установлены индуктивные катушки 18 линейного датчика положения РО. В индуктивных катушках при нахождении их в поле постоянного магнита формируется сигнал о положении РО. Кроме того, предусмотрена индикация перемещения РО на каждый шаг в пределах расстояния между соседними индуктивными катушками. На нижнем конце якоря закреплен цанговый захват 19 для сцепления и расцепления якоря с РО. Для поглощения кинетической энергии движущихся частей привода и РО предусмотрен амортизатор.

#### Технические характеристики ИМ

Шаг якоря за один импульс управления, мм . . . . .	2,5
Скорость перемещения, мм/с . . . . .	До 20
Время введения РО в активную зону по сигналу аварийной защиты, с . . . . .	Не более 1
Рабочий ход РО, мм . . . . .	600
Тяговое усилие, Н . . . . .	100
Максимальный диаметр ИМ, мм . . . . .	60
Длина неподвижных частей привода, мм . . . . .	2265
Общая длина привода, мм . . . . .	3500

#### Условия работы ИМ

Среда . . . . .	Вода
Температура среды, К (°С) . . . . .	До 333 (60)
Давление среды, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ) . . . . .	0,098 (0,98)

#### Параметры питания ИМ

Напряжение питания в тормозном режиме, В . . . . .	24
Напряжение питания в режиме перемещения, В . . . . .	60
Длительность управляющего импульса в режиме перемещения, мс . . . . .	60

На рис. 3.39 приведена компоновка ИМ СУЗ на исследовательском реакторе ВВР-Ц. Как видно из рисунка, конструкция ИМ и его габаритные размеры (максимальный диаметр 60 мм) позволяют при его установке на реакторе не перекрывать каналов, при этом гибкие тоководы легко отводятся в сторону и освобождают пространство над активной зоной и тем самым не мешают проведению экспериментальных и перегрузочных работ.

Эта конструкция ИМ с некоторыми доработками без принципиального изменения конструкции может быть использована в исследовательских реакторах с водой под давлением.

Важным преимуществом ИМ с ЛШД является возможность его установки под активной зоной. При такой установке полностью освобождается пространство над активной зоной реактора, а проведение экспериментальных и перегрузочных работ значительно упрощается.

При подаче управляющих импульсов на обмотки шагового электродвигателя якорь перемещается вверх или вниз шагами. При возникновении аварийных ситуаций обмотки двигателя обес-



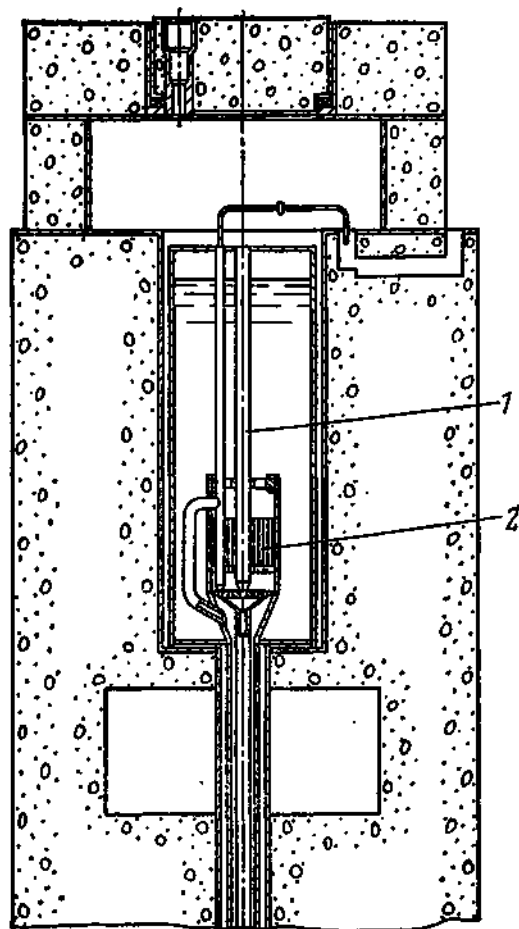


Рис. 3.39. Компоновка механизма СУЗ на исследовательском реакторе ВВР-Ц:

1 — механизм СУЗ; 2 — активная зона реактора

точиваются и якорь под действием силы тяжести падает вниз, обеспечивая ввод РО в активную зону. Накопленная при падении кинетическая энергия поглощается амортизатором. ИМ может работать в режиме автоматического регулирования, компенсации реактивности и АЗ.

Связь якоря со статором осуществляется только электромагнитным полем. Это предопределяет высокую надежность механизма, так как в нем отсутствуют различного рода передачи, преобразователи вращения и т. д. Линейный шаговый электродвигатель обеспечивает надежное удержание РО в режиме фиксированной стоянки. Имея частотное регулирование скорости, двигатель является по существу электрическим редуктором. Такие механизмы позволяют осуществлять синхронное перемещение РО (напри-

мер, при работе в режиме автоматического регулирования) без применения дополнительных устройств для синхронизации, так как сигналы управления подаются на все механизмы от одного генератора импульсов. При такой конструкции механизмов надежно обеспечиваются основные требования ядерной безопасности. Во-первых, при заранее заданной скорости перемещения двигатель не будет создавать усилие, необходимое для перемещения РО в сторону увеличения реактивности со скоростью больше заданной. Во-вторых, применение ИМ с ЛШД позволяет задать любую минимальную скорость изменения реактивности, что достигается частотным управлением, а также дроблением шага электрическим путем. И, в-третьих, при перемещении РО и в режиме стоянки РО удерживается исключительно силами электромагнитного поля, поэтому потеря электроснабжения системы управления вызывает падение поглотителя в активную зону реактора.

На основе приведенной выше конструкции ИМ может быть создан ряд ИМ с различными размерами линейных шаговых электродвигателей. Такие механизмы, имея в основе единую конструкцию, могут практически быть использованы на многих исследовательских реакторах в качестве универсальных.

### 3.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СУЗ СУДОВЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Обсуждение материалов по ядерным энергетическим установкам для гражданских судов на Третьей международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964) показало перспективность этого направления. В настоящее время накоплен опыт эксплуатации судов с ядерными энергетическими установками: ледоколов «Ленин» и «Арктика» (СССР), грузопассажирского судна «Саванна» (США) и рудовоза «Отто Ган» (ФРГ). На транспортных энергетических установках должны выполняться важнейшие требования обеспечения безопасности — способность выдерживать внешние механические воздействия, связанные с вибрацией на судне, ударами волн и льда о корпус судна, кренами и дифферентами. Это накладывает определенные специфические условия на работу ИМ ядерными судовыми реакторами. При любом состоянии судна должна надежно обеспечиваться ядерная безопасность. Введение РО в активную зону должно обеспечиваться независимо от внешних условий, при любом состоянии судна, даже при его затоплении и переворачивании вверх килем. ИМ должны обладать также повышенной надежностью и обеспечивать ресурс работы 10 000 ч и выше в условиях ограниченного обслуживания или вовсе без обслуживания. Ниже рассматриваются конструкции ИМ корабельных ядерных энергетических установок.

**Исполнительный механизм КС атомного ледокола «Ленин».** На атомном ледоколе «Ленин» [16] используются реакторы на тепловых нейтронах гетерогенного типа, в которых замедлителем и теплоносителем служит дистиллят воды под

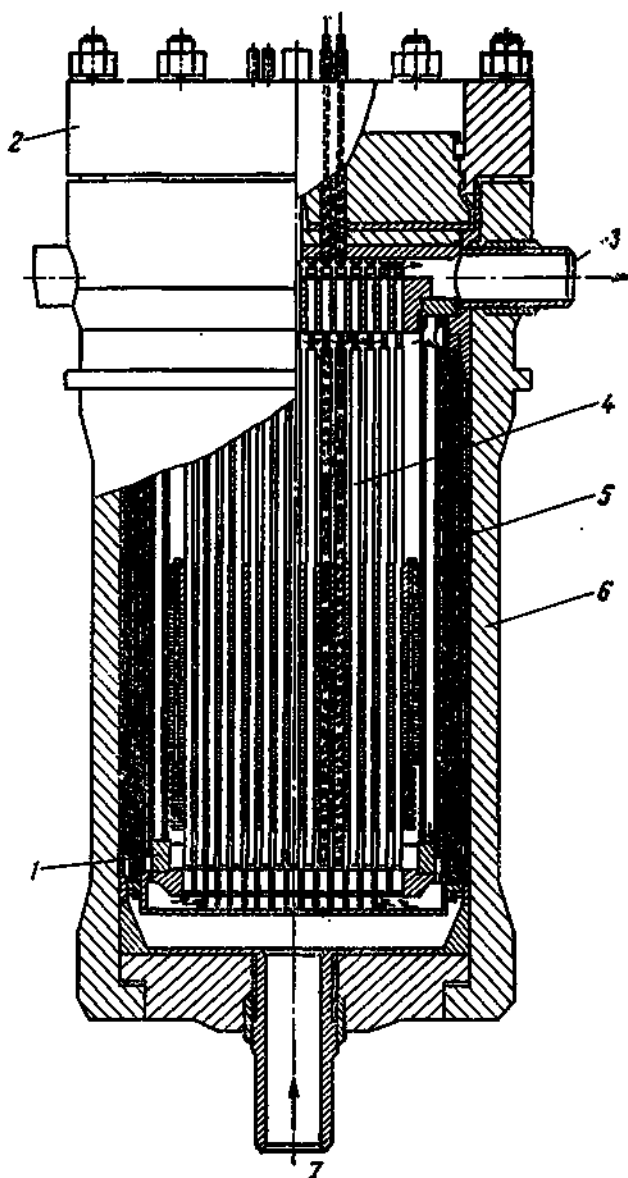


Рис. 3.40. Реактор ледокола «Ленин»: 1 — нижняя плита; 2 — крышка; 3 — выход теплоносителя; 4 — каналы; 5 — экраны; 6 — корпус; 7 — вход теплоносителя

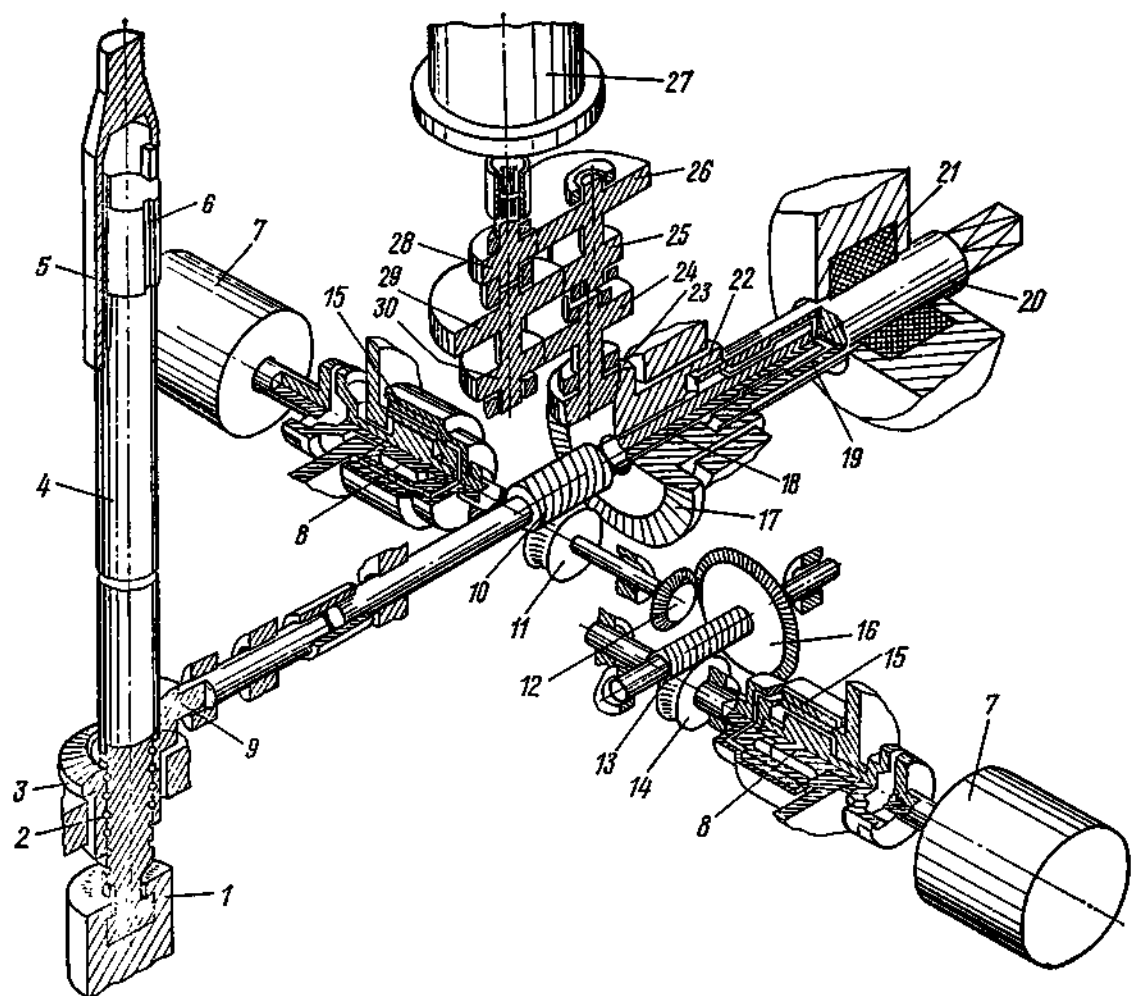


Рис. 3.41. Схема исполнительного механизма СУЗ КС

давлением. Температура теплоносителя на выходе из реактора  $325^{\circ}\text{C}$ , на входе  $248^{\circ}\text{C}$ . Рабочее давление в реакторе 20 МПа. В крышке реактора (рис. 3.40) имеются отверстия для приводов РО аварийной защиты, автоматического регулирования и компенсации избыточной реактивности. Для регулирования мощности и управления работой реактора предусмотрены два автоматических регулятора, каждый из которых состоит из трех РО. Для аварийной остановки реактора предусмотрены поглощающие элементы, которые под действием пружин вводятся в активную зону за 0,6 с (ход 1,6 м). Система компенсирующих РО приводится в действие герметичным электродвигателем.

Схема механизма КС приведена на рис. 3.41. Компенсирующая система через шток 1 соединяется с винтом 4, который в своей верхней части имеет направляющие 6 в трубе 5, препятствующие его вращению. Винт перемещается шариковой гайкой 2. Шариковая гайка приводится во вращение парой конических шестерен 3 и 9. Шестерня 3 жестко соединена с шариковой гайкой. Движение на шариковую гайку передается от специального электродвигателя 27 через многоступенчатый цилиндрический редуктор 24—

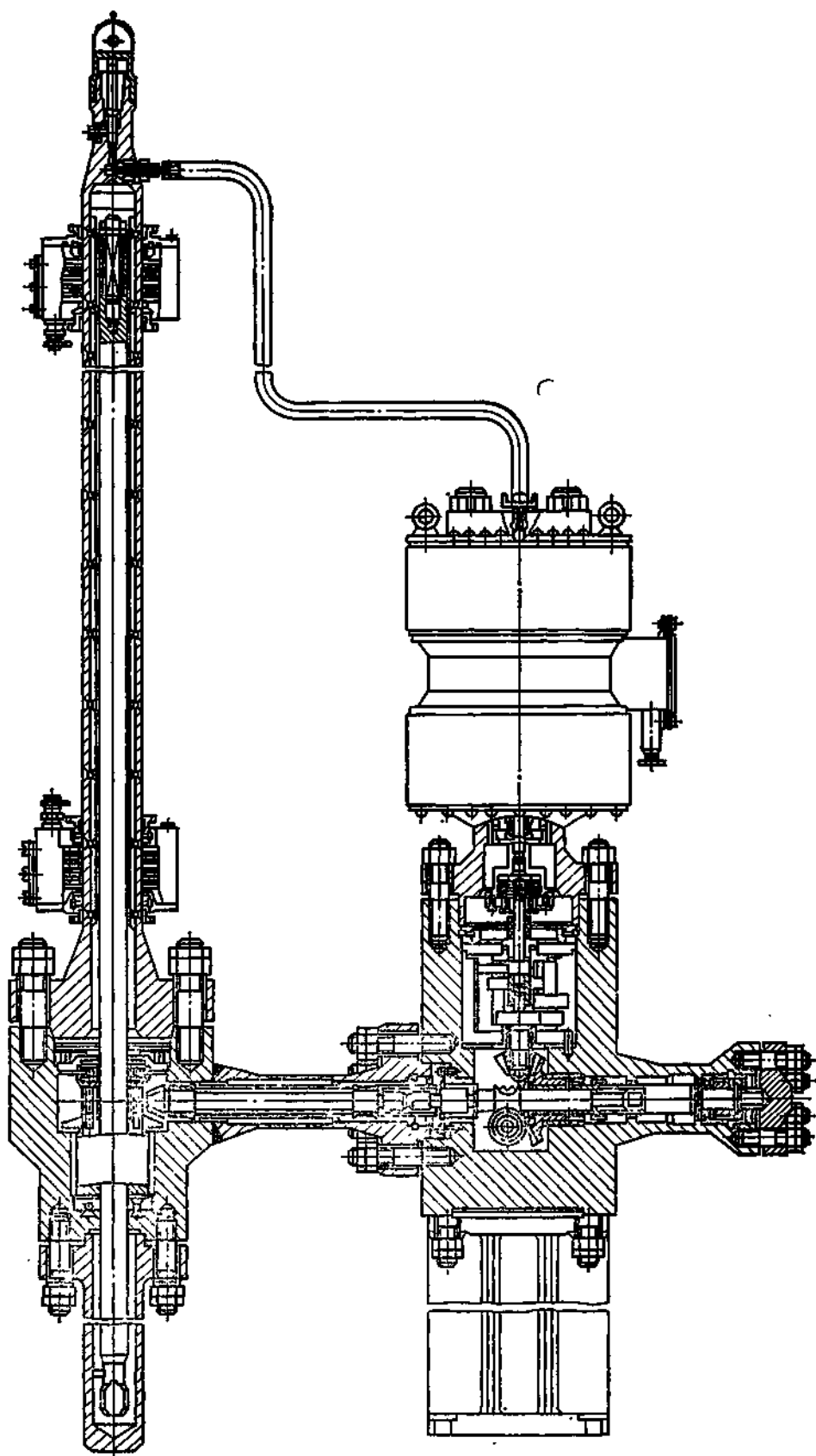


Рис. 3.42. Конструкция исполнительного механизма СУЗ КС

Рис. 3.43. Линейный шаговый механизм управления для судовых ядерных установок

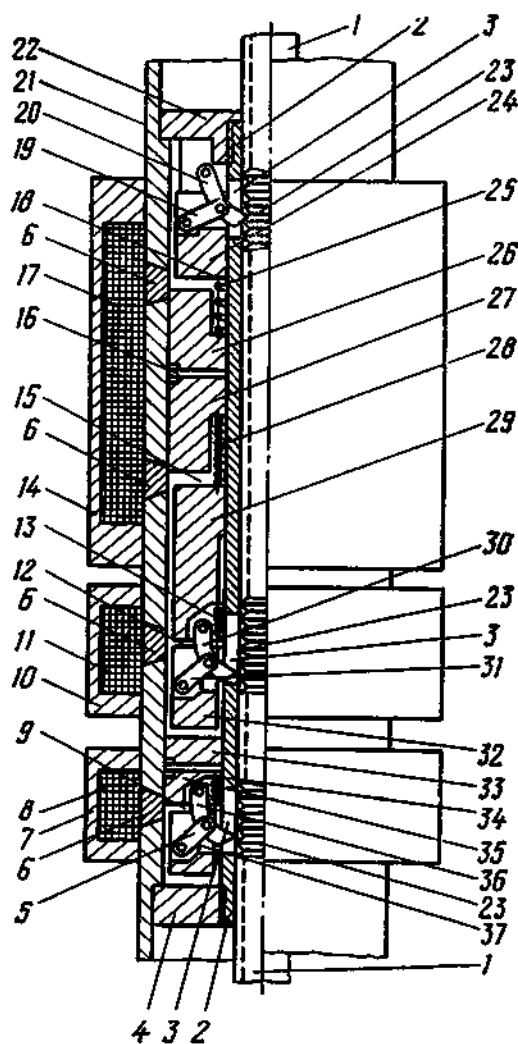


Рис. 3.44. Изменение тока возбуждения подъемной катушки во времени

26, 28—30, конические шестерни 23 и 17, вал 18 и ведущую коническую шестерню 9. Коническая шестерня 17 соединяется с валом 18 через специальную зубчатую муфту 22, которая позволяет осуществить переход с электрического управления системой на ручное. При переходе на ручное управление зубчатая муфта расцепляется с конической шестерней 17, отсоединяя ее от вала 18, и соединяет вал ручного управления 20 с валом 18 с помощью шлицев 19. Уплотнение вала 20 происходит через сальник 21. Для индикации положения компенсирующей системы в механизме предусмотрены датчики положения 7 грубого и точного отсчета, которые электрически связаны с указателями положения. Движение на датчики с вала 18 передается через червячную пару 10 и 11, шестерни 12—14 и 16 и через магнитные муфты 15 и 8.

Конструкция механизма КС показана на рис. 3.42.

Электромагнитный исполнительный механизм СУЗ для судовых реакторов. На рис. 3.43 показан механизм для перемещения РО судовых ядерных реакторов [7]. Он является дальнейшим усовершенствованием ИМ, показанного на рис. 3.16. Эти усовер-

ишенствования позволяют использовать ИМ в специфических условиях работы корабельных установок и, в частности, при опрокидывании судна.

Основной подвижной частью механизма является шток 1, связанный с РО. На поверхности штока выполнены кольцевые канавки 23. Основные элементы ИМ находятся внутри герметичной прочной трубы, изготовленной из магнитомягкой стали. В трубу 21 вварены кольцеобразные проставки 6 из немагнитной стали. Внутри трубы 21 смонтирована с помощью фланцев 4 и 22 направляющая труба 2, имеющая прорези 3 для защелок. В кольцевом пространстве, образованном трубами 21 и 2, расположены электромагнитные системы, возбуждаемые катушками 8, 11, 17, установленными снаружи трубы 21. В верхней части механизма расположена система аварийной блокировки при опрокидывании судна. Она состоит из защелок 19, 20, прикрепленных к фланцу 22 и якорю электромагнита блокировки 24.

ИМ имеет три электромагнита: верхний электромагнит подъема и блокировки при опрокидывании, возбуждаемый катушкой 17; средний электромагнит захвата, возбуждаемый катушкой 11, и нижний электромагнит удержания, возбуждаемый катушкой 8. Сердечники электромагнита подъема 26 и 27 присоединяются к направляющей трубе 2 крепежными деталями 16. Электромагнит подъема имеет два якоря — для подъема 29 и блокировки 24, которые при обесточенной катушке отбрасываются в исходное положение пружинами 28 и 25. Электромагнит захвата имеет якорь 32, возвращаемый в исходное положение пружинной 13 и защелками 30 и 31. Удерживающий электромагнит имеет якорь 37, притягиваемый к магнитопроводу 33, 35 и возвращаемый в исходное положение пружинной 34 и защелки 5 и 36. Во избежание прилипания якоря все электромагниты имеют немагнитные покрытия 9, 12, 15 и 18. Детали 7, 10 и 14 являются магнитопроводом. ИМ работает следующим образом. При перемещении РО вверх включается катушка электромагнита захвата 11, защелки входят в кольцевые канавки 23 штока 1. Выключается удерживающая катушка 8 и удерживающие защелки расцепляются со штоком; включается подъемная катушка 17, при этом якорь 24 притягивается к сердечнику 26, защелки электромагнита блокировки 19, 20 расцепляются со штоком и притягивается якорь 29, который вместе с системой захватывающих защелок перемещает на величину шага шток с РО. Затем возбуждается катушка 8, удерживающие защелки входят в кольцевые проточки штока; катушки 17 и 11 отключаются, защелка электромагнита блокировки сцепляется со штоком; подъемный и захватывающий якоря возвращаются в исходное положение. Следующий шаг перемещения вверх происходит аналогично.

При перемещении РО вниз катушка 8 возбуждена, включается катушка 17, притягивается якорь 29 и защелки электромагнита блокировки 19, 20 выходят из зацепления; включается катушка 11, захватывающие защелки сцепляются со штоком; отключается

удерживающая катушка 8, выключается катушка 17 и якорь 29 вместе с якорем 32 и штоком 1 перемещается вниз на шаг. После перемещения РО органа вниз защелки блокировки входят в зацепление со штоком. Следующий шаг вниз происходит таким же образом.

При каждом шаге, обрабатываемом механизмом, защелки блокировки при опрокидывании судна входят в зацепление со штоком, связанным с РО. Этим самым предотвращается самопроизвольное перемещение регулирующего органа в активной зоне реактора даже при полном исчезновении электропитания.

На рис. 3.44 показан график изменения тока возбуждения подъемной катушки во времени. На кривой видны две ступени, соответствующие моментам притяжения якоря блокировки и якоря подъема. Как видно из графика, защелки электромагнита блокировки выходят из зацепления со штоком раньше, нежели якорь 29 притянется к сердечнику. Конструктивно это достигается тем, что рабочий зазор электромагнита блокировки делается меньше рабочего зазора электромагнита подъема и якоря этих электромагнитов имеют пружины различной жесткости.

### 3.5. ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

Конструкция ИМ может быть различного типа с использованием разнообразных видов энергии (электрической, магнитной, гидравлической, пневматической и т. д.). Однако в любом случае для обеспечения перечисленных функций регулирования реактора ИМ должен иметь следующие основные структурные элементы (рис. 3.45): двигатель (Д); редуктор (Р); преобразователь вида движения (П); датчик крайних и промежуточных положений (ДКП); датчик, подающий непрерывный сигнал о текущем положении регулирующего органа (ДТ); автономный источник энергии (АИ); удерживающее устройство (УУ); тормозное устройство (Т).

Рассмотрим более подробно перечисленные структурные элементы ИМ.

*Двигатель* может использоваться различного типа. В электро-механическом механизме его функции выполняет стандартный электродвигатель переменного или постоянного тока. Двигателем может быть гидроцилиндр с поршнем или гидравлический двига-



Рис. 3.45. Структурная схема комбинированного ИМ СУЗ

тель вращения с регулируемой скоростью. Иногда в качестве двигателя используется специальное электромагнитное устройство.

*Редуктор.* ИМ должен быть снабжен устройством, обеспечивающим необходимую скорость перемещения РО (или диапазон скоростей). Роль редуктора могут выполнять механическая передача, гидравлический регулятор скорости, частотный регулятор электродвигателя и т. п.

*Преобразователь* необходим для преобразования одного вида движения в другой (чаще всего вращательного движения двигателя в поступательное перемещение РО). В качестве преобразователей в ИМ ядерных реакторов могут быть, например, использованы пары: винт — гайка, шестерня — рейка, барабан — трос, звездочка — цепь и др. При использовании линейных механизмов необходимость в преобразователе отпадает.

*Датчик крайних и промежуточных положений.* В качестве этих датчиков могут использоваться концевые выключатели, индуктивные катушки, магнитоуправляемые контакты и др.

*Датчик положения.* С его помощью ведут непрерывный или дискретный отсчет положения РО на протяжении рабочего хода. В качестве таких датчиков могут использоваться сельсины, индуктивные датчики, ультразвуковые датчики, потенциометры и др.

*Автономный источник энергии* необходим для введения РО по сигналу АЗ в активную зону реактора при нарушении питания от штатных источников питания. Для этих целей могут использоваться: сила тяжести, упругая сила пружины, гидравлические или пневматические аккумуляторы и др.

*Удерживающее устройство* предназначено для удержания РО в заданном положении и его освобождения при аварийном срабатывании. В качестве удерживающих устройств могут использоваться электромагнитные муфты, управляемые рычажные шариковые защелки, гидравлические или пневматические защелки. В ряде случаев функции удерживающих устройств выполняют электродвигатели с электромагнитной фиксацией ротора в определенных положениях.

*Тормозное устройство* предназначено для поглощения кинетической энергии, развиваемой РО и другими подвижными элементами ИМ при аварийном срабатывании. Тормозные устройства предотвращают возможность поломки ИМ или РО во время аварийного срабатывания. В качестве тормозных устройств могут служить гидравлические, пневматические шариковые или электромагнитные тормоза, кольцевые пружины, иногда используется также электродинамическое торможение, создаваемое самовозбуждающимися электродвигателями.

Объединение элементов структуры в конструктивные сборки в ряде случаев позволяет значительно упростить кинематическую схему механизма и тем самым повысить его надежность.

На рис. 3.46 приведен механизм с линейным шаговым электродвигателем (ЛШД), который в данном случае совмещает функции собственно двигателя, удерживающего устройства (якорь



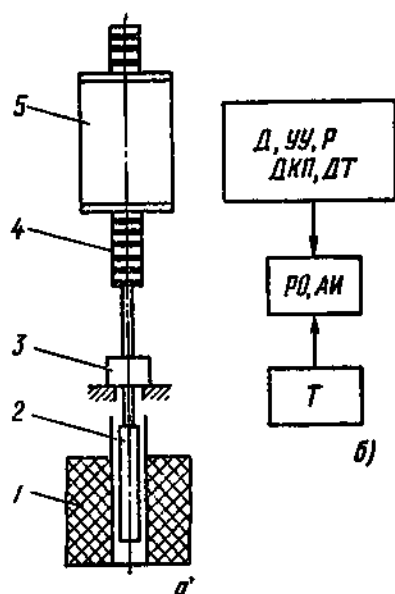


Рис. 3.46. Кинематическая (а) и структурная (б) схемы исполнительного механизма с линейным шаговым электродвигателем:

1 — активная зона; 2 — регулирующий орган; 3 — тормоз; 4 — якорь ЛШД; 5 — статор ЛШД

двигателя удерживается силами электромагнитного поля) и редуктора (двигатель является по существу электрическим редуктором, скорость перемещения якоря регулируется изменением частоты управляющих импульсов). Счет импульсов позволяет отказаться от установки специальных датчиков положения и конечных выключателей. Эти функции также выполняются двигателем. При определенных схемах коммутации обмоток двигателя его можно применять в качестве тормозного устройства. Известны

также способы коммутации обмоток линейного шагового двигателя, позволяющие сообщать якорю двигателя, связанному с РО, ускорение при аварийном срабатывании. В данном примере в качестве автономного источника энергии РО используется сила тяжести.

Приведенный анализ структуры ИМ позволяет выявить принципы построения разнообразных механизмов, осуществляющих работу по заданной системой управления реактором программе. Конструкции и параметры отдельных структурных элементов механизмов СУЗ рассматриваются ниже.

#### Глава четвертая

### ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

#### 4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В ИМ ядерных реакторов используются электродвигатели различного типа. Выбор того или иного типа электродвигателя обусловлен рядом факторов, таких, как принятая конструктивная схема механизма, требования к герметизации, окружающая температура, радиационная обстановка, габаритные размеры, наличие ударных и вибрационных нагрузок, режим работы, скорость перемещения РО, диапазон регулирования скорости, тип и мощность источников электропитания на реакторной установке и др.

В ИМ, работающих при атмосферном давлении и нормальных условиях, часто используются электрические машины общепромышленного назначения переменного и постоянного тока. В каче-

стве двигателей переменного тока используются преимущественно асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, обладающие большой надежностью и не требующие сложной пусковой аппаратуры. Там, где по условиям работы необходим значительный диапазон регулирования скорости перемещения РО, применяют электродвигатели постоянного тока.

При проектировании ИМ ставится задача уменьшения габаритных размеров и массы электропривода, успешное решение которой требует создания тихоходных электродвигателей. Получение низких скоростей электродвигателей увеличением числа пар полюсов двигателя и использованием механических редукторов не позволяет кардинально решить проблему тихоходности электропривода из-за увеличения габаритных размеров и массы двигателя, снижения его надежности и срока службы. Эта проблема может быть решена на основе создания новых конструкций тихоходных электрических машин: с катящимся ротором, с волновым ротором, дугостаторных электродвигателей, электродвигателей на зубцовых гармониках поля (с электромагнитной редукцией скорости) и ряда других [6]. Однако теория этих машин еще недостаточно разработана, их проектирование и изготовление связаны с рядом конструктивных и технологических трудностей, такие электродвигатели еще не выпускаются серийно. Все это ограничивает их применение в ИМ ядерных реакторов.

В настоящее время в ИМ получили большое распространение специальные электрические машины (вращательные и линейные): асинхронные, синхронные, синхронно-реактивные и шаговые. Эти машины, как правило, создаются в герметичном исполнении. Специальные электродвигатели изготавливаются относительно небольшими партиями для использования в системах управления отдельных ядерных реакторов или на ряде однотипных реакторных установок. Некоторые специальные электродвигатели позволяют создать принципиально новые механизмы, обладающие повышенной надежностью и наиболее полно отвечающие требованиям обеспечения ядерной безопасности реакторных установок. Развитие систем управления ядерными реакторами связано с дальнейшим совершенствованием таких электрических машин.

#### **4.2. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В ИМ ядерных реакторов используются электродвигатели мощностью от нескольких десятков ватт до нескольких киловатт. Мощность электродвигателей определяется массой РО и скоростью их перемещения. Из асинхронных электродвигателей в ИМ используются двигатели единой серии, управляемые асинхронные электродвигатели с полым ротором, рассчитанные на работу от сети 50 и 500 Гц, электродвигатели постоянного тока.

Вопросы выбора электродвигателей для общепромышленных установок достаточно полно изложены в технической литературе

[6]. Здесь остановимся только на некоторых с учетом специфических условий работы механизмов управления на ядерных реакторах. На выбор электродвигателей существенное влияние оказывает их режим работы, который определяется режимом работы ИМ. Рассмотрим продолжительность работы ИМ.

Регулирующие органы аварийной защиты взводятся крайне редко (только при пуске реактора и после аварийного срабатывания). Время взвода аварийных органов СУЗ обычно колеблется от нескольких секунд до десятков секунд. Компенсирующие органы СУЗ также перемещаются относительно редко и, как правило, на небольшое расстояние. В связи с этим электродвигатели, работающие в таких механизмах, практически не успевают нагреться до установившейся температуры и продолжительное время охлаждаются, т. е. имеют температуру окружающей среды. Поэтому электродвигатели, используемые в указанных механизмах, работают в кратковременном режиме.

ИМ автоматического регулирования работают в циклическом режиме, причем длительности работы и паузы между включениями определяются динамическими свойствами конкретного ядерного реактора. Электродвигатели, устанавливаемые на этих механизмах, могут работать в повторно-кратковременном или кратковременном режиме. Это же относится и к универсальным ИМ, работающим во всех указанных режимах.

Продолжительности включения электродвигателей при работе в механизмах автоматического регулирования, как правило, не соответствуют стандартным значениям. На основании ГОСТ 183—74 для всех тепловых расчетов электродвигателей принята стандартная температура окружающей среды  $40^{\circ}\text{C}$ . Этой температуре соответствуют номинальные данные электрических машин. На реакторных установках температура окружающей среды во многих случаях превышает это значение. Поэтому нагрузка на двигатели должна быть соответственно уменьшена. Указанные обстоятельства требуют особого подхода к выбору электродвигателей для ИМ.

Промышленность выпускает ограниченное число серийных электродвигателей, рассчитанных на повторно-кратковременный режим работы, например крановые двигатели. Поэтому на практике приходится решать задачу использования электродвигателей, рассчитанных на номинальный длительный режим работы в повторно-кратковременном или кратковременном режиме. Повторно-кратковременный режим характеризуется необходимостью частых остановок и пусков двигателя, т. е. наличием переходных режимов, в которых возникают динамические нагрузки двигателя. Поэтому для работы в повторно-кратковременном режиме требуется более высокая перегрузочная способность двигателя. Условия нагрева и охлаждения двигателей при повторно-кратковременном режиме отличаются от условий при длительном режиме. Теплоотдача двигателей с самовентиляцией в повторно-кратковременном режиме ухудшается, что необходимо учитывать при определении номинальной нагрузки двигателя в этом режиме.

Время цикла при работе двигателя в повторно-кратковременном режиме (рис. 4.1)  $t_{\text{ц}}$  состоит из времени пуска  $t_{\text{п}}$ , которому соответствует момент двигателя  $M_1$ , времени движения с установившейся скоростью  $t_{\text{уст}}$ , которому соответствует момент двигателя  $M_2$ , и времени паузы  $t_0$ , когда момент двигателя равен нулю. Требуемый пусковой момент двигателя определяется как сумма статического и динамического моментов  $M_{\text{п}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}$ . Если принять, что между моментом двигателя и током в его обмотках существует пропорциональная зависимость, то нагрев двигателя определяется средним квадратичным моментом

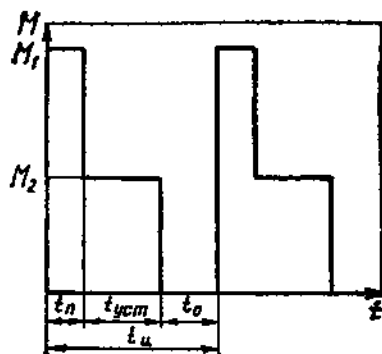


Рис. 4.1. Упрощенная диаграмма изменения нагрузки электродвигателя

$$M_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Охлаждение двигателей с самовентиляцией ухудшается при его полной остановке примерно в 2 раза по сравнению с работой при установившейся скорости, а во время пусков имеет место средняя интенсивность охлаждения. С учетом этого выражение для среднего квадратичного момента для диаграммы рис. 4.1 можно записать в следующем виде:

$$M_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{п}} + M_2^2 t_{\text{уст}}}{0,75 t_{\text{п}} + t_{\text{уст}} + 0,5 t_0}}.$$

Ухудшение теплоотдачи учитывается уменьшением времени пауз ( $0,5 t_0$ ) и времени пусков ( $0,75 t_{\text{п}}$ ) в знаменателе подкоренного выражения. Номинальный момент выбираемого двигателя  $M_{\text{н}}$  (дается в каталогах) должен быть больше  $M_{\text{ср.кв}}$ . В этом случае двигатель в нагретом состоянии имеет вполне достаточный запас по моменту. Кроме того, необходимо проверить двигатель по перегрузочной способности. Максимально допустимый момент двигателя по перегрузочной способности  $M_{\text{доп}}$  должен быть больше требуемого пускового момента ( $M_{\text{доп}} > M_{\text{п}}$ ).

Перегрузочная способность двигателя определяется для асинхронных двигателей с учетом снижения напряжения сети на 10 % (момент пропорционален квадрату напряжения)

$$M_{\text{доп}}/M_{\text{н}} = (U/U_{\text{н}})^2 M_{\text{max}}/M_{\text{н}} = 0,81 M_{\text{max}}/M_{\text{н}}.$$

Значения  $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$  приводятся в каталогах. Таким образом,  $M_{\text{доп}}$  можно выразить как

$$M_{\text{доп}} = 0,81 M_{\text{max}} M_{\text{н}}/M_{\text{н}}.$$

По среднему квадратичному моменту и номинальной скорости вращения можно определить требуемую мощность двигателя

$$P_{\text{тр}} = M_{\text{ср.кв}} n_{\text{н}}/9550.$$

Для выбираемого двигателя длительного режима должно выполняться условие  $P_n > P_{тр}$ .

В механизмах компенсации и аварийной защиты следует использовать электродвигатели, рассчитанные на кратковременный режим работы. Если подходящий двигатель выбрать не удастся, то можно использовать электродвигатель, рассчитанный на длительный режим работы, номинальная мощность которого близка к номинальной мощности требуемого электродвигателя.

#### 4.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

В отличие от обычных специальные электродвигатели (асинхронные, синхронные, синхронно-реактивные и шаговые), как правило, создаются в герметичном исполнении и рассчитаны для работы в условиях среды первого контура реактора. Стремление упростить кинематическую схему ИМ привело к созданию различного типа линейных электродвигателей, особое распространение среди которых получили шаговые электродвигатели.

При разработке специальных электрических машин, используемых в ИМ ядерных реакторов, решаются следующие конструктивные проблемы: целесообразное конструктивное решение передачи крутящего момента; выбор способа и конструктивное решение элементов герметизации; учет воздействия температур окружающей среды и радиации; выбор обмоточных проводов и способа осуществления теплоотвода; учет воздействия вибрационных ударных нагрузок и конструктивное выполнение элементов амортизации; выбор магнитомягких электротехнических сталей, способных работать в среде первого контура реактора при высоких температурах теплоносителя.

В литературе мало данных по методике расчета специальных электродвигателей и выбору рациональных геометрических соотношений при их конструировании. Расчет некоторых специальных электрических машин, используемых в реакторостроении, будет рассмотрен в гл. 8.

**Асинхронный герметичный электродвигатель.** В ИМ, работающих под давлением, требуется передать вращение от электродвигателя к передаче, расположенной в воде первого контура реактора. Использование уплотнений по соображениям надежности нежелательно. В этом случае используют герметичные асинхронные электродвигатели (рис. 4.2), у которых ротор, расположенный в среде первого контура реактора, отделен от статора герметичной рубашкой [6]. Ротор двигателя выполняется из магнитомягкой нержавеющей стали. Статор имеет закрытый паз, в который укладывается обмотка. Между ротором и статором может быть установлена специальная рубашка, герметизирующая полость ротора. Эта рубашка опирается на расточку статора и, таким образом, может выдерживать высокое давление теплоносителя. Толщина рубашки обычно 0,2—0,5 мм. По сравнению со стандартными электрическими машинами такой электродвигатель имеет более низ-

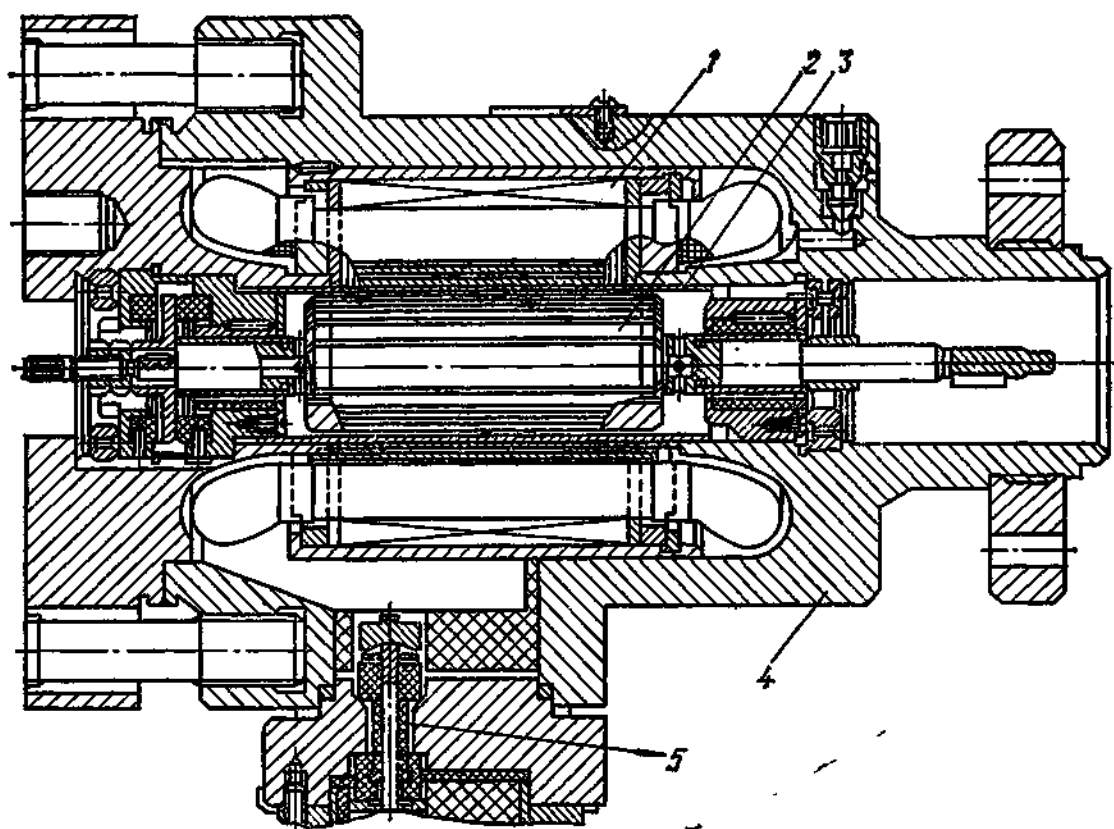


Рис. 4.2. Асинхронный герметичный электродвигатель:

1 — статор; 2 — ротор; 3 — герметичная рубашка; 4 — корпус; 5 — герметичный ввод

кий КПД, так как увеличивается рабочий зазор и возникают потери в рубашке, вызываемые вихревыми токами. Корпус статора такого двигателя рассчитывается на давление в полости ротора. Это объясняется тем, что в случае прорыва рубашки корпус двигателя по соображениям обеспечения ядерной безопасности должен сохранить герметичность механизма. Материалы рубашки и ротора оказывают существенное влияние на характеристики двигателя. Материал рубашки должен быть коррозионно-стойким в той среде, в которой он работает, и обладать большим удельным электрическим сопротивлением.

Расчеты герметичных асинхронных электродвигателей проводят с учетом увеличенного рабочего зазора и потерь в герметичной рубашке от вихревых токов.

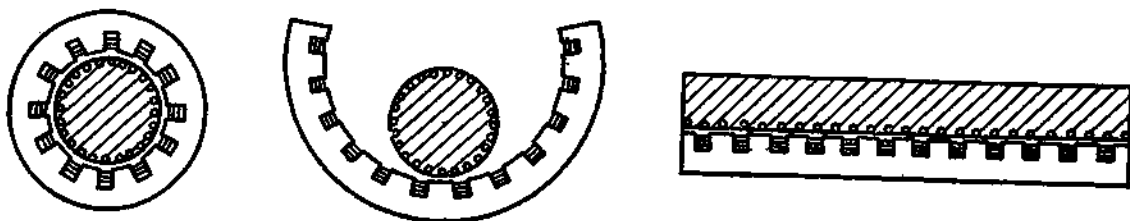


Рис. 4.3. Схема разворачивания асинхронного электродвигателя в линейный двигатель

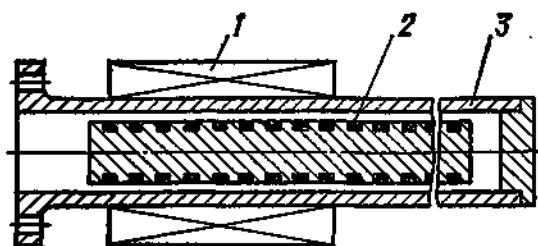


Рис. 4.4. Асинхронный линейный электродвигатель:

1 — статор; 2 — ротор с кольцевыми короткозамкнутыми витками; 3 — труба из нержавеющей немагнитной стали, рассчитанная на давление среды первого контура реактора

**Асинхронный линейный электродвигатель.** На ряде реакторных установок, например на Билибинской АЭС, нашли применение ИМ с линейным асинхронным электродвигателем. Путем развертки статора обычного асинхронного электродвигателя вращения можно получить плоское расположение полюсов (рис. 4.3). При питании такого двигателя переменным током возникает линейно перемещающееся электромагнитное поле. Если соответственно развернуть короткозамкнутые витки ротора, то вместо вращения он получит линейное перемещение. При дальнейшем сворачивании полученных в результате развертывания плоских элементов, но уже вокруг оси, параллельной направлению движения, получится цилиндрический асинхронный линейный электродвигатель, показанный на рис. 4.4.

Конструктивно якорь асинхронного линейного электродвигателя может быть выполнен в виде трубы, например, из нержавеющей стали. Асинхронный линейный электродвигатель позволяет перемещать РО со скоростью, которая может быть определена из соотношения

$$v = 2\tau f(1 - \sigma),$$

где  $\tau$  — полюсное деление;  $f$  — частота переменного тока;  $\sigma$  — скольжение.

Среднее значение динамической мощности асинхронного электродвигателя можно определить как отношение кинетической энергии системы к времени разгона  $t$ :

$$P = \frac{m_c}{(2t/v^2) - m_{\pi}k_0},$$

где  $m_c$  — масса системы;  $v$  — линейная скорость;  $m_{\pi}$  — масса на единицу средней мощности привода;  $k_0$  — отношение всей кинетической энергии системы к кинетической энергии элементов, движущихся со скоростью  $v$ .

Добротность двигателя  $G$  можно определить из формулы

$$G = kI\Phi/(VI_T),$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $I$  — ток в якоре;  $\Phi$  — магнитный поток;  $V$  — напряжение;  $I_T$  — ток обмотки управления. Так как  $I/V = 1/R$  и  $\Phi/I_T = L$ , то  $G = kL/R$ , или  $G = \omega L/R$ , где  $\omega$  — угловая частота. Обычно созданию таких машин предшествует значительный объем экспериментальных и опытно-конструкторских работ.

В ИМ ядерных реакторов линейные асинхронные электродвигатели нашли ограниченное применение, что объясняется сложностью получения необходимых скоростей перемещения РО при заданных габаритных размерах линейного электродвигателя. Такие электродвигатели могут использоваться в ИМ реакторов импульсного типа, где для создания импульса мощности необходимо быстро вывести поглощающие элементы из активной зоны реактора. Высокая скорость бегущего поля в линейных асинхронных двигателях позволяет перемещать якорь двигателя на необходимое расстояние за очень короткие промежутки времени. Ограничение скорости перемещения достигается увеличением числа полюсов (что влечет за собой увеличение длины двигателя) и схемными решениями, например установкой прерывателей питания двигателя.

**Синхронно-реактивные электродвигатели.** В реакторах типа ВВЭР в ИМ, находящихся под давлением и работающих в автоматическом и ручном режимах управления, используется герметичный синхронно-реактивный электродвигатель (см. рис. 3.8). Двигатель имеет разделительную герметизирующую рубашку, опирающуюся на расточку статора и воспринимающую давление воды первого контура реактора. Двигатель питается от преобразователя низкой частоты и имеет небольшое число оборотов. Кроме перемещения РО двигатель осуществляет его удержание в режиме фиксированной стоянки под током. Тепло от двигателя отводится автономной водяной системой охлаждения. При обесточивании электродвигателя происходит аварийное введение РО в активную зону реактора.

Оригинальна конструкция электродвигателя, используемого в ИМ реакторов с водой под давлением АЭС на некоторых зарубежных ядерных реакторах [6]. Ротор двигателя выполнен в виде двух поворотных сегментов, расположенных в первом контуре реактора. На концах сегментов смонтированы ролики (рис. 4.5), которые при включенном электродвигателе входят в зацепление с винтом, связанным с РО. В режиме фиксированной стоянки или перемещения ролики находятся всегда в зацеплении с винтом. При обесточивании электродвигателя (в аварийных ситуациях) под действием пружин сегменты поворачиваются на опорах и ролики выходят из зацепления с винтом, который под действием пружины вместе с РО перемещается в направлении уменьшения реактивности.

Ротор электродвигателя, находящийся в среде теплоносителя, отделен от статора герметичной рубашкой, выполненной из нержавеющей стали. Такая конструкция полностью исключает утечки теплоносителя через ИМ. На внешней части электродвигателя находится кожух, по которому циркулирует вода для улучшения теплоотдачи от двигателя.

**Линейный синхронно-реактивный электродвигатель.** На рис. 4.5 приведена конструктивная схема электродвигателя с осевым движением ротора, используемого для перемещения РО ядерного реактора. Электродвигатель имеет многофазную обмотку и винтовые



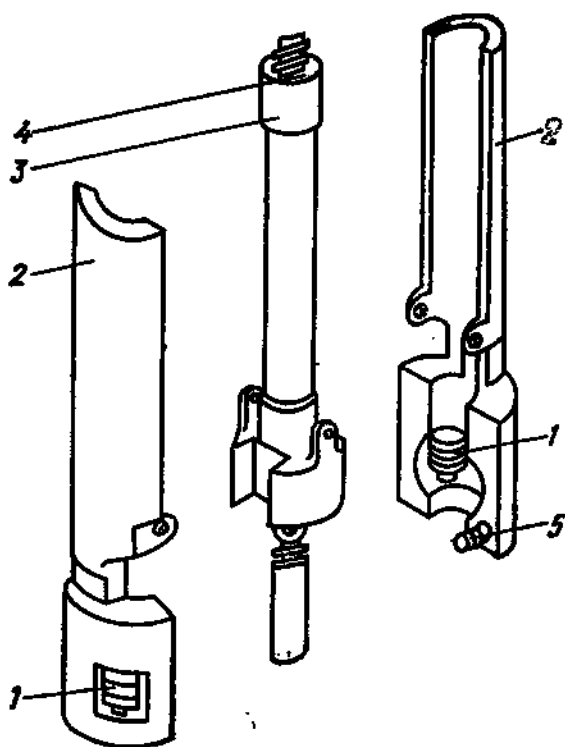


Рис. 4.5. Узел ротора электродвигателя с роликовой гайкой:

1 — роликовая гайка; 2 — сегмент ротора; 3 — центральная деталь; 4 — ходовой винт; 5 — пружина

пазы на роторе и статоре. Ротор этого двигателя имеет выступающие полюсы. Если подсоединить обмотку к источнику переменного тока, то ротор получит винтообразное перемещение. Скорость перемещения будет определяться частотой источника напряжения, которую выбирают относительно низкой, например такой, чтобы ротор делал один оборот в секунду. Если подключить обмотку к источнику постоянного тока, то ротор благодаря выступам будет удерживаться

в фиксированном состоянии. Нужного положения ротора можно добиться постепенным или резким уменьшением частоты до нуля.

При обесточивании двигателя, например по аварийному сигналу, якорь с РО падает в активную зону. Обмотка может быть расположена и на центральной части, остающейся в этом случае неподвижной (вращаться будет статор).

Когда обмотка питается трехфазным переменным током, образуется вращающееся магнитное поле, в котором ротор получает синхронное вращение, так как имеет выступающие полюсы. Одновременно винтовые пазы ротора устанавливаются по винтовым пазам статора, в результате чего ротор получает также осевое перемещение в том или другом направлении, зависящем от направления вращения.

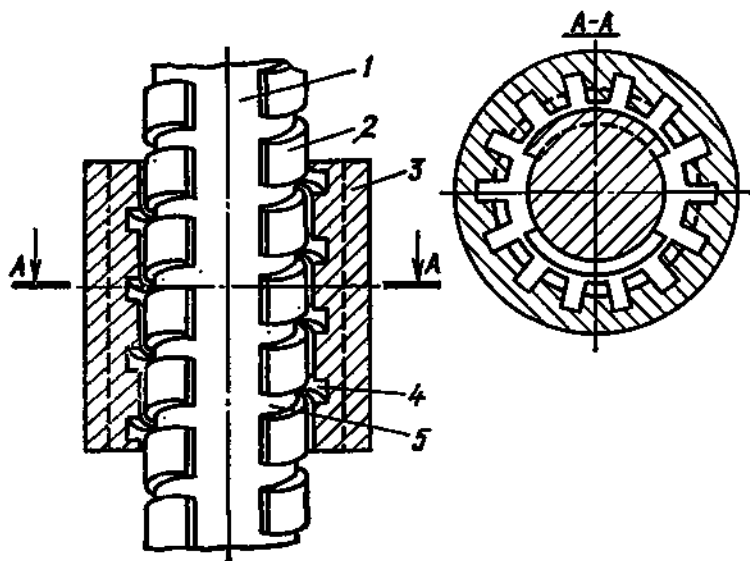


Рис. 4.6. Линейный синхронно-реактивный электродвигатель:

1 — ротор; 2 — выступающие полюсы ротора; 3 — статор с многофазной обмоткой; 4, 5 — винтовые пазы на статоре и роторе

**Шаговые электродвигатели.** В отличие от двигателей непрерывного вращения шаговые двигатели осуществляют дискретное преобразование электрической энергии, что достигается импульсным питанием. Шаг у таких двигателей строго фиксирован и определяется конструкцией двигателя и схемой его коммутации. Скорость вращения шаговых двигателей определяется частотой следования управляющих импульсов.

Большое распространение в реакторостроении получили силовые шаговые электродвигатели с пассивным ротором. Конструкция шагового электродвигателя позволяет относительно просто осуществлять герметичное отделение ротора от статора с сохранением рабочих зазоров, приемлемых для электрических машин этого типа. Последнее обстоятельство особенно важно при разработке ИМ для реакторов, работающих под давлением. В отличие от общепромышленных шаговых двигателей с шихтованным магнитопроводом шаговые двигатели герметичного исполнения, используемые в приводах системы управления и защиты ядерными реакторами, имеют обычно монолитный или частично шихтованный магнитопровод.

Использование ИМ с силовыми шаговыми электродвигателями позволяет создать быстродействующие дискретные системы управления высокой надежности. К преимуществам силовых шаговых двигателей следует также отнести: увеличение надежности привода в результате значительного упрощения его кинематической схемы; большой диапазон регулирования скорости; высокую точность фиксации РО в заданном положении; возможность реверсирования движения и остановки РО без выбега. Кроме того, шаговый двигатель дает возможность удерживать РО в любом положении силами электромагнитного поля, что позволяет отказаться от использования муфт и других удерживающих устройств. При обесточивании его обмоток управления происходит быстрое введение РО в активную зону реактора. При герметичном выполнении шагового двигателя отпадает надобность в использовании уплотнений, значительно снижающих надежность механизма.

На рис. 4.7 приведена конструкция четырехфазного герметичного шагового двигателя с тороидальными обмотками, используемого в ИМ. Шаговый двигатель имеет статор 3, выполненный в виде герметичного корпуса путем сварки магнитомягких и немагнитных стальных колец. В герметичной полости на шарикоподшипниках 1 из коррозионной стали смонтирован зубчатый ротор 2. Вращение ротора через планетарный редуктор 4 передается постоянному магниту 5 герметичного датчика угловых перемещений 8, ротор датчика делает менее одного оборота за весь ход РО. На валу датчика смонтирована пластина 6 из магнитомягкой нержавеющей стали, воздействующая на герметичные индуктивные концевые выключатели 7.

Преимуществом шагового двигателя такого типа является относительно простая конструкция, двигатель имеет всего четыре катушки.

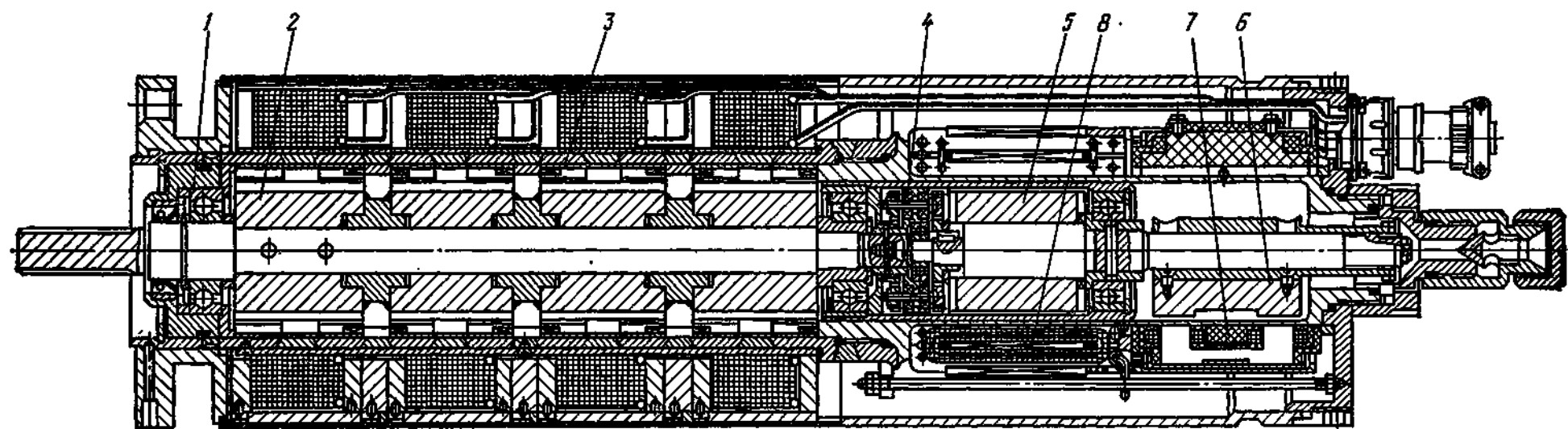


Рис. 4.7. Четырехфазный герметичный шаговый электродвигатель

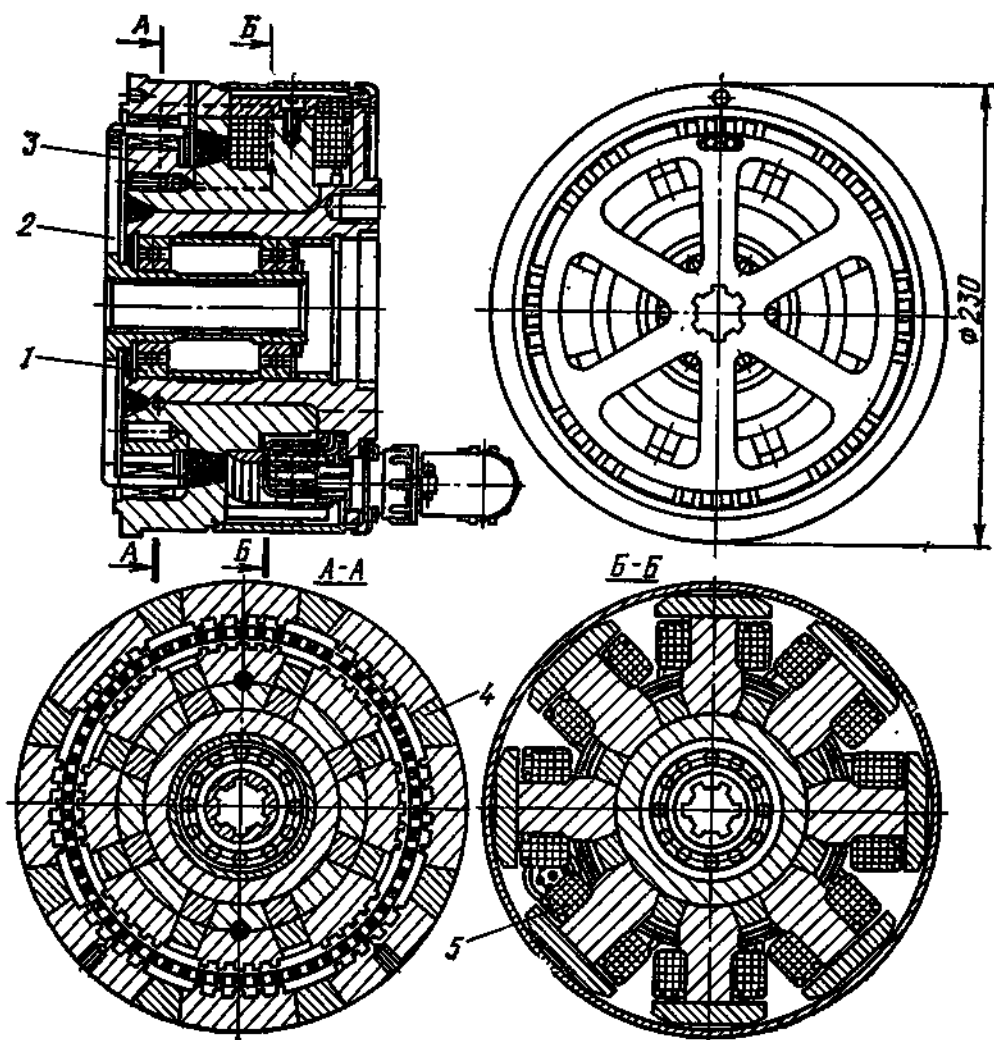
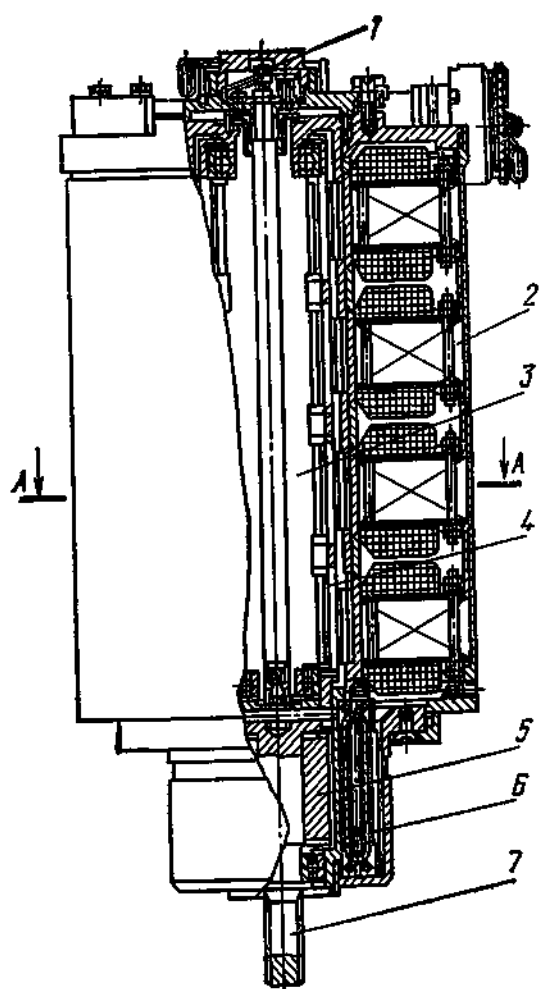


Рис. 4.8. Герметичный шаговый электродвигатель с ротором типа «беличье колесо»:

1 — шарикоподшипник; 2 — ротор; 3 — статор; 4 — немагнитная проставка; 5 — катушка обмотки

К недостаткам конструкции следует отнести наличие массивного ротора с большим моментом инерции, так как магнитный поток проходит вдоль ротора. В связи с этим приемистость двигателя ограничена, и такая конструкция используется, как правило, в тихоходных механизмах. В некоторых конструкциях исполнительных механизмов СУЗ, например с поворотным РО, требуется обеспечить угловой шаг регулирующего органа примерно  $1^\circ$  и меньше. Это может быть достигнуто в конструкции шагового двигателя с ротором большого диаметра типа «беличье колесо» (рис. 4.8). Этот двигатель имеет одностороннюю конструкцию с радиальным расположением фаз. Две диаметрально противоположные обмотки образуют одну фазу. За один импульс ротор поворачивается на угол  $1^\circ 30'$ .

Полый ротор двигателя установлен на шариковых подшипниках в расточке герметичного корпуса статора. На цилиндрической поверхности ротора выполнены зубцы. Такие же зубцы имеются на



A-A

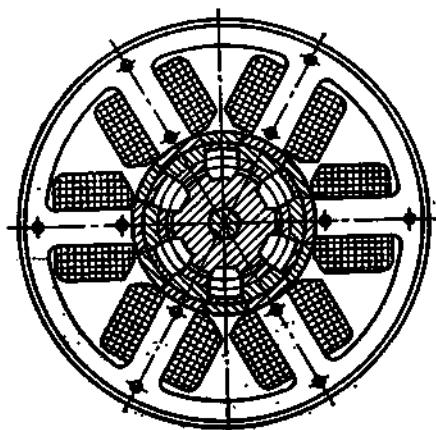


Рис. 4.9. Шаговый электродвигатель с двойным рабочим зазором

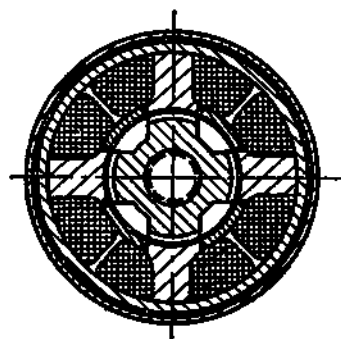
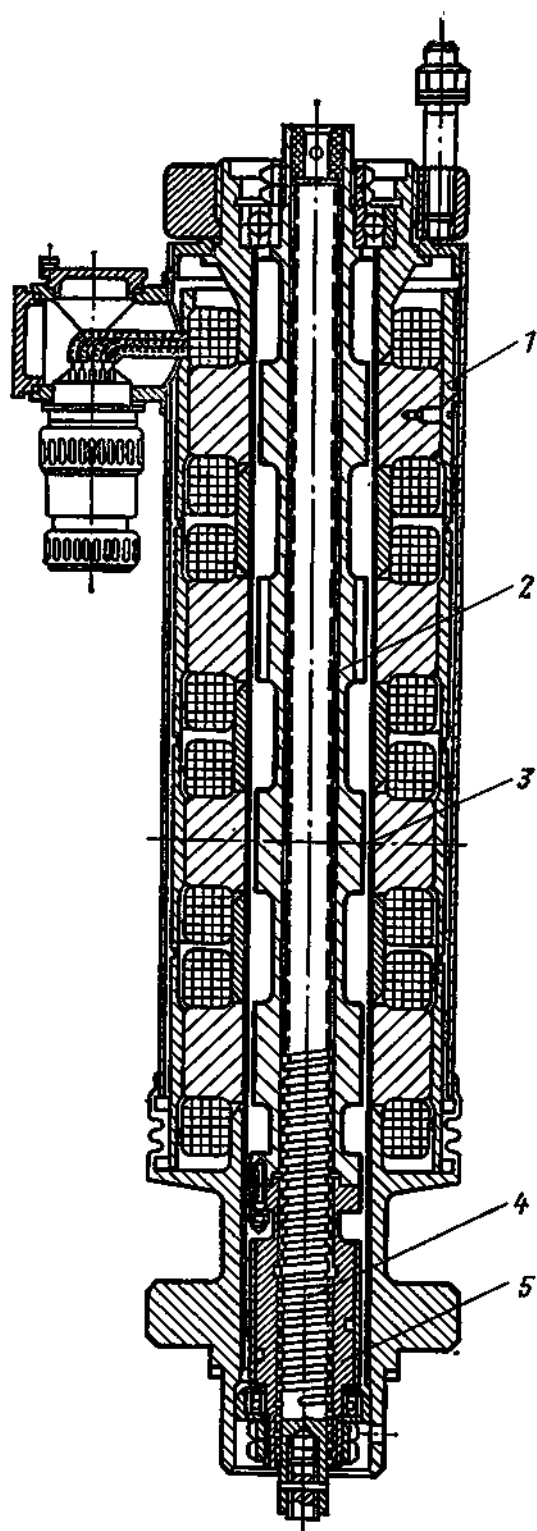


Рис. 4.10. Шаговый электродвигатель механизма КС — АЗ реактора СМ-2:  
1 — статор; 2 — ротор; 3 — герметичная рубашка; 4 — винт; 5 — шариковая гайка

внешней и внутренней обоям статора. Секции конструкции магнитопроводов двигателя, образующие четыре электрические фазы, для уменьшения шунтирования магнитного потока разделены сваркой немагнитными проставками. Ротор установлен в полости, герметизируемой фланцевыми соединениями с торцов двигателя. Передача крутящего момента валу РО осуществляется шлицевым соединением этого вала с ротором двигателя.

Такая конструкция используется в ИМ, где необходим небольшой шаг РО поворотного типа. Дальнейшим усовершенствованием этой конструкции является шаговый двигатель с двойным рабочим зазором, в котором более рационально используется МДС, создаваемая обмотками управления.

На рис. 4.9 показан шаговый двигатель с двойным рабочим зазором. Статор двигателя состоит из корпуса, внешнего магнитопровода 2 с катушками и внутреннего 3, между которыми смонтирован ротор 4, связанный с постоянным магнитом 5, насаженным на вал двигателя 7. Постоянный магнит 5 взаимодействует с обмотками датчика угловых перемещений 6. Такое конструктивное выполнение двигателя позволяет при прочих равных условиях примерно вдвое увеличить электромагнитный момент и значительно уменьшить момент инерции ротора. Двигатель снабжен фиксатором 1 для сцепления и расцепления ротора с валом, с помощью которого при необходимости можно вручную поворачивать ротор. Подвод питания осуществляется через герметичный электрический соединитель.

На рис. 4.10 показана конструкция шагового электродвигателя, используемого в приводе компенсирующего РО отечественного исследовательского реактора с водой под давлением СМ-2. Ротор двигателя, расположенный в воде первого контура реактора, отделен от статора немагнитной гильзой из коррозионно-стойкой стали.

#### 4.4. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Угловой шаг  $\alpha_{ш}$*  — это угол в градусах, который двигатель отработывает за один импульс управления. Он определяется конструкцией двигателя и числом тактов коммутации обмоток управления:

$$\alpha_{ш} = 360/(nz_p),$$

где  $n$  — число тактов коммутации;  $z_p$  — число зубцов ротора.

Для четырехфазных шаговых двигателей (ШД) обычно

$$\alpha_{ш} = 90/z_p.$$

*Электрический шаг*

$$\alpha_e = z_p \alpha_{ш} = 360/n.$$

*Дискретность привода*

$$c_n = \alpha_{ш}/i,$$

где  $i$  — передаточное число редуктора привода.

Статическая характеристика  $M=f(\Theta, i)$  является зависимостью момента двигателя от угла рассогласования  $\Theta$  при установившемся токе  $i$ . Расчет статических характеристик производится по формуле

$$M = kpF_{p.з}^2 d\Lambda/d\Theta,$$

где  $k$  — размерный коэффициент;  $p$  — число пар полюсов;  $F_{p.з}$  — МДС на пару полюсов, приходящаяся на рабочий зазор,  $F_{p.з} = (I\omega)_{p.з}$ , где  $I$  — сила тока,  $\omega$  — число витков;  $\Lambda$  — магнитная проводимость рабочего зазора на пару полюсов;  $d\Lambda/d\Theta$  — производная проводимости рабочего зазора на пару полюсов.

Используя гармоническую аппроксимацию магнитной проводимости, можно записать

$$\Lambda = (\Lambda_d + \Lambda_q)/2 + [(\Lambda_d - \Lambda_q)/2] \cos 2\Theta_s,$$

где  $\Lambda_d$  и  $\Lambda_q$  — продольная и поперечная магнитные проводимости. Магнитная энергия в рабочем зазоре

$$W_m = kF_{p.з}^2 \Lambda.$$

Из этих уравнений можно получить выражение для момента:

$$M = kF_{p.з}^2 (\Lambda_d - \Lambda_q) \sin 2\Theta_s,$$

причем

$$\Theta_s = z_p \Theta/2.$$

Таким образом, статический момент двигателя можно представить в простейшем случае в виде синусоидальной функции угла рассогласования.

Максимально допустимый установившийся ток  $I_{max}$  определяется тепловым режимом ШД и классом нагревостойкости электроизоляционных материалов.

Электромагнитная постоянная времени  $t$  наряду с динамической добротностью определяет быстрдействие ШД.

Индуктивность обмотки, образующей пару полюсов,

$$L_p = \omega_p \Phi_p / I,$$

где  $\omega_p$  — число витков, приходящихся на пару полюсов;  $\Phi_p$  — магнитный поток, проходящий через пару полюсов;  $I$  — ток в обмотке.

Постоянная времени обмотки

$$t = L_{об}/R_{об} = \rho L_p / (pR_p) = L_p / R_p,$$

где  $L_{об}$  и  $R_{об}$  — индуктивность и активное сопротивление всей обмотки.

Электромагнитная постоянная времени не зависит от схемы соединения полюсных катушек и уменьшается с увеличением числа пар полюсов. Индуктивность является функцией тока и поло-

жения ротора:

$$L = f(I, \Theta).$$

Статическая добротность ШД представляет собой отношение максимального статического момента к массе двигателя:

$$k_c = M_{\max}/Q.$$

Динамическая добротность определяется отношением максимального статического момента к моменту инерции ротора:

$$k_d = M_{\max}/J_p.$$

Динамическая добротность является показателем быстродействия ШД. Динамические свойства улучшаются с увеличением  $k_d$ . Соответственно динамическая добротность привода

$$k_{д,п} = M_{\max}/J_{п},$$

где  $J_{п}$  — приведенный момент инерции нагрузки.

При введении между ШД и РО редукции приведенный момент инерции уменьшается пропорционально  $i^2$ , что значительно увеличивает быстродействие привода.

#### 4.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕЕ ПРОИЗВОДНОЙ

При расчете ШД кроме расчета магнитопровода необходимо рассчитывать магнитную проводимость рабочего зазора и ее производную. Методом, который подробно изложен в § 8.4, были выведены формулы для удельной магнитной проводимости зубцовой зоны, ШД  $\lambda$  и ее производной и подтверждены экспериментально. Эти формулы имеют вид:

$$\beta = 1$$

$$\text{при } \Theta = 0$$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{\delta} \right); \quad (4.1)$$

$$\text{при } 0 \leq \Theta \leq c/(2R)$$

$$\lambda = \frac{a - R\Theta}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha R\Theta}{\delta} \right) + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + \alpha(c - R\Theta)}{\delta + \alpha R\Theta} \right] + \frac{R\Theta}{\delta + \alpha(c - R\Theta)}; \quad (4.2)$$

$$\text{при } c/(2R) \leq \Theta \leq a/R$$

$$\lambda = \frac{a - R\Theta}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right) + \right.$$



$$+ \lg \frac{\delta + \frac{1}{2} \alpha c}{\delta + \alpha (c - R\Theta)} \Big] + \frac{c - R\Theta}{\delta + \alpha (c - R\Theta)}; \quad (4.3)$$

при  $\Theta = a/R$

$$\lambda_q = \frac{9,2}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right); \quad (4.4)$$

$$\beta > 1$$

при  $\Theta = 0$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{\delta} \right); \quad (4.5)$$

при  $0 \leq \Theta \leq c/(2R)$

$$\lambda = \frac{a - R\Theta}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha R\Theta}{\delta} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + \alpha (c - R\Theta)}{\delta + \alpha R\Theta} \right] + \frac{R\Theta}{\delta + \alpha (c - R\Theta)}; \quad (4.6)$$

при  $c/(2R) \leq \Theta \leq a/R$

$$\lambda = \frac{a - R\Theta}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} + \right. \right. \\ \left. \left. + \lg \frac{\delta + \frac{1}{2} \alpha c}{\delta + \alpha (c - R\Theta)} \right) \right] + \frac{c - R\Theta}{\delta + \alpha (c - R\Theta)}; \quad (4.7)$$

при  $a/R \leq \Theta \leq (c + a)/(2R)$

$$\lambda = \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \frac{\delta + \frac{1}{2} \alpha c}{\delta + \alpha (R\Theta - a)} + \lg \frac{\delta + \frac{1}{2} \alpha c}{\delta + \alpha (c - R\Theta)} \right] + \\ + \frac{c - R\Theta}{\delta + \alpha (c - R\Theta)} + \frac{R\Theta - a}{\delta + \alpha (R\Theta - a)}; \quad (4.8)$$

при  $\Theta = (c + a)/(2R)$

$$\lambda_q = \frac{c - a}{\delta + \frac{1}{2} \alpha (c - a)} + \frac{9,2}{\alpha} \lg \frac{1 + \alpha c/(2\delta)}{1 + \frac{\alpha (c - a)}{2\delta}}. \quad (4.9)$$

Продифференцировав выражения (4.1)–(4.9), получим производные магнитной проводимости:

$$\beta = 1$$

при  $0 \leq \Theta < c/(2R)$

$$\frac{d\lambda}{d\Theta} = R \left\{ \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta + \alpha (c - R\Theta)} - \frac{1}{\delta + \alpha R\Theta} - \frac{\delta + \alpha c}{[\delta + \alpha (c - R\Theta)]^2} \right\};$$

при  $c/(2R) < \Theta \leq aR$

$$\frac{d\lambda}{d\Theta} = R \left\{ \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c - R\Theta)]^2} - \frac{2}{\delta + \alpha(c - R\Theta)} \right\};$$

$$\beta > 1$$

при  $0 < \Theta < c/(2R)$

$$\frac{d\lambda}{d\Theta} = R \left\{ \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta + \alpha(c - R\Theta)} - \frac{1}{\delta + \alpha R\Theta} - \frac{\delta + \alpha c}{[\delta + \alpha(c + R\Theta)]^2} \right\};$$

при  $c/(2R) < \Theta < a/R$

$$\frac{d\lambda}{d\Theta} = R \left\{ \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c - R\Theta)]^2} - \frac{2}{\delta + \alpha(c - R\Theta)} \right\};$$

при  $a/R < \Theta \leq (c + a)/(2R)$

$$\frac{d\lambda}{d\Theta} = R \left\{ \frac{2}{\delta + \alpha(R\Theta - a)} - \frac{2}{\delta + \alpha(c + R\Theta)} + \right.$$

$$\left. + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c - R\Theta)]^2} - \frac{\delta}{[\delta + \alpha(R\Theta - a)]^2} \right\}.$$

В этих формулах коэффициент  $\alpha$ , учитывающий неточность аппроксимации магнитных силовых линий дугами окружностей, определяется из выражения

$$\alpha = (\alpha_d + \alpha_q)/2,$$

где  $\alpha_d$  и  $\alpha_q$  — коэффициенты, соответствующие продольной и поперечной проводимостям и определяемые по графику, приведенному в гл. 8.

При ориентировочных расчетах можно только определять значения продольной и поперечной магнитных проводимостей по (4.1) — (4.9) и сделать допущение, что удельная магнитная проводимость между этими крайними положениями меняется по закону косинуса:

$$\lambda = \frac{\lambda_d + \lambda_q}{2} + \frac{\lambda_d - \lambda_q}{2} \cos k\Theta,$$

где коэффициент  $k = R\pi/c$  при  $\beta < 1$ ;  $k = R\pi/a$  при  $\beta = 1$  и  $k = 2R\pi/(a + c)$  при  $\beta > 1$ . Производная проводимости в этом случае

$$\frac{d\lambda}{d\Theta} = \frac{k(\lambda_d - \lambda_q)}{2} \sin k\Theta.$$

Приведенные формулы могут быть использованы при инженерных расчетах шаговых двигателей.

#### 4.6. УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Схема управления ШД является составным элементом дискретного привода и оказывает существенное влияние на динамический режим работы привода.

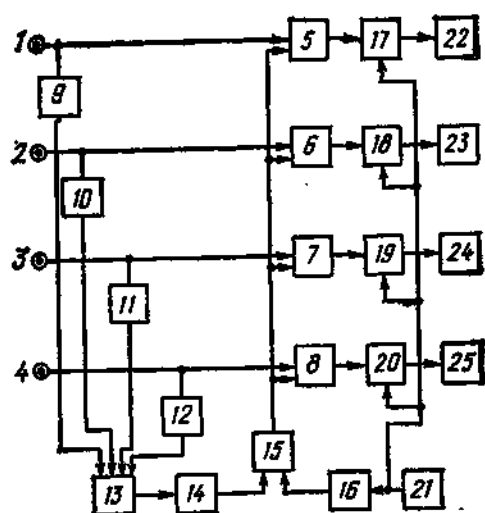


Рис. 4.11. Структурная схема устройства для управления шаговым двигателем

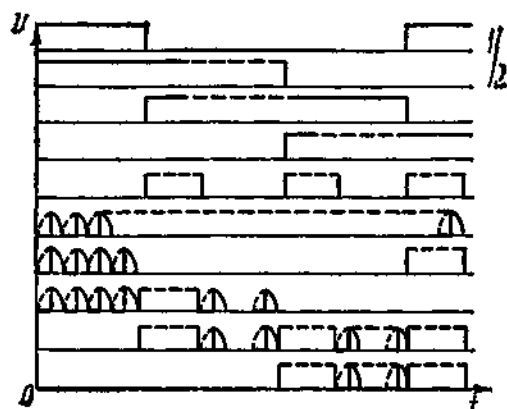


Рис. 4.12. Временные диаграммы напряжений

Оптимальный вариант дискретного привода с силовым ШД выбирается совместным рассмотрением характеристик привода, ШД и схемы управления. Устройство управления должно обеспечить заданный режим работы во всем рабочем диапазоне частот, а также реверс двигателя и фиксацию ротора при рабочем моменте нагрузки. В общем виде схема управления ШД включает формирователь импульсов, распределитель и усилитель. Использование в последнее время в схемах управления ШД тиристоров открыло перспективу создания бесконтактных систем дискретного действия с силовыми ШД.

В качестве примера приведем схему управления силовыми ШД на тиристорах с форсированными режимами коммутации. Сущность этой схемы заключается в том, что управление тиристорными выпрямителями в тормозном режиме ШД (ротор неподвижен) осуществляется сигналом, поступающим от магнитного усилителя с постоянным подмагничиванием, обеспечивающим заданный угол насыщения, а в момент коммутации (при подаче очередного импульса управления) — сигналом постоянного тока от элемента выдержки времени (одновибратора), обеспечивающего полное открытие тиристоров и создающего тем самым форсированный режим питания обмоток ШД.

Структурная схема устройства приведена на рис. 4.11.

На рис. 4.12 показаны временные диаграммы напряжений. Устройство (см. рис. 4.11) имеет четыре входа 1—4, каждый из которых соединен с соответствующим логическим элементом И 5—8 и, кроме того, через дифференцирующие элементы 9—12 и логический элемент ИЛИ 13 — с элементом задержки времени 14, в качестве которого используется одновибратор. Выход элемента 14 соединен с одним входом логического элемента ИЛИ 15, второй вход которого соединен с выходом магнитного усилителя 16, имеющего форсированное подмагничивание постоянным

током. Выход элемента 15 соединен со вторыми входами логических элементов 5—8, выходы которых соединены с управляющими входами регулируемых тиристорных выпрямителей 17—20. Питание выпрямителей и магнитного усилителя осуществляется от одного источника переменного тока 21. Нагрузкой каждого выпрямителя является соответствующая обмотка шагового двигателя 22—25, вход которого соединен с выходом магнитного усилителя 16, имеющего сформированное подмагничивание постоянным током.

Устройство работает следующим образом. Управляющие сигналы в виде напряжения постоянного тока поступают на входы 1—4, определяя порядок коммутации токов в обмотках ШД, причем в любой момент времени сигналы присутствуют на двух входах. Можно принять за исходное состояние присутствие сигналов на входах 1 и 2. На выходе элемента 14 напряжение  $U=0$ . В этих условиях сигналы, поступающие с выходов элементов 5 и 6 на входы выпрямителей 17 и 18, повторяют по форме напряжение, полученное с помощью магнитного усилителя 16, постоянное подмагничивание которого определяет угол насыщения. Этот угол выбирается из условия получения в обмотках ШД тормозного тока. На входах 3 и 4 сигналы отсутствуют, соответственно равны нулю напряжения и токи нагрузки выпрямителей 19 и 20.

При очередной коммутации исчезает сигнал на входе 1 и соответственно на выходе выпрямителя 17 и появляется сигнал на входе 3. Этот сигнал передним фронтом через цепочку 11 и элемент 13 запускает элемент выдержки времени 14, выходной сигнал которого в виде импульса напряжения постоянного тока проходит через элементы 15, 6 и 7 на входы выпрямителей 18 и 19, обеспечивая полную проводимость каждого тиристора в течение положительной полуволны питающего напряжения и подачу тем самым на обмотки ШД полного напряжения питания и, следовательно, увеличение токов в обмотках. Длительность этого форсированного импульса тока определяется временем выдержки элемента 14 и должна быть не менее времени перемещения ротора ШД в новое положение. После окончания импульса одновибратора токи в обмотках уменьшаются до значения, определяемого напряжением. Аналогично происходит формирование токов в обмотках и при других возможных коммутациях входных сигналов.

Таким образом, схема обеспечивает форсированное нарастание тока во вновь включенной обмотке. При этом повышается быстродействие схемы вследствие исключения запаздывания, вносимого магнитным усилителем, повышается приемистость и увеличивается жесткость механических характеристик, так как осуществляется одновременно увеличение тока в двух включенных обмотках.

## СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В соответствии с правилами ядерной безопасности система сигнализации реакторной установки должна выдавать сигналы, фиксирующие положение РО СУЗ. Желательно также иметь устройства для аналогового изображения положения в реакторе РО СУЗ. Правила ядерной безопасности требуют также, чтобы все исполнительные механизмы СУЗ имели указатели положения и конечные выключатели, срабатывающие по возможности в зависимости от положения РО [22]. Основное требование к средствам измерения положения РО заключается в том, что конструкция устройств, осуществляющих эти функции, должна обеспечить надежную информацию о положении РО при любых неисправностях в реакторе и системе СУЗ.

За последнее время в Советском Союзе и за рубежом разработано значительное количество средств измерения положения РО, основанных на различных принципах действия: контактные и бесконтактные, индуктивные и т. п. Специфические условия работы ИМ на ядерных реакторах требуют, чтобы средства измерения положения РО обладали повышенной надежностью и долговечностью в эксплуатации при работе в условиях изменения температуры окружающей среды и заданных колебаний напряжения и частоты питающей сети.

Для измерения положения РО в активной зоне ядерного реактора используются системы индикации, в которые входят датчики и схемы их включения. Датчики, устанавливаемые непосредственно в ИМ, вырабатывают сигналы, пропорциональные перемещению РО, или подают сигналы о нахождении РО в определенных положениях. Схемы включения датчиков состоят из электронных и электрических элементов и индикаторов положения РО. Все перечисленные элементы систем индикации тесно взаимосвязаны. В задачи конструктора, разрабатывающего механизм управления, входит обычно только выбор или разработка того или иного типа датчика, а иногда и прибора индикации положения РО. Тем не менее эта разработка должна вестись с пониманием структуры системы индикации в целом, с учетом основных требований, предъявляемых этой системой к конструкции и характеристикам датчиков и индикаторов. Ниже рассмотрены некоторые системы индикации положения РО, а также вопросы конструирования и расчета датчиков положения. Расчет и разработка электрических и электронных элементов схем включения не входят в задачи этой книги.

## 5.2. СИСТЕМЫ ИНДИКАЦИИ С ДАТЧИКАМИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В качестве датчиков угловых перемещений в ИМ ядерных реакторов часто используются бесконтактные сельсины. Сельсины применяются как в негерметичных, так и в герметичных ИМ. Основным достоинством систем индикации с сельсинами является возможность обеспечения самосинхронизации сельсина-датчика и сельсина-указателя после устранения неисправностей в ИМ, например при временном отключении питания. Однако самосинхронизация возможна только в пределах одного оборота сельсина, поэтому обычно в ИМ сельсин-датчик получает вращение через понижающую передачу, обеспечивающую поворот сельсина за полный ход РО на угол, несколько меньший  $360^\circ$ . В герметичных ИМ вращение сельсину-датчику передается через герметичные электромагнитные или магнитные муфты.

Индикаторные приборы-указатели положения РО часто выполняют стрелочного типа. Конструкция указателя положения с однооборотным сельсином показана на рис. 5.1. Указатели положения РО АР размещают на пульте оператора ядерной энергетической установки. Указатели положения других РО находятся на

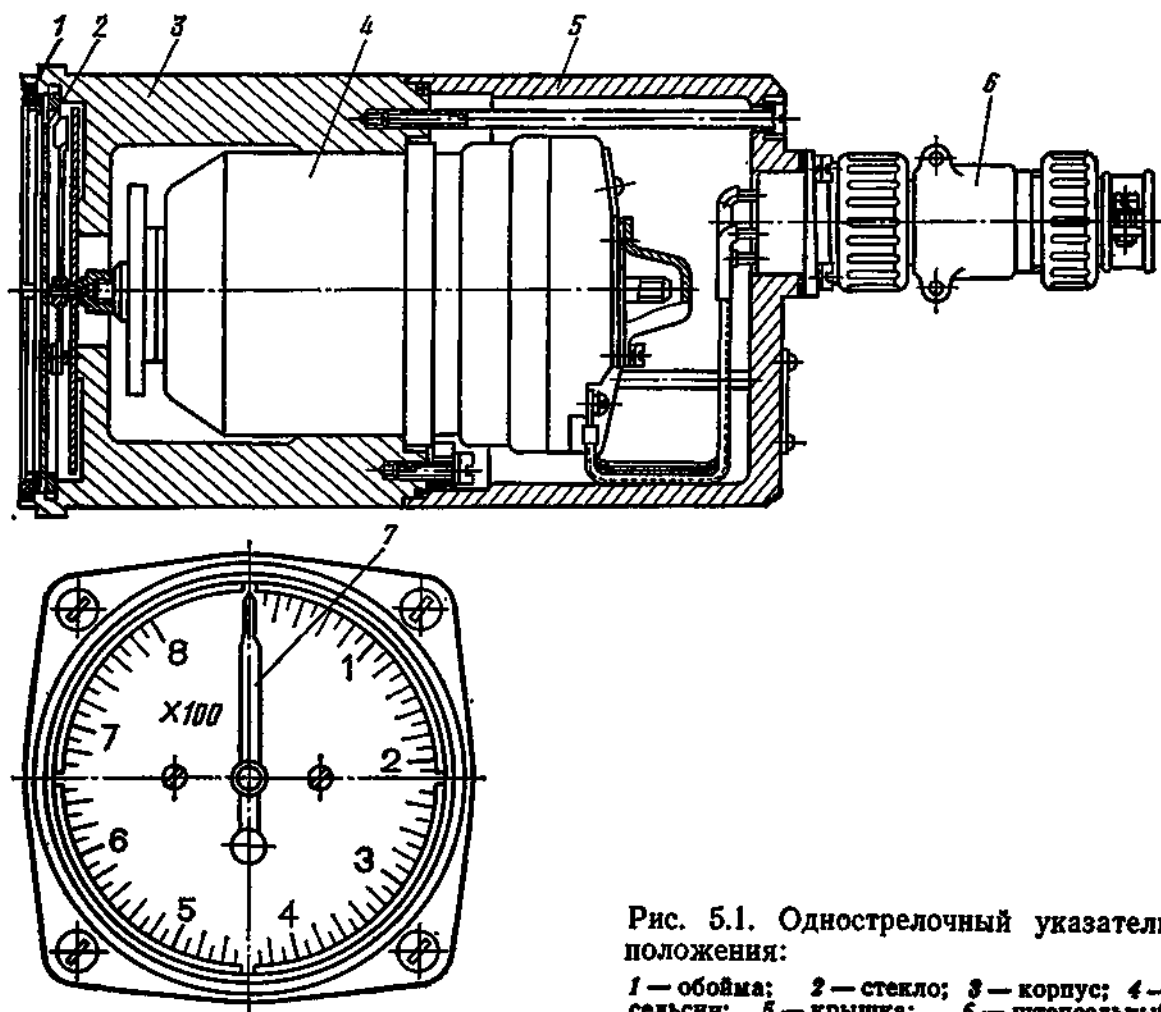


Рис. 5.1. Однострелочный указатель положения:

1 — обойма; 2 — стекло; 3 — корпус; 4 — сельсин; 5 — крышка; 6 — штепсельный разъем; 7 — стрелка

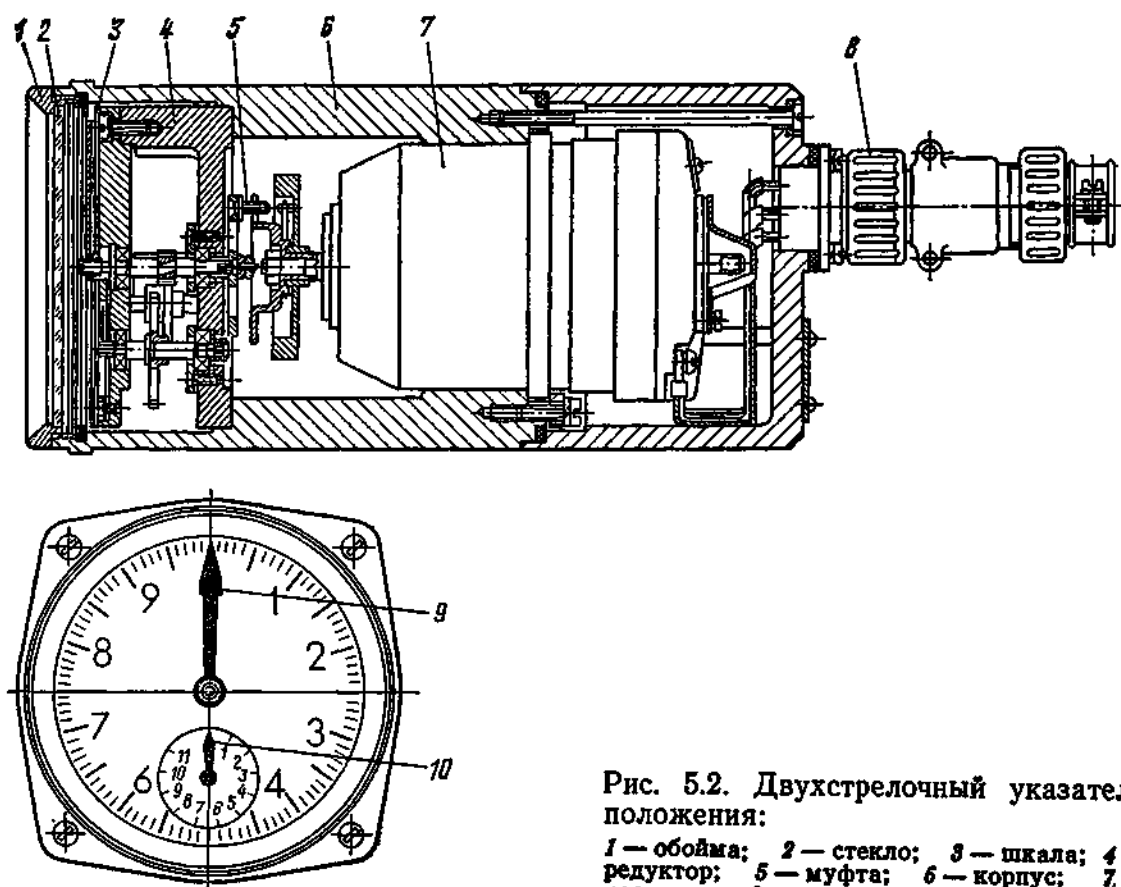


Рис. 5.2. Двухстрелочный указатель положения:

1 — обойма; 2 — стекло; 3 — шкала; 4 — редуктор; 5 — муфта; 6 — корпус; 7 — сельсин; 8 — штепсельный разъем; 9, 10 — стрелки

щите оператора. В ряде случаев используют указатели положения с многооборотными сельсинами (рис. 5.2). Указатель имеет несколько стрелок, которые на соответствующей шкале показывают положение РО соответственно в миллиметрах, сантиметрах и метрах (или в сантиметрах и метрах). Передача между осями стрелок выбирается таким образом, чтобы передаточные отношения были кратными десяти.

В герметичных ИМ используют датчики угловых перемещений, работающие со стандартными сельсинами-приемниками [15]. Датчик имеет статор, расположенный вне герметичного объема, и ротор, вращающийся внутри герметичного объема. Ротор отделен от статора цилиндрической оболочкой из нержавеющей стали, рассчитанной на давление первого контура реактора или контура охлаждения РО. Ротором служит постоянный магнит, намагниченный в радиальном направлении. Статор имеет кольцевой магнитопровод, одну первичную обмотку и три вторичные, соединенные звездой (рис. 5.3, а). Каждая вторичная обмотка состоит из двух обмоток, расположенных на магнитопроводе диаметрально противоположно и соединенных встречно. Вторичные обмотки соединяются с обмотками синхронизации сельсина-приемника (см. рис. 5.3, б). Первичная обмотка питается от источника переменного напряжения через однополупериодный выпрямитель. При вращении постоянного магнита изменяется состояние магнитной систе-

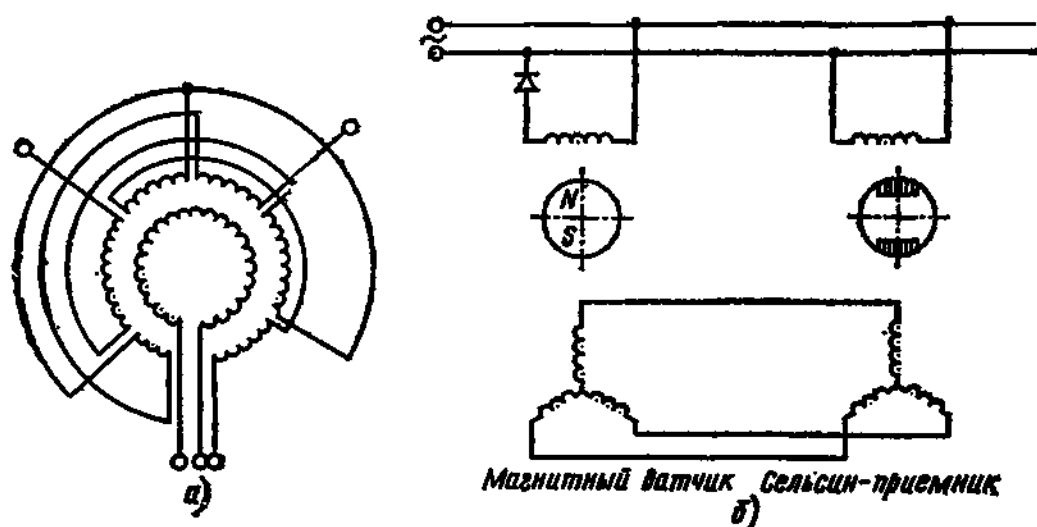


Рис. 5.3. Схема соединения обмоток датчика угловых перемещений (а) и обмоток датчика с обмотками сельсина-приемника (б)

мы. При вращении ротора в каждой из половин вторичной обмотки индуцируется ЭДС, огибающая которой близка по форме к полусинусоиде. При встречном включении двух диаметрально противоположных обмоток в каждой вторичной обмотке наводится ЭДС, по форме близкая к синусоиде. Шесть обмоток, размещенных на магнитопроводе, позволяют получить систему трех синусоидально изменяющихся ЭДС, сдвинутых по фазе на  $120^\circ$ .

Герметичные датчики угловых перемещений используются с многооборотными или однооборотными сельсинами-приемниками, в последнем случае ротор датчика получает вращение через понижающую передачу.

В обоих случаях при использовании датчика угловых перемещений отпадает надобность в магнитных муфтах для передачи вращения из герметически закрытого объема.

### 5.3. СИСТЕМЫ ИНДИКАЦИИ С ДАТЧИКАМИ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В настоящее время в связи с развитием и совершенствованием линейных ИМ ядерных реакторов получают все большее распространение системы индикации с датчиками линейных перемещений, которые используются и в ИМ с преобразователями вращения типа винт — гайка и рейка — шестерня. В этом случае элементы, воздействующие на соответствующие узлы датчика, вырабатывающие сигнал, укрепляют на продолжении рейки или винта, связанных с РО. В том и другом случае датчики линейного перемещения вырабатывают сигналы о непосредственном положении РО в активной зоне ядерного реактора. Это преимущество предопределило широкое распространение систем индикации с датчиками линейных перемещений [26].



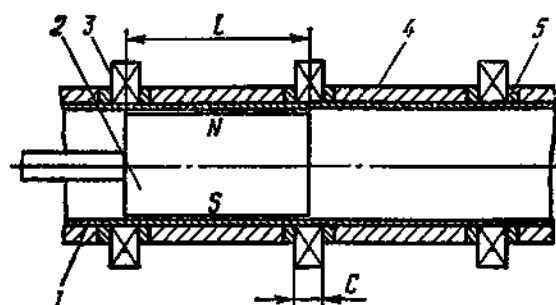


Рис. 5.4. Линейный датчик с постоянным магнитом:

1 — труба; 2 — постоянный магнит; 3 — дроссель; 4 — магнитный шунт; 5 — немагнитная приставка

**Система индикации с линейным датчиком и постоянным магнитом.** В ИМ получила распространение система индикации положения РО с линейным датчиком (рис. 5.4), срабатывание которого происходит от постоянного магнита, связанного через промежуточный элемент с РО. На трубе из немагнитного материала на равном расстоянии друг от друга расположены дроссели. Дроссель представляет собой тороидальный сердечник с двумя обмотками, соединенными последовательно и согласованно, т. е. магнитные потоки от обеих обмоток совпадают по направлению (рис. 5.5). Постоянный магнит выполнен в виде цилиндра, намагниченного по диаметру (рис. 5.6). Датчик работает следующим образом. В отсутствие постоянного магнита сигнал на выходе всех дросселей равен нулю, так как сердечники дросселей не насыщены. При движении постоянного магнита через любой из дросселей магнитный поток постоянного магнита выводит рабочую точку этого дросселя в зону насыщения; сигнал на выходе дросселя резко возрастает. Сигнал от дросселя поступает в схему индикации положения РО.

Функциональная схема индикации положения РО приведена на рис. 5.7. Схема работает следующим образом. Все дроссели (в данном примере — 10) разбиты на две группы. В одну группу входят дроссели с четными номерами, в другую — с нечетными. Сигналы от обеих групп поступают в устройство сравнения — схему, где происходит сравнение этих сигналов по абсолютному значению. В зависимости от того, находится или нет дроссель той или иной группы в насыщении, логическая схема выдает сигнал или

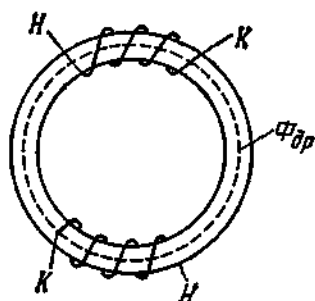


Рис. 5.5. Схема обмоток дросселя

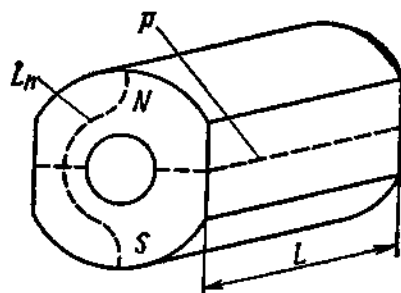


Рис. 5.6. Постоянный магнит датчика

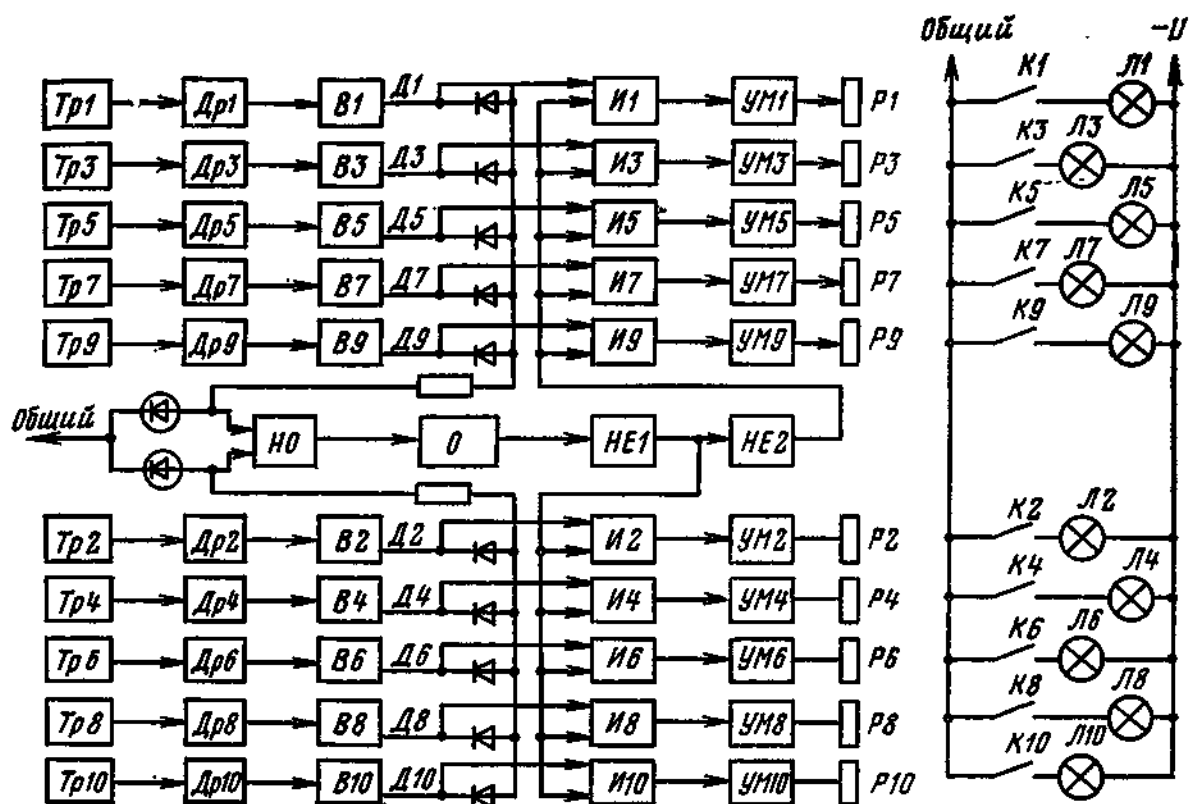


Рис. 5.7. Функциональная схема системы индикации с линейным датчиком и постоянным магнитом:

Тр1—Тр10 — трансформаторы питания; Др1—Др10 — дроссели; НО — нуль-орган; В1—В10 — выпрямители; О — одновибратор; Д1—Д10 — диоды; И1—И10, НЕ1, НЕ2 — логические элементы; УМ1—УМ10 — усилители; Р1—Р10 — обмотки реле; К1—К10 — контакты реле; Л1—Л10 — индикаторные лампочки

этот сигнал отсутствует. Срабатывание стандартных логических элементов НЕ1 и НЕ2 происходит в зависимости от того, есть сигнал с одновибратора или нет. Если сигнал отсутствует, то срабатывает элемент НЕ1 и запитывает элементы И четной группы, и наоборот, если есть сигнал, то срабатывает элемент НЕ2 и запитывает элементы И нечетной группы.

Элементы И сравнивают сигналы, поступающие от элементов НЕ, и сигналы с выходов дросселей, и в зависимости от того, какой дроссель находится в насыщении, включается соответствующий усилитель УМ. Усиленный сигнал подается на обмотку соответствующего реле, которое замыкает контакты цепи индикаторной лампочки.

Расчет элементов линейного датчика проводится по методике, приведенной в [6].

Линейный датчик положения регулирующего органа с магнитоуправляемыми контактами. Рассмотренная система датчика с постоянным магнитом и дросселями насыщения имеет тот недостаток, что для обработки сигналов, поступающих с дросселей, требуется довольно сложная вторичная система, включающая схемы логики, усилители и др. Эта система может быть существенно

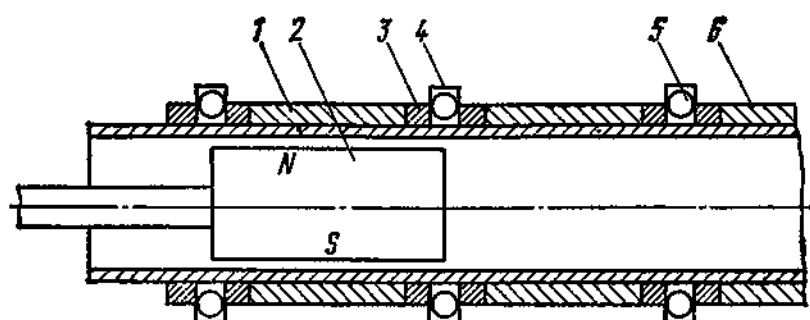


Рис. 5.8. Линейный датчик с магнитоуправляемыми контактами

упрощена, если вместо дросселей использовать магнитоуправляемые контакты (рис. 5.8). На немагнитную трубу 1 надеваются магнитопроводы 4, в которых находятся сборки с магнитоуправляемыми контактами 5. Внутри трубы может перемещаться постоянный магнит 2. Между магнитопроводами расположены магнитные шунты 6 и немагнитные вставки 3. Магнитный поток постоянного магнита всегда проходит по одному из магнитопроводов, остальная часть потока, создаваемого постоянным магнитом, шунтируется шунтом 6, предотвращая преждевременное срабатывание магнитоуправляемых контактов на соседнем магнитопроводе. Подбором немагнитных вставок 3 достигается необходимая точность срабатывания.

В магнитопровод (рис. 5.9) вмонтированы сборки с магнитоуправляемыми контактами (рис. 5.10). Как видно на рис. 5.9, в каждом магнитопроводе установлены два магнитоуправляемых контакта, что позволяет повысить надежность системы путем резервирования, так как при выходе одного контакта второй может работать.

Ввиду того что магнитоуправляемые контакты рассчитаны на токи до нескольких ампер, сигнальные устройства можно включить непосредственно в их электрические цепи и тем самым отказаться от сложной вторичной аппаратуры.

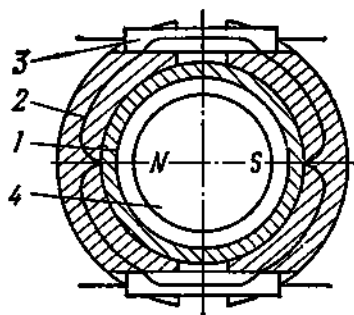


Рис. 5.9.

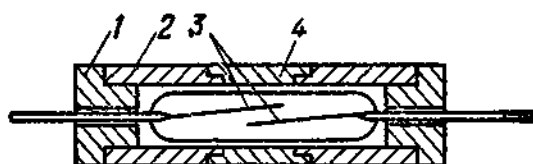


Рис. 5.10.

Рис. 5.9. Магнитопровод магнитоуправляемых контактов:

1 — труба; 2 — полукольцо; 3 — сборка с магнитоуправляемыми контактами; 4 — постоянный магнит

Рис. 5.10. Сборка с магнитоуправляемым контактом:

1 — изоляционная втулка; 2 — магнитопровод; 3 — магнитоуправляемые контакты; 4 — немагнитная вставка

# УДЕРЖИВАЮЩИЕ, УСКОРЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

## 6.1. УСКОРЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Для разгона подвижной системы привода при аварийном срабатывании может использоваться сила тяжести, а также механические, электромагнитные, гидравлические или пневматические устройства. Наиболее часто применяют ускорители в виде пружин сжатия. Выбор характеристик пружин производится на основании расчета скорости и продолжительности движения. Общий случай движения подвижной системы привода под действием пружины описывается уравнением

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = P - Q \cos \alpha - fQ \sin \alpha,$$

где  $Q$  — сумма массы груза и  $1/3$  массы пружины;  $f$  — коэффициент трения скольжения;  $\alpha$  — угол отклонения оси пружины от вертикали;  $P$  — усилие пружины в данный момент времени, равное  $P_0 - P_0 x/H$ , где  $P_0$  — усилие предварительного поджатия сжатой пружины;  $H$  — рабочий ход пружины;  $x$  — текущая координата. Решение этого уравнения дает значение пройденного пути в любой момент времени  $t$

$$x = HP (1 + Q/P_0) (1 - \cos Pt),$$

а также значение скорости движения груза в любой момент времени  $t$

$$dx/dt = HP (1 + Q/P_0) \sin Pt.$$

При расчете продолжительности движения необходимо учитывать воздействие среды.

В ряде конструкций для обеспечения времени срабатывания АЗ в качестве ускорителей применены пневматические или гидравлические устройства. Расчет этих устройств выполняется по формулам и методикам, приведенным в [6] и гл. 7.

В некоторых конструкциях для создания ускорения подвижной системы применяются линейные асинхронные электродвигатели и электромагнитные импульсные генераторы, питание которых осуществляется от цепи с конденсатором. Импульсный разряд конденсатора служит источником энергии для разгона. Электромагнитный импульсный генератор представляет собой катушку и подвижное короткозамкнутое кольцо, соединенное с тягой РО. При импульсном разряде конденсатора через катушку в короткозамкнутом кольце возникает ток, при прохождении которого создается сила, отталкивающая кольцо от катушки. В качестве быстродействующего переключателя, пропускающего ток большой силы (примерно 100 А) за весьма короткий период, используют игнетрон.

Время зажигания игнетрона примерно  $5 \cdot 10^{-6}$  с. Длительность импульса

$$T_s \approx \pi \sqrt{LC},$$

где  $L$  — индуктивность катушки;  $C$  — емкость конденсатора.

В одном из действующих устройств ускоряемый стержень массой 20 кг примерно за 0,4 с после воздействия разгоняющего импульса проходит путь примерно 1 м.

В ряде случаев специальные ускорители не применяются, а используется сила тяжести подвижной системы.

## 6.2. УДЕРЖИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Для обеспечения, удержания и освобождения подвижной системы в ИМ применяются различного рода удерживающие защелки и муфты, основное назначение которых при аварийном сигнале быстро отсоединить инерционные части привода от подвижной системы.

Разберем некоторые типовые конструкции удерживающих устройств.

**Шариковая защелка с электромагнитным управлением** (рис. 6.1). Электромагнит 1 удерживает якорь 2, фасонная втулка 3 которого запирает шарики 5, удерживающие захват 6, связанный с РО. При обесточивании электромагнита якорь и втулка под действием пружины 7 отходят до упора 9, освобождая шарики 5, которые под действием радиальной составляющей нагрузки, действующей на скосе обоймы 6, западают в полость 4, освобождая обойму. При взведении РО в исходное положение якорь 2 и втулка 3 досылаются до соприкосновения с плоскостью электромаг-

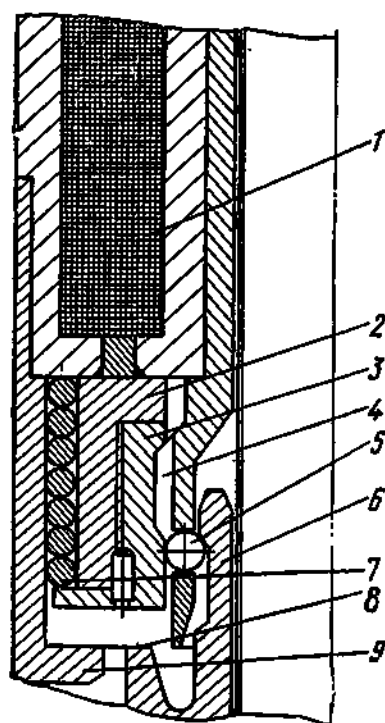


Рис. 6.1. Защелка с шариковым замком

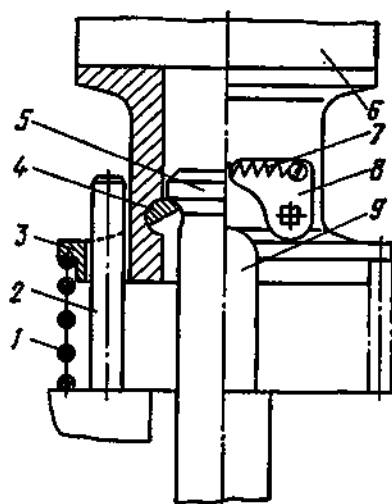


Рис. 6.2. Защелка с кулачковым захватом

та выступами 8 обоймы 6 при движении ее в верхнее положение. Использование защелок подобного типа позволяет с помощью электромагнита относительно небольшой мощности удерживать довольно значительный вес, приложенный к обойме 6, даже при воздействии ударных и вибрационных нагрузок, что особенно важно при разработке ИМ для реакторов сейсмостойких АЭС.

Основной недостаток рассмотренной конструкции в том, что при удержании больших грузов на поверхностях, контактирующих с шариками, возникают значительные контактные напряжения. Поэтому твердость поверхностей деталей 3 и 6, контактирующих с шариком 5, должна быть больше твердости шарика.

**Защелка с кулачковым захватом и электромагнитом (рис. 6.2).** При обесточивании электромагнита 6 шток 5, соединенный с регулирующим органом и через поворотные шпонки 4 с якорем 3, начинает двигаться вниз и кулачками 8, связанными с поворотными шпонками, находит на неподвижный штырь 9. При этом кулачки и шпонки поворачиваются, освобождая шток для дальнейшего свободного падения. Якорь и кулачки под воздействием пружин 1 и 7 возвращаются в исходное положение. Штифты 2 служат для направления якоря 3. Конструкция защелок подобного рода нашла применение в приводах реактора I блока Нововоронежской и других АЭС. Недостаток конструкции заключается в том, что в ней электромагнит непосредственно удерживает груз, а это требует увеличения размеров электромагнита. Достоинство защелок подобного типа в том, что их применение дает возможность уменьшить диаметральные размеры канала (трубы, корпуса), так как в этом случае диаметр направляющей трубы не определяется диаметром якоря электромагнита.

**Рычажная защелка с электромагнитом.** Во многих реакторах АЭС за рубежом применены электромагнитные ИМ фирмы Westinghouse, в конструкции которых использована типовая рычажная защелка, управляемая электромагнитом (рис. 6.3). Защелку подобного типа можно применять и для удержания РО во взведенном состоянии. Принцип действия такой защелки заключается в следующем. Связанный с РО шток 1 с кольцевыми канавками входит во внутреннюю полость электромагнита 5, при включении которого подвижный якорь 4 притягивается к неподвижному 2, тем самым вводят захваты 3 в зацепление со штоком. Преимущество защелки подобного типа заключается в том, что при относительно малой мощности электромагнит может удерживать значительный груз. При обесточивании электромагнита 5 захваты под действием радиальной составляющей от нагрузки и пружины 6 выходят из зацепления со штоком 1.

К недостаткам конструкции можно отнести то обстоятельство, что для обеспечения подвижности шарнирных соединений захвата при длительном нахождении в воде первого контура реактора конструкция шарниров должна быть тщательно отработана.

**Однодисковая фрикционная муфта.** В ИМ, работающих в воздушной среде, наиболее часто применяются однодисковые фрикци-

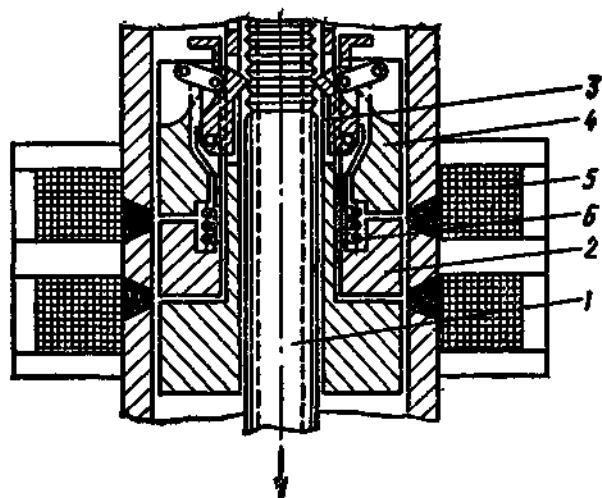


Рис. 6.3. Рычажная защелка

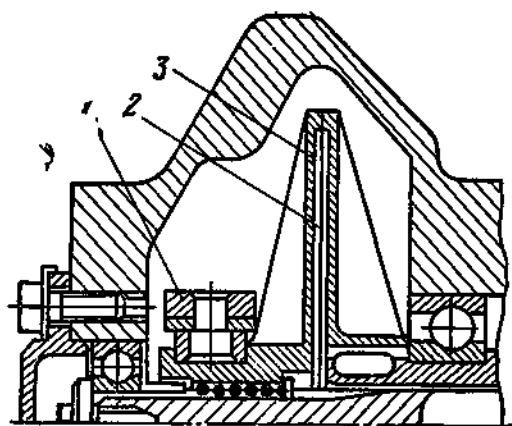


Рис. 6.4. Фрикционная дисковая сцепная муфта

онные сцепные муфты (рис. 6.4). Муфта имеет два фрикционных диска, один из которых — подвижный (диск 3) — на валу на шариковой шпонке, а второй — неподвижный 2 — установлен на полум валу. Для сцепления диск перемещается рычагом 1 по шариковой шпонке. При сцеплении дисков вращение от вала, на котором сидит диск, может быть передано полум валу.

К положительным особенностям такой муфты можно отнести малый рабочий ход подвижного замка при сцеплении и расцеплении и как следствие этого простоту кинематической цепи управления подвижным диском, безударное включение и выключение.

К недостаткам фрикционных сцепных муфт относятся: необходимость тщательной регулировки и притирки полумуфт при монтаже; потенциальная возможность проскальзывания полумуфт при вибрациях и попадании смазки; значительные габаритные размеры при передаче больших крутящих моментов.

Крутящий момент, передаваемый фрикционной муфтой,

$$M_{кр} = (\pi/2) f p \Psi D_{ср}^3,$$

где  $f$  — коэффициент трения материалов дисков;  $p$  — давление между дисками;  $\Psi = b/D_{ср}$ . В последнем выражении  $b$  — ширина рабочей площадки диска;  $D_{ср}$  — средний диаметр рабочей плоскости диска.

В некоторых конструкциях ИМ в целях обеспечения надежного сцепления и расцепления в условиях воздействия воды первого контура, а также в целях сокращения диаметральных габаритных размеров применяются кулачковые сцепные муфты, управляемые электромагнитом. Конструкция кулачковой муфты в основном аналогична конструкции фрикционной муфты, только на обоих дисках нарезаны зубцы, которые для удобства включения часто имеют коническую форму.

Основным недостатком кулачковых сцепных муфт является включение их на ходу с ударом при большой разности угловых

скоростей сцепляемых валов. Крутящий момент, передаваемый кулачковой муфтой, определяется из условий прочности материала контакта на сжатие:

$$M_{кр} = r_{ср} b h z [\sigma_{сж}],$$

где  $r_{ср}$  — средний радиус муфты по кулачкам;  $b$  — длина кулачка;  $h$  — высота кулачка;  $z$  — число кулачков;  $[\sigma_{сж}]$  — допустимое напряжение сжатия.

**Герметичная электромагнитная муфта.** В целях быстрого отсоединения подвижной системы механизма, находящейся в первом контуре реактора, от остальной, негерметичной части привода в конструкции ИМ применяют герметичные электромагнитные муфты.

Электромагнитная герметичная муфта (рис. 6.5) имеет немагнитный корпус 5, на котором установлена катушка 4. При включении катушки магнитный поток проходит по внешней трубе через магнитопровод 1, часть корпуса 2 из магнитомягкого материала, ведомый вал 3, расположенный внутри герметичного корпуса, немагнитную трубу корпуса и ведущий вал 6. Ведущий вал и расположенная напротив него часть ведомого вала имеют явно выраженные полюсы. При рассогласовании ведущего и ведомого валов на некоторый угол  $\varphi$  возникает электромагнитный момент, который обычно равен моменту сил сопротивления, приведенному к ведомому валу. При реверсировании муфты ведомый вал может поворачиваться относительно ведущего на угол  $2\varphi$ . Этот угол соответствует ошибке при изменении направления вращения муфты, которая может быть уменьшена с помощью рационального выполнения полюсов на ведущем и ведомом валах. Электромагнитный момент муфты зависит от толщины немагнитной трубы корпуса, через которую проходит магнитный поток от ширины полюсов или зубцов на обоих валах и от МДС, создаваемой катушкой. Момент электромагнитной муфты может быть увеличен путем увеличения числа зубцов на ведущем и ведомом валах. Ведомый вал или та его часть, через которую проходит магнитный поток, обычно изготавливается из магнитомягкой коррозионно-стойкой стали.

Иногда ведомый вал изготавливают из обычных электротехнических сталей с применением покрытий, стойких к коррозии в среде первого контура реактора.

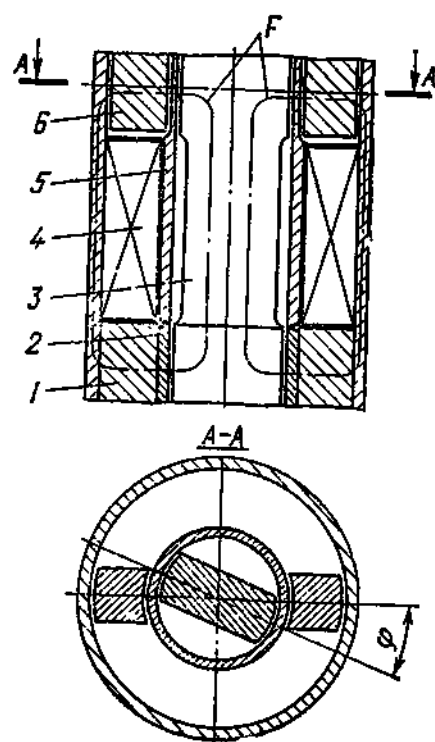


Рис. 6.5. Электромагнитная герметичная муфта



Расчет электромагнитных муфт в основном сводится к определению их статических характеристик. Статический синхронизирующий момент электромагнитной муфты может быть определен по энергии, накопленной в рабочем зазоре. Работа при повороте ротора

$$W_{p.s} = \int_0^{\Phi} F_{p.s} d\Phi.$$

Статический синхронизирующий момент

$$M_{ст} = dW_{p.s}/d\Theta$$

или

$$M_{ст} = kF_{p.s}^2 d\Lambda_{p.s}/d\Theta,$$

где  $F_{p.s}$  — МДС в рабочем зазоре;  $\Phi$  — магнитный поток;  $\Lambda_{p.s}$  — магнитная проводимость рабочего зазора;  $k$  — постоянный коэффициент;  $\Theta$  — угол рассогласования полюсов или зубцов муфты. Магнитная проводимость для рабочих зазоров, не превышающих 1 мм, и статический синхронизирующий момент могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в гл. 4.

Расчет обмоток электромагнитной муфты аналогичен расчету обмоток других электрических машин [24].

Следует отметить, что строгое решение задачи определения статического синхронизирующего момента муфты весьма сложно из-за нелинейности магнитного сопротивления магнитопровода. Поэтому чаще всего эту задачу решают графоаналитическим методом.

Основной недостаток электромагнитных муфт — их чувствительность к динамическим перегрузкам; в период действия перегрузки угол рассогласования зубцов ротора и статора муфты изменяется, что может приводить к нежелательным колебаниям РО и даже к срыву муфты.

Это явление следует учитывать при выборе основных параметров муфты.

### 6.3. ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Фрикционный амортизатор.** При срабатывании аварийной защиты РО накапливают во время ускоренного движения значительную кинетическую энергию. Во избежание ударных нагрузок на элементы ИМ предусматривают специальные тормозные или демпфирующие устройства, обеспечивающие плавное торможение РО в конце его хода.

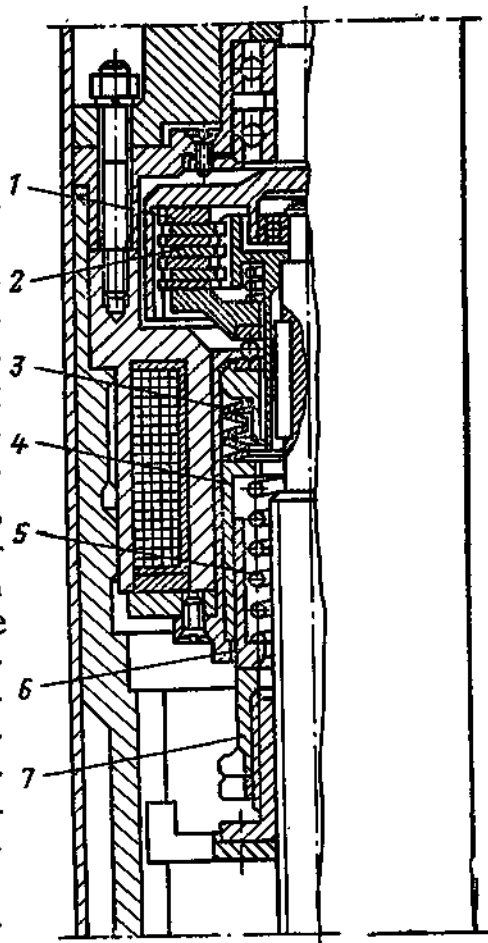
Кинетическая энергия РО и связанных с ним перемещаемых элементов должна, как правило, необратимо преобразоваться при торможении, например, в тепловую энергию.

В ИМ некоторых исследовательских ядерных реакторов для торможения используются фрикционные тормозные устройства.

Рис. 6.6. Удерживающая и тормозная муфты:

1, 2 — фрикционные диски; 3 — пружины сцепления; 4 — стакан упорный; 5 — пружина тормозная; 6 — стакан подвижный; 7 — тормозная гайка

Рассмотрим конструкцию фрикционного тормозного устройства на примере универсального механизма, применяемого на исследовательских реакторах. В качестве преобразователя движения в этом механизме используются пары рейка—шестерня или барабан—трос. Основной элемент ИМ — фрикционная электромагнитная муфта, выполняющая функции удерживающего и тормозного устройств. Когда электромагнит включен, фрикционные диски поджаты и при вращении двигателя движение через муфту передается РО. При аварийной ситуации электромагнит обесточивается, фрикционные диски расходятся и РО под действием силы тяжести вводится в активную зону реактора.



На рис. 6.6 показано электромагнитное удерживающее и тормозное устройство с многодисковой фрикционной муфтой и двумя пружинами. Для удерживания РО здесь используются тарельчатые пружины. Это устройство позволяет при относительно небольших усилиях и размерах электромагнита создать значительные тормозные моменты муфты. Многодисковая муфта имеет диски 1, связанные с самотормозящим редуктором, и диски 2, связанные с барабаном механизма, на который намотан трос с закрепленным на нем РО. При включении электромагнита сжимаются пружины 3 и муфта сцепляется. При торможении гайка 7, воздействуя на стакан 4 через менее жесткие пружины 3, передает усилие вращающимся дискам 2, при трении которых о неподвижные диски происходит торможение РО.

Момент трения, создаваемый многодисковым тормозом, можно определить как

$$M_{\text{тр}} = (2/3) \mu_{\text{ф}} P_{\text{ср}} k (r_1^3 - r_2^3) / (r_1^2 - r_2^2),$$

где  $\mu_{\text{ф}}$  — коэффициент трения фрикционных дисков;  $P_{\text{ср}}$  — среднее усилие пружины,  $P_{\text{ср}} = (P_1 + P_2) / 2$ ;  $k$  — число соприкасающихся поверхностей;  $r_1$  и  $r_2$  — наружный и внутренний радиусы фрикционных дисков. Или

$$M_{\text{тр}} = (2/3) \mu_{\text{ф}} P_{\text{ср}} k R_{\text{экв}},$$

где

$$R_{\text{экр}} = (r_1^3 - r_2^3)/(r_1^2 - r_2^2).$$

Соответственно и работа трения фрикционных дисков будет равна

$$A_{\text{ф.д}} = (4/3) \mu_{\text{ф}} P_{\text{ср}} k R_{\text{экр}} (h_{\text{тор}}/D_0) i,$$

где  $h_{\text{тор}}$  — зона торможения РО;  $D_0$  — диаметр барабана;  $i$  — передаточное число от барабана к фрикционному диску.

Пренебрегая при предварительных расчетах работой сил трения в винтовой паре, можно приравнять работу трения фрикционных дисков работе падающего с высоты  $H$  груза силой тяжести  $Q$ , т. е.

$$QH = (4/3) \mu_{\text{ф}} P_{\text{ср}} k R_{\text{экр}} (h_{\text{тор}}/D_0) i.$$

Задаваясь конструктивными параметрами, из последнего соотношения можно определить усилие пружины или эквивалентный радиус фрикционных дисков.

Сжатие пружины при включении электромагнита

$$\delta_{\text{п}} = lk,$$

где  $l=0,05 \div 0,1$  — зазор между трущимися поверхностями. Тяго-

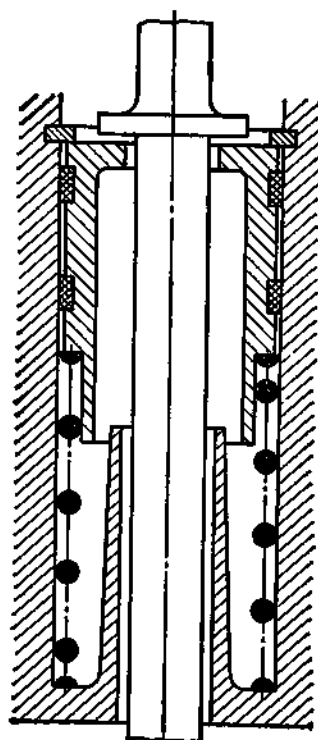
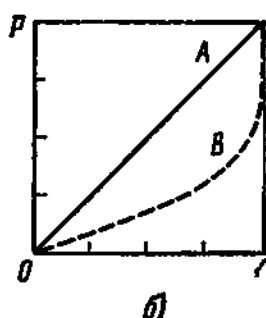
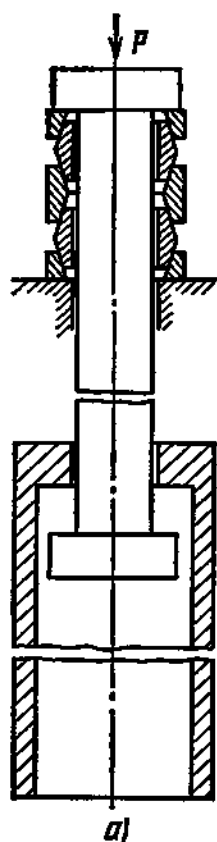


Рис. 6.7. Пружинный амортизатор (а) и характеристика кольцевых пружин (б):  $P$  — нагрузка;  $f$  — прогиб

Рис. 6.8. Гидравлический амортизатор

вое усилие электромагнита определяется следующим образом:

$$P_{\text{эм}} = \frac{(0,4\pi I w_{\text{в}})^2}{8\pi \cdot 981} \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2} \frac{1}{\delta},$$

где  $I w_{\text{в}}$  — МДС рабочего зазора;  $S_1$  и  $S_2$  — площади полюсов магнитопровода;  $\delta$  — рабочий зазор.

Расчет магнитной цепи электромагнита можно производить по методике, изложенной в [24].

**Пружинный амортизатор.** Для торможения РО используют пружинные амортизаторы с кольцевыми пружинами (рис. 6.7). Под действием осевой нагрузки, создаваемой РО, кольца опираются друг на друга коническими поверхностями. Внешние кольца растягиваются, а внутренние сжимаются; при этом возникают большие силы трения. Так как угол конусов  $\beta$  больше угла трения  $\rho = \arctg \mu$  (где  $\mu$  — коэффициент трения), пружина за счет сил упругости восстанавливает свои прежние размеры.

Характеристика кольцевой пружины приведена на рис. 6.7, б. Прямая  $OA$  соответствует процессу нагружения, кривая  $ABO$  — разгрузке. Работа сил трения, переходящая в тепло (площадь  $OABO$ ), составляет 60—70 % полной работы нагружения пружины.

В данном примере энергия, развитая РО, в основном поглощается тягой и комплексом кольцевых пружин. При этом уравнение имеет вид

$$\begin{aligned} m_1 d^2 x_1 / dt^2 &= f_2 (x_2 - x_1) - f_1 x_1; \\ m_2 d^2 x_2 / dt^2 &= -f_2 (x_2 - x_1), \end{aligned}$$

где  $m_1$  — масса сборки кольцевых пружин;  $x_1$  — прогиб кольцевой пружины;  $m_2$  — масса РО и тяги;  $x_2$  — перемещение тяги;  $f_1$  — усилие на единицу прогиба кольцевых пружин (жесткость);  $f_2$  — жесткость тяги;  $t$  — время.

С учетом этих уравнений можно рассчитать напряжение в тяге. Прогиб пружины под нагрузкой  $P$  при количестве конусных поверхностей  $Z$  определяется как

$$f = \frac{Z}{2\pi \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} (\beta + \rho)} \left( \frac{D_{\text{н}}}{F_{\text{н}}} + \frac{D_{\text{в}}}{F_{\text{в}}} \right) \frac{P}{E},$$

где  $D_{\text{н}}$ ,  $F_{\text{н}}$  и  $D_{\text{в}}$ ,  $F_{\text{в}}$  — соответственно диаметры центров тяжести и площади поперечных сечений наружного и внутреннего колец;  $E$  — модуль упругости.

Поглощаемая пружиной энергия

$$\Delta U = (1/2) k P f,$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий работу сил трения ( $k \approx 0,6 \div 0,7$ ).

**Гидравлические амортизаторы** (рис. 6.8) широко используются в ИМ, узлы и детали которых работают в воде.

В конце пути при аварийном сбросе поршень входит в отвер-

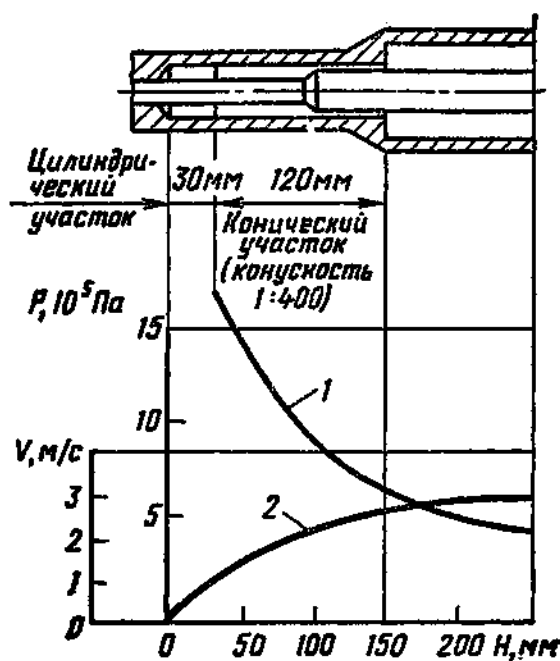


Рис. 6.9. Схема и гидравлические характеристики амортизатора:

1 — давление в полости амортизатора; 2 — скорость подвижных деталей привода

стие цилиндра. Между поршнем и цилиндром образуется переменный зазор, играющий роль дросселя, обеспечивающего замедление. Примерное усилие торможения можно определить из соотношения

$$P_m = (3/4) \mu l v d_{\text{ср}}^3 \pi / S^3,$$

где  $d_{\text{ср}}$  — средний диаметр щели;  $v$  — скорость перемещения поршня;  $\mu$  — абсолютная вязкость жидкости;  $l$  — длина щели;  $S$  — зазор.

На рис. 6.9 приведена типичная характеристика линейного гидравлического амортизатора, имеющего в гидроцилиндре конический и цилиндрический участки.

#### 6.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ТИПА ВИНТ — ГАЙКА

Пара винт — гайка используется в различных модификациях: винт — шариковая гайка, винт — роликовая гайка, винт — графитовая гайка. Преобразователи с графитовой гайкой нашли применение в ИМ тяжеловодных реакторов, например в ИМ реактора А-1 в ЧССР, а также в некоторых реакторах канального типа. Винтовая пара такого типа обычно имеет ходовой винт с прямоугольной трапецеидальной или упорной резьбой. При разработке преобразователей известные трудности представляет подбор материалов для пары трения, марки стали для винта и состава композиции для гайки.

Конструкция ИМ, в котором используется шариковая гайка, применена в ядерном реакторе атомного ледокола «Ленин». В преобразователях этого типа между гайкой и винтом помещены стальные шарики. Винтовые поверхности гайки и винта не находятся в непосредственном контакте, а разделяются катящимися шариками, цепь которых замыкается через возвратный канал. В результате замены трения скольжения трением качения КПД винтовой пары повышается до 90 %. Кроме высокого КПД эта пара имеет следующие преимущества: высокую кинематическую чувствительность, обусловленную низким коэффициентом трения покоя шариков; незначительный износ, а следовательно, стабильную точность перемещения; возможность «самохода» под действием силы тяжести, что особенно важно для обеспечения работы ИМ в режиме АЗ.

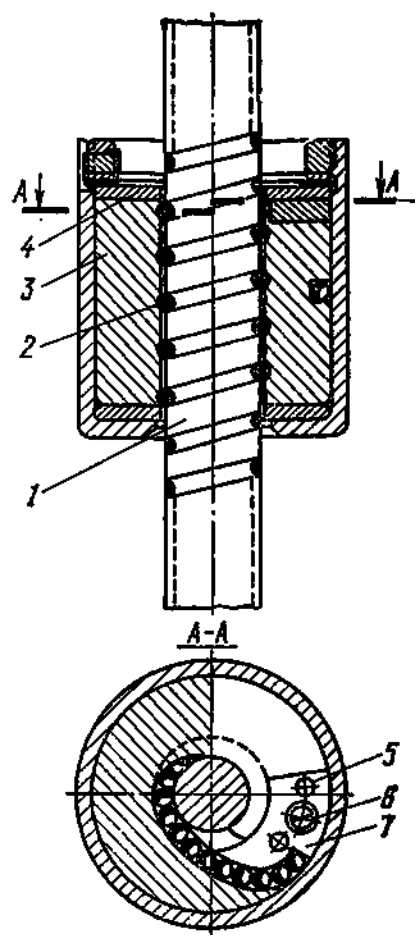


Рис. 6.10. Пара винт — шариковая гайка:

1 — винт; 2 — шарики; 3 — гайка; 4 — отбойная пластина; 5 — установочные штифты; 6 — винт; 7 — профильный отражатель

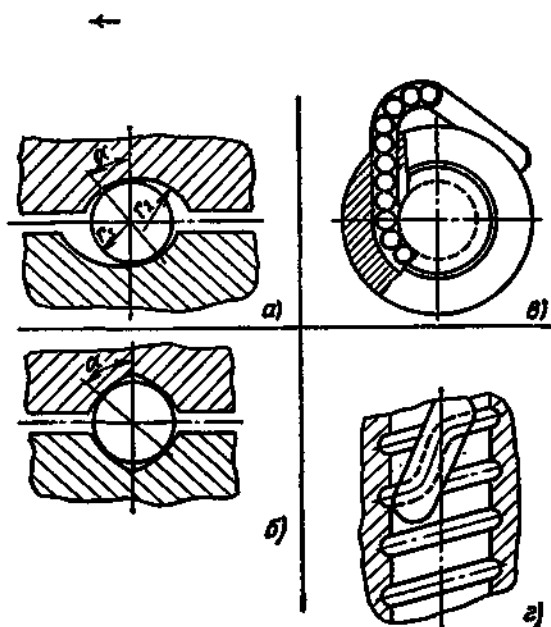


Рис. 6.11. Профили резьбы и типы отражателей:

а — радиусный профиль; б — арочный профиль; в — трубчатый отражатель; г — внутрипрофильный вкладыш

Пара винт — шариковая гайка является составной частью привода СУЗ ИМ, скорость перемещения, точность и потребная мощность которой определяются требованиями регулирования реактора, т.е. элементы пары винт — шариковая гайка (диаметр винта, угол подъема винтовой линии, диаметр шариков и т. д.) определяются в зависимости от допустимых габаритных размеров и мощности ИМ.

Пример конструктивного выполнения пары винт — шариковая гайка показан на рис. 6.10. В ИМ с такими парами наибольшее распространение получил радиусный профиль резьбы (рис. 6.11, а). Радиус профиля  $r_k$  для снижения контактных напряжений и потерь на трение от разности скоростей на площадках контакта выбирается близким к радиусу шарика ( $r = 0,95 \div 0,97 r_k$ ). Угол контакта  $\alpha$  принимается равным  $45-60^\circ$ . При  $\alpha \geq 80^\circ$  наблюдается заклинивание шариков в местах перехода от винта к гайке из-за недостаточности радиальных усилий на шарик. При малых значениях  $\alpha$  передача имеет низкую нагрузочную способность, так как даже небольшая осевая нагрузка вызывает значительные радиальные усилия.

Конструкция шариковой гайки во многом определяется конструкцией устройства для рециркуляции шариков. В шариковых

гайках ИМ наибольшее распространение получили рециркуляционные устройства в виде профильно-фрезерованного отражателя в сочетании с фрезерованным каналом (рис. 6.10) и трубчато-обводной отражатель (рис. 6.11, в). Гайки с каналом для рециркуляции шариков, образованным профильным вкладышем, не нашли применения, так как в этой конструкции осуществляется очень крутой поворот шариков на коротком сложнопрофильном участке. В отличие от других конструкций шарики в данном случае не выводятся каналом возврата из контактирования с поверхностью винта, а направляются из витка в соседний виток, переваливаясь через выступ резьбы винта. Такой крутой переход в траектории движения рециркулирующих шариков приводит к их проскальзыванию в данном месте, особенно при движении гайки или винта «самоходом» под воздействием переменного пульсирующей весовой нагрузки. Наиболее простым типом рециркуляционного устройства является трубчато-обводной отражатель, позволяющий получить плавную траекторию движения шариков при относительной технологичности изготовления.

Однако установка несимметричной гайки в привод создает известные трудности; следует отметить низкие износостойкость отражательных концов трубки и надежность крепления трубки к корпусу гайки. Несмотря на трудоемкость изготовления, предпочтительной конструкцией является гайка с профильно-фрезерованным отражателем. В этой конструкции обеспечиваются возможность изготовления отражателя из материала, обладающего высокой твердостью, получение плавной траектории движения шариков, компактность и симметричность конструкции гайки. Результаты исследований показывают, что четвертый и пятый рабочие витки гайки несут 7—8 и 4—5 % нагрузки соответственно, т. е. наиболее оптимальной является гайка с двумя-тремя рабочими витками.

К передачам с шариковыми гайками, применяемыми в ИМ, предъявляются следующие требования: обеспечение долговечности при заданной осевой нагрузке; статическая устойчивость на продольный изгиб при максимально возможном усилии, развиваемом приводным двигателем; динамическая устойчивость (отсутствие резонанса) при вращении в рабочем диапазоне скоростей, включая режим «самохода», и получение минимальных потерь на трение.

Из кинематического расчета привода и требований технического задания определяются: длина хода винта или гайки  $L$ , шаг резьбы  $t$ , максимальные и минимальные числа оборотов винта или гайки  $n_{min}$  и  $n_{max}$ , действующая осевая нагрузка  $Q$ .

Из конструктивных условий компо-

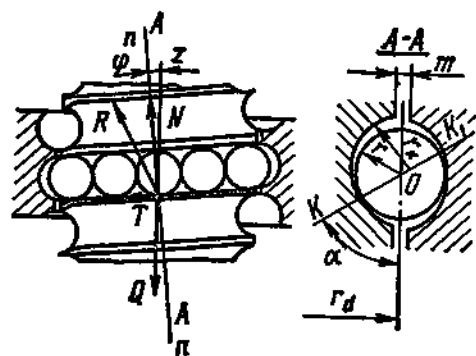


Рис. 6.12. Схема передачи усилий в шариковинтовом механизме

новки механизма, технологических возможностей и заданных параметров определяется угол подъема резьбы на среднем диаметре кинематической пары  $\varphi$  (рис. 6.12).

При заданной нагрузке  $Q$  момент на винте или гайке

$$M_k = Q(d_{cp}/2) \operatorname{tg}(\varphi + \rho).$$

Из данного выражения определяют силу движения  $T$ , приложенную по касательной в точке контакта шариков с поверхностью резьбы:

$$T = Q \operatorname{tg}(\varphi + \rho).$$

КПД определяют из отношения работы осевой нагрузки  $Q$  к затрачиваемой работе от движущей силы  $T$ :

$$\eta = Qt/(T\pi d_{cp}) = Q \operatorname{tg} \varphi / T = \operatorname{tg} \varphi / \operatorname{tg}(\varphi + \rho).$$

Выражение для КПД справедливо при преобразовании вращательного движения в поступательное при совпадении направлений движения винта и действия силы  $Q$ . В случае преобразования поступательного движения во вращательное КПД

$$\eta = \operatorname{tg}(\varphi - \rho) / \operatorname{tg} \varphi.$$

Приведенный угол трения  $\rho$  для шариковинтовой пары с радиусным профилем резьбы определяется по формуле

$$\rho = \operatorname{arctg}(k/d_{ш} \sin \alpha),$$

где  $k$  — коэффициент трения качения;  $d_{ш}$  — диаметр шарика. В приводах СУЗ значения  $k$  обычно лежат в пределах 0,03—0,08 мм.

Грузоподъемность и долговечность пары винт — шариковая гайка механизма определяются нагрузкой, действующей на один шарик. Предельно допустимая статическая нагрузка на один шарик

$$P_{\text{доп.ст}} = \frac{[\sigma]_k^3}{E^2} \frac{r^2}{[1,32 - 3,49(1 - r/r_k)(1 - r \cos \alpha/r_k)]^6 (1 - r/r_k)^2},$$

где  $[\sigma]_k$  — допустимое контактное напряжение;  $E$  — модуль упругости материала;  $r$  — радиус шарика;  $r_k$  — радиус канавки;  $\alpha$  — угол контакта (см. рис. 6.12). Допустимое контактное напряжение

$$[\sigma]_k = 10^3 (25 \div 30) \text{ HRC}/60,$$

где HRC — твердость контактирующих поверхностей по Роквеллу. Минимально допустимое число шариков в рабочих витках гайки определяется из выражения  $z_{\min} = Q_{\max}/P_{\text{доп.ст}} \sin \alpha$ , где  $Q_{\max}$  — максимальная осевая нагрузка, действующая на винт или гайку.

Расчетное значение долговечности этой пары можно определять по формуле

$$C = Q(nh)^{0.3},$$



где  $n$  — рабочее число оборотов, об/мин;  $h$  — часы работы (заданная долговечность).

Для радиально-упорного шарикоподшипника при осевом направлении внешней нагрузки и предположении, что все шарики нагружены равномерно,

$$C = 65z^{0.7} d_{\text{ш}}^2 \varphi_{\text{ш}} \sin \alpha,$$

где  $\varphi_{\text{ш}} = 1/(1+0,02 d_{\text{ш}})$ .

Из этих формул можно рассчитать долговечность работы при заданной нагрузке

$$(nh)^{0.3} = 65z^{0.7} d_{\text{ш}}^2 \varphi_{\text{ш}} k_{\text{н}} \sin \alpha \cos \varphi / Q,$$

где  $k_{\text{н}}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между шариками, равный 0,8—0,9.

Приведенные зависимости позволяют рассчитать параметры пары винт — шариковая гайка, но они выведены для твердости контактирующих поверхностей  $\text{HRC} \geq 60$ . В ИМ ядерных реакторов часто применяются нержавеющие стали, термообработка которых до твердости  $\text{HRC} = 60$  затруднительна. Для учета изменения долговечности и допустимой нагрузки при более низком значении твердости рекомендуется допустимое контактное напряжение рассчитывать по формуле

$$[\sigma]_k = \Psi [\sigma]_h,$$

где  $\Psi$  — коэффициент снижения допустимого контактного напряжения. Для значений поверхностной твердости контакта ниже 58  $\text{HRC}$  рекомендуется уменьшение срока службы оценивать

$$C' = C (\text{HRC}/58)^{3.6}.$$

Из рассмотренных зависимостей видно, что долговечность пары винт — шариковая гайка изменяется обратно пропорционально кубу нагрузки на шарик.

В процессе работы ИМ с парой винт — шариковая гайка в случае заедания РО в направляющих на ходовой винт воздействует осевая сжимающая нагрузка, которая определяется с учетом максимального момента, развиваемого электродвигателем. Наружный диаметр винта определяют из условия устойчивости при продольном изгибе под воздействием максимально возможной нагрузки на максимальной длине винта. Расчет устойчивости проводят по формуле Эйлера

$$Q_{\text{сж}}^{\text{max}} \leq \frac{\pi E J}{k_{\text{у}} (\mu l)^2},$$

где  $Q_{\text{сж}}^{\text{max}}$  — наибольшая осевая нагрузка;  $\mu$  — коэффициент приведенной длины, зависящий от способа закрепления и расположения опор винта;  $l$  — расстояние между опорой винта и серединой гайки;  $k_{\text{у}}$  — запас устойчивости;  $E$  — модуль упругости материала;  $J$  — момент инерции сечения винта.

Численное значение  $\mu$  находят в зависимости от схемы заделки. Наиболее часто в механизмах СУЗ  $\mu=1$ , что соответствует шарнирной заделке в нижней части винта (гайке) в направляющих.

Момент инерции полого винта

$$J = (\pi d_1^4 / 32) (1 - C^4),$$

где  $d_1$  — внутренний диаметр резьбы винта;  $d_v$  — внутренний диаметр винта;  $C = d_v / d_1$ .

В режиме АЗ пара винт — шариковая гайка либо раскручивается самопроизвольно до максимальной частоты вращения под действием силы тяжести свободно падающего РО и соединительной тяги, либо перемещается под действием электродвигателя, работающего с большим, чем нормальное, числом оборотов. Для оценки возможности работы пары винт — шариковая гайка в этих режимах рассчитывают критическое число оборотов винта. За расчетный принимают винт постоянного поперечного сечения с приведенным диаметром  $d_{пр}$ , установленный на двух опорах и вращающийся с угловой скоростью  $\omega_{кр}$ :

$$\omega_{кр} \approx 2,78 (d_{пр} / l^2) \sqrt{Eg/\gamma},$$

где  $l$  — расстояние между опорами;  $E$  — модуль упругости материала;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\gamma$  — плотность материала винта.

Погрешности изготовления значительно снижают нагрузочную способность, долговечность и надежность работы передачи. Поэтому требования к точности геометрических параметров винта, гайки и шариков должны быть весьма высокими. Однако требования к точности изготовления приходится ограничивать из-за сложности технологии.

В некоторых областях машиностроения нашли применение шарикоподшипниковые винтовые механизмы с двух- и трехзаходными винтами. При вращении ходового винта шарики перекатываются по наружным кольцам в сторону вращения винта, но с меньшей скоростью, поэтому перемещение гайки за один оборот винта меньше произведения шага на число заходов резьбы. Механизмы подобного типа просты в изготовлении, обеспечивают высокую кинематическую точность, но предназначены лишь для восприятия небольших нагрузок. Механизмы данного типа в ИМ СУЗ до настоящего времени применения не нашли.

Наряду с шарико-винтовыми в ИМ находят применение пары винт — роликовая гайка. Преимущество последних перед парами винт — шариковая гайка заключается главным образом в том, что кинематическую пару винт — роликовая гайка можно сделать разъемной, т. е. сочетать в одном механизме функции регулирования и АЗ (см. рис. 4.5).

Пары винт — роликовая гайка имеют относительно низкую грузоподъемность и износостойкость, что определяется давлением

на опоры роликов. Повысить их грузоподъемность в небольших габаритных размерах трудно.

Износостойкость пары винт — шариковая гайка определяется износостойкостью роликов и винта в условиях совмещенного воздействия трения качения и скольжения. Трение скольжения вызвано разностью угловых скоростей точек контакта на винте и роликах. Технология изготовления пары винт — роликовая гайка не имеет какой-либо особой специфики, хотя и требует высокоточного оборудования.

## **Глава седьмая**

### **ДИНАМИКА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ**

#### **7.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

В задачу исследования динамики ИМ входит определение усилий, действующих на отдельные звенья механизма в процессе их движения. Определение динамических усилий необходимо для проведения расчетов на прочность элементов механизма, выбора их рациональных размеров и формы, а также определения времени перемещения РО. Знание усилий, действующих в механизме, позволяет выбрать оптимальную конструктивную схему, отвечающую заданным условиям эксплуатации и обладающую необходимой прочностью и жесткостью.

В отличие от обычного электропривода, в котором относительно небольшие кратковременные динамические нагрузки имеют место только при пуске и остановке двигателя, ИМ ядерных реакторов обладают рядом специфических особенностей, к которым относятся: 1) наличие значительных продолжительно действующих динамических усилий, возникающих при аварийном введении РО в активную зону и их торможении; 2) обеспечение минимального времени срабатывания аварийных органов; 3) необходимость учета воздействия ударных и вибрационных нагрузок, имеющих место в судовых и космических ядерных силовых установках.

Отсюда следует, что наряду с общими вопросами динамики в задачу динамики ИМ ядерных реакторов входит изучение: 1) движений РО и связанных с ним элементов привода под действием различных ускоряющих воздействий; 2) динамических нагрузок, возникающих при разгоне и торможении РО; 3) различных ускоряющих устройств и их динамики; 4) влияния упругих звеньев на динамику привода; 5) способов уменьшения динамических усилий и колебаний.

Если в теории механизмов и машин большинство задач динамики решается в предположении, что все звенья механизма абсолютно жесткие, то в ИМ ядерных реакторов в силу их указанной специфики (например, при изучении колебаний и явлений удара)

часто приходится использовать методы теории упругости. Еще более сложную картину представляет собой динамика дискретных силовых механизмов, где практически отсутствуют периоды установившегося движения, могут иметь место колебательные процессы и поведение привода в динамическом режиме в большой степени определяется не только его механическими характеристиками, но и электрическими параметрами схемы управления.

Здесь рассматриваются некоторые вопросы динамики, которые приходится часто решать конструктору при разработке ИМ. Ряд вопросов динамики механизмов решается методами общей динамики системы. Это касается в основном движения РО под воздействием различных нагрузок. Ниже будут рассмотрены основные виды этих движений. Следует отметить, что многие вопросы динамики ИМ ядерных реакторов еще мало изучены и требуют дальнейших исследований; к ним относятся, в частности, ускоренное движение РО под действием различных усилий в вязких средах и ограниченных объемах, вопросы малых колебаний систем с различной жесткостью и ряд других. Решение этих и других проблем требует не только теоретических, но и большого объема экспериментальных исследований с привлечением современных методов испытаний и совершенных технических средств.

## 7.2. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА СУЗ

Пуск, реверс и торможение двигателя механизма сопровождаются неустановившимся движением. При этом энергия, равная работе сил инерции всех неравномерно движущихся масс, расходуется при разгоне механизма или поглощается при его торможении. Следовательно, нагрузка на механизм в период разгона и торможения больше, чем в период установившегося движения.

Крутящий момент двигателя, приводящего в действие механизм,

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}, \quad (7.1)$$

где  $M_{\text{ст}}$  и  $M_{\text{дин}}$  — соответственно статический и динамический моменты сопротивления, приведенные к валу двигателя.

Для вращательного движения

$$M_{\text{дин}} = J d\omega/dt, \quad (7.2)$$

где  $J$  — момент инерции системы, приведенный к валу двигателя;  $d\omega/dt$  — угловое ускорение.

С учетом (7.2) выражение (7.1) примет вид

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}} + J d\omega/dt. \quad (7.3)$$

Это уравнение движения механизма справедливо при  $J = \text{const}$ , что имеет место в большинстве ИМ. Часто динамический момент выражают через маховой момент вращающегося тела. Обозначив через  $m$  и  $G$  массу и силу тяжести вращающегося тела, а через

$\rho$  и  $D$  радиус и диаметр его инерции, получим  $J = m\rho^2 = GD^2/(4g)$  и отсюда

$$M_{\text{дин}} = (GD^2/(4g)) (d\omega/dt). \quad (7.4)$$

Здесь  $GD^2$  — маховой момент;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Анализ уравнения (7.3) показывает, что при  $M_{\text{дв}} > M_{\text{ст}}$  угловое ускорение  $d\omega/dt > 0$ . В этом случае имеет место ускорение механизма. При  $M_{\text{дв}} < M_{\text{ст}}$  угловое ускорение  $d\omega/dt < 0$ , и в этом случае, очевидно, происходит торможение привода.

При  $M_{\text{дв}} = M_{\text{ст}}$  ускорение  $d\omega/dt = 0$ , т. е. движение установившееся. Очевидно, в этом случае  $M_{\text{дин}} = 0$ . Учитывая, что  $\omega = 2\pi n/60$ , перепишем выражения (7.2) и (7.4) в следующем виде:

$$M_{\text{дин}} = (J\pi/30) (dn/dt);$$

$$M_{\text{дин}} = (GD^2/375)/(dn/dt).$$

В общем случае ИМ содержит различные промежуточные передачи (редуктор, преобразователь движения и др.). При определении мощности двигателя, времени разгона и других характеристик обычно приводят статические моменты и моменты инерции системы к валу двигателя. Приведение статических моментов привода к валу двигателя производится с учетом энергетического баланса системы

$$N_{\text{р.о}} = N_{\text{дв}}\eta.$$

Здесь  $N_{\text{р.о}}$  — мощность на валу, связанном с РО;  $N_{\text{дв}}$  — мощность на валу двигателя;  $\eta$  — общий КПД передачи ( $\eta = \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ ). Можно записать  $M_{\text{с.р.о}}\omega_{\text{р.о}} = M_{\text{ст.дв}}\omega_{\text{дв}}\eta$ , или  $M_{\text{ст.дв}} = M_{\text{с.р.о}} \times (\omega_{\text{р.о}}/\omega_{\text{дв}}) (1/\eta) = M_{\text{р.о}}/(i\eta)$ . Здесь  $M_{\text{ст.дв}}$  — статический момент на валу двигателя;  $M_{\text{с.р.о}}$  — статический момент на валу РО;  $\omega_{\text{р.о}}$ ,  $\omega_{\text{дв}}$  — угловые скорости вращения вала РО и двигателя соответственно;  $i$  — передаточное число.

Для РО с поступательным движением можно записать  $Q_{\text{ст.р.о}}v_{\text{р.о}} = M_{\text{с.дв}}\omega_{\text{дв}}\eta$ ; здесь  $Q_{\text{ст.р.о}}$  — статическое усилие, приложенное к РО;  $v_{\text{р.о}}$  — скорость поступательного перемещения. Отсюда  $M_{\text{ст.дв}} = Q_{\text{ст.р.о}}v_{\text{р.о}}/(\omega_{\text{дв}}\eta)$ . Принимая во внимание, что  $\omega_{\text{дв}} = \pi n_{\text{дв}}/30$ , получаем

$$M_{\text{ст.дв}} = 9,55 \frac{Q_{\text{ст.р.о}}v_{\text{р.о}}}{\eta n_{\text{дв}}}.$$

КПД для червячной или винтовой зубчатой передачи при угле наклона зуба  $\alpha$  и угле трения  $\rho$   $\eta = \text{tg } \alpha / \text{tg } (\alpha + \rho)$ .

Угол трения  $\rho$  зависит от материалов трущихся пар, условий смазки и скорости скольжения. Для бронзы по стали при хорошей смазке  $\rho \approx 3 \div 4^\circ$ .

КПД при опускании груза  $\eta'$  можно определить из соотношения  $\eta' = -2 - (1/\eta)$ .

Вообще моменты торможения меньше движущих моментов, так как моменты сопротивления в механизме, учитываемые его КПД,

помогают торможению. Движущий момент должен преодолевать внутреннее сопротивление механизма. Выражения для движущего и тормозного моментов можно записать соответственно так:

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{ст}}}{(i_1 i_2 \dots i_n) (\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n)}; \quad M_{\text{т}} = \frac{M_{\text{ст}} (\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n)}{i_1 i_2 \dots i_n}.$$

Из этих выражений вытекает, что  $M_{\text{т}}/M_{\text{дв}} = \eta^2_{\text{общ}}$ .

КПД привода при последовательном соединении его звеньев равен произведению КПД отдельных передач:  $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n$ . В практике разработки систем управления ядерных реакторов имеют место случаи, когда несколько механизмов работают от одного привода (например, при синхронизации перемещения группы автоматических регуляторов с помощью механических передач). В этом случае имеет место параллельное соединение механизмов.

Рассмотрим случай параллельной работы трех механизмов. Общий КПД  $\eta = \Sigma A_c / A_{\text{дв}}$ , где  $\Sigma A_c$  — общая работа сил сопротивления,  $\Sigma A_c = A'_c + A''_c + A'''_c$ , а работа движущих сил

$$A_{\text{дв}} = A'_c / \eta_1 + A''_c / \eta_2 + A'''_c / \eta_3,$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  — общие КПД каждого из трех механизмов. С учетом этих выражений общий КПД всей системы

$$\eta = \frac{A'_c + A''_c + A'''_c}{A'_c / \eta_1 + A''_c / \eta_2 + A'''_c / \eta_3}.$$

Приведение моментов инерции привода к валу двигателя производится также по уравнению баланса кинетической энергии системы. В общем виде ИМ ядерного реактора содержит вращающиеся передачи и элементы, совершающие поступательное движение.

Пусть РО массой  $m$  и силой тяжести  $G$  перемещается поступательно со скоростью  $v$  через понижающую передачу от электродвигателя, который вращается с угловой скоростью  $\omega$ , имеет момент инерции  $J$  и делает  $n$  оборотов в минуту. Заменим такую систему эквивалентной системой, приведенной к валу двигателя. Для вращающихся звеньев

$$J_{\text{пр.вр}} \omega^2 / 2 = J \omega^2 / 2 + J_1 \omega_1^2 / 2 + J_2 \omega_2^2 / 2 + \dots + J_n \omega_n^2 / 2$$

или

$$(GD^2)_{\text{пр.вр}} = GD^2 + G_1 D_1^2 (n_1/n)^2 + G_2 D_2^2 (n_2/n)^2 + \dots + G_n D_n^2 (n_n/n)^2.$$

Но так как  $i_1 = n/n_1$ ;  $i_2 = n/n_2$ ;  $\dots$ ;  $i_n = n/n_n$ , то

$$(GD^2)_{\text{пр.вр}} = GD^2 + (G_1 D_1^2 / i_1^2) + (G_2 D_2^2 / i_2^2) + \dots + (G_n D_n^2 / i_n^2).$$

Для учета потерь в механизме, возникающих при динамическом режиме работы, вводят КПД механизма  $\eta$ .

Для поступательно перемещающегося звена уравнение баланса кинетической энергии имеет вид

$$mv^2/2\eta = J_{\text{пр.пост}}\omega^2/2;$$

$$mv^2/2\eta = (GD^2)_{\text{пр.пост}}\omega^2/(4g \cdot 2).$$

Подставляя в последнее уравнение значения  $m=G/g$  и  $\omega=2\pi n/60$ , получаем

$$(GD^2)_{\text{пр.пост}} = 365Gv^2/(n^2\eta).$$

При торможении это выражение примет вид

$$(GD^2)_{\text{пр.пост}} = 365Gv^2\eta/n^2.$$

Общий приведенный маховой момент привода может быть выражен уравнением

$$(GD)_{\text{пр}} = (GD^2)_{\text{пр.вр}} + (GD^2)_{\text{пр.пост}}.$$

Уравнение для полного динамического момента всей системы, приведенной к валу двигателя, имеет вид

$$M_{\text{дин}} = [(GD^2)_{\text{пр}}/375] (dn/dt). \quad (7.5)$$

В качестве примера приведения моментов инерции к валу двигателя рассмотрим приведение инерции поступательно перемещаемого РО с помощью винтовой пары с шаговым электродвигателем, вал которого непосредственно соединен с винтом. При исследованиях динамических режимов шаговых двигателей на ротор устанавливают инерционную нагрузку (эквивалентную инерции линейно перемещаемого РО), которую и требуется определить.

За один импульс управления за время  $\Delta t$  ротор двигателя поворачивается на угол  $\Delta\phi$ , а винтовая пара с шагом винта  $s$  перемещает РО массы  $m$  на  $\Delta s$ . Средняя скорость перемещения РО  $v=\Delta s/\Delta t$ . Средняя угловая скорость ротора двигателя или винта  $\omega=\Delta\phi/\Delta t$ . Составим уравнение энергетического баланса для поступательного и вращательного движения:  $mv^2/2=J_{\text{пр}}\omega^2/2$ , откуда  $J_{\text{пр}}=mv^2/\omega^2$ . Подставив в это выражение значения  $v$  и  $\omega$ , получим

$$J_{\text{пр}} = m (\Delta s/\Delta t)^2/(\Delta\phi/\Delta t)^2 = m\Delta s^2/\Delta\phi^2,$$

но  $\Delta s=\Delta\phi s/(2\pi)$ , следовательно,

$$J_{\text{пр}} = ms^2/(4\pi^2).$$

Обозначая  $m=G/g$  и учитывая КПД передачи  $\eta$ , получаем

$$J_{\text{пр}} = Gs^2/(g \cdot 4\pi^2\eta) \approx Gs^2/(389\eta).$$

Таким образом, приведенный к валу двигателя момент инерции пропорционален силе тяжести РО и квадрату шага винтовой пары.

Выражение для общего момента инерции привода имеет вид

$$J_{\text{общ}} = J_{\text{пр}} + J_{\text{в}} + J_{\text{рот}},$$

где  $J_v$  — момент инерции винта;  $J_{\text{рот}}$  — момент инерции ротора двигателя и связанных с ним деталей (в данном случае соединительной муфты).

### 7.3. ИНТЕГРИРОВАНИЕ ОБЩЕГО УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

При разработке систем управления ядерными реакторами к приводам РО предъявляются определенные требования в отношении быстродействия, ограничения выбегов при остановке и др., обусловленные физическими особенностями реактора. Поэтому определение продолжительности переходных процессов каждого конкретного ИМ является одной из задач, решаемых при разработке привода.

Для определения продолжительности переходного процесса, скорости и пути РО при пуске и торможении двигателя необходимо проинтегрировать основное уравнение (7.3). Разделив в нем переменные, получим

$$dt = \frac{J}{M_{\text{дв}} - M_{\text{ст}}} d\omega = \frac{J}{M_{\text{дин}}} d\omega,$$

откуда интегрированием определим время переходного процесса

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega / M_{\text{дин}}.$$

Интегрирование последнего выражения можно выполнить только в том случае, когда известны следующие зависимости:  $M_{\text{дв}} = f(\omega)$  и  $M_{\text{ст}} = f(\omega)$ . Для приближенных оценок можно принять  $M_{\text{дв}} = M_{\text{ср.дв}} = \text{const}$ , т. е. допустить, что в процессе разгона действует все время средний момент двигателя  $M_{\text{ср.дв}} = (M_{\text{дв max}} + M_{\text{дв min}})/2$  и  $M_{\text{ст}} = \text{const}$ . Тогда время разгона двигателя при пуске от скорости  $\omega_1 = 0$  до  $\omega_2 = \omega_y$  (скорость, соответствующая установившемуся движению) можно выразить так:

$$t_n = J\omega_y / (M_{\text{ср.дв}} - M_{\text{ст}}).$$

Полагая постоянным среднее значение тормозного момента двигателя  $M_{\text{т.ср}}$ , интегрируя выражение (7.6) от  $\omega_1 = \omega_y$  до  $\omega_2 = 0$ , с учетом  $M_{\text{дин}} = M_{\text{т.ср}} - M_{\text{ст}}$  получаем время торможения

$$t_{\text{т}} = \int_{\omega_y}^0 \frac{J}{M_{\text{т.ср}} - M_{\text{ст}}} d\omega = \frac{J\omega_y}{M_{\text{т.ср}} - M_{\text{ст}}}.$$

При этих же условиях ( $M_{\text{ср.дв}} = \text{const}$  и  $M_{\text{ст}} = \text{const}$ ) из уравнения (7.5) можно получить известные формулы для  $t_n$  и  $t_{\text{т}}$

$$t_n = \frac{(CD^2)_{\text{пр}} n}{375 (M_{\text{дв}} - M_{\text{ст}})};$$

$$t_{\text{т}} = \frac{(GD^2)_{\text{пр}} n}{375 (M_{\text{т}} - M_{\text{ст}})},$$



где  $M_T$  — момент, необходимый для торможения механизма, который определяется как  $M_T = M_{ст} + M_{дин}$ .

Путь перемещения механизма за время пуска и торможения может быть определен следующим образом. Угол поворота ротора двигателя за бесконечно малый промежуток времени  $d\varphi = \omega dt$ . Так как  $dt = J d\omega / M_{дин}$ , то угол поворота

$$\varphi = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega dt = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega d\omega / M_{дин}.$$

Принимая  $M_{дин} = \text{const}$ , можно определить угол поворота ротора двигателя:

$$\varphi = J (\omega_2^2 - \omega_1^2) / (2M_{дин}).$$

При пуске, когда  $\omega_1 = 0$ , а  $\omega_2 = \omega_y$ , и при торможении от скорости  $\omega_y$  до нуля выражение для угла поворота ротора двигателя будет иметь вид

$$\varphi = J \omega_y^2 / (2M_{дин}).$$

Приведенные формулы для определения времени и пути перемещения элементов привода являются приближенными и могут служить только для ориентировочных расчетов. В действительности функции  $M_{ст} = f(\omega)$  и  $M_{дин} = f(\omega)$  в периоды неустановившегося движения ИМ ядерных реакторов часто являются весьма сложными зависимостями. Например, при наличии пружины аварийного сброса в механизме момент сопротивления изменяется с учетом изменения жесткости пружины и т. п. В дискретном приводе с силовыми шаговыми двигателями динамический момент является сложной нелинейной функцией.

Зависимости  $M_{ст} = f(\omega)$  и  $M_{дин} = f(\omega)$  часто определяются экспериментально на макетах приводов с имитирующей нагрузкой осциллографированием.

Зная время и пути неустановившихся движений, можно определить значения ускорений, а следовательно, и усилий в элементах привода.

#### 7.4. ДВИЖЕНИЕ ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ ПРИВОДА ПРИ АВАРИЙНОМ СРАБАТЫВАНИИ

Исполнительные механизмы, осуществляющие функции АЗ, должны иметь дополнительные источники энергии для аварийного срабатывания, как правило, не зависящие от источников питания, необходимых для нормальной работы. В этих целях могут быть использованы сила тяжести, упругая сила, пневматические или гидравлические источники энергии, электромагнитные силы и др. Регулирующие органы могут перемещаться в жидкости, газе и даже в вакууме. Накопленная в процессе движения кинетическая энергия поглощается различного рода амортизаторами. В об-

шем виде уравнение движения РО при аварийном срабатывании имеет вид

$$m d^2x/dt^2 = \sum P_a - \sum P_o,$$

где  $m$  — приведенная масса РО и связанных с ним поступательно перемещающихся и вращающихся подвижных частей привода;  $\sum P_a$  — сумма активных сил, вызывающих движение подвижной части привода;  $\sum P_o$  — сумма сил сопротивления.

Решение этого уравнения в общем виде (когда подвижная часть движется в среде жидкости и усилие сопротивления пропорционально значению скорости первой или второй степени) представляет известные трудности, так как в каждом конкретном случае конструктивного выполнения механизма необходимо знать коэффициенты гидравлических сопротивлений, которые обычно определяются опытным путем. Поэтому рассмотрим подробно два частных случая.

**Движения регулирующего органа под действием силы тяжести.** При движении РО массы  $m$  в воздухе силами сопротивления, учитывая относительно небольшой рабочий ход, можно, как правило, пренебречь. Поэтому для РО, падающего с высоты  $H$ , пройденный путь выражается уравнением  $H = gt^2/2$ , а время падения  $t = \sqrt{2H/g}$ .

Потенциальная энергия при падении РО переходит в кинетическую:  $mv^2/2 = mgH$ .

Обозначив максимальное усилие при торможении, допустимое по условиям прочности на элементы привода,  $P_{\text{доп}}$ , можно определить зону торможения  $h_t$ :  $mgH = P_{\text{доп}} h_t$ ; отсюда  $h_t = mgH/P_{\text{доп}}$ .

Если к времени срабатывания АЗ не предъявляется слишком высоких требований и ускорение системы  $a$  может быть меньше  $g$ , то в целях упрощения конструкции механизма целесообразно от-

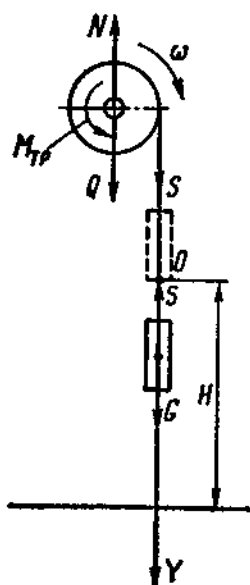


Рис. 7.1. Расчетная схема исполнительного механизма АЗ

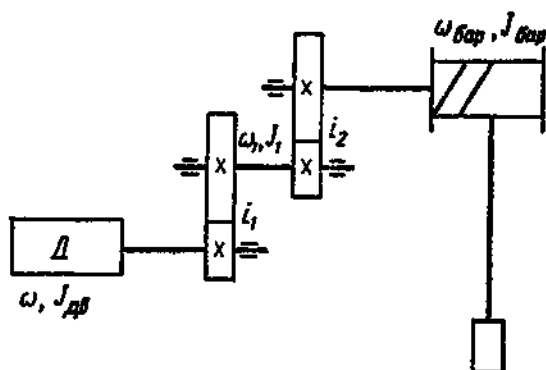


Рис. 7.2. Кинематическая схема исполнительного механизма

казаться от расцепления РО с механизмом при аварийном сбросе. В этом случае при падении РО в активную зону под действием силы тяжести будут раскручиваться вращающиеся детали привода. Если на барабан радиусом  $r$  намотан трос, к которому прикреплен РО массой  $m$  (рис. 7.1), то на барабан действуют сила тяжести барабана  $Q$ , сила натяжения троса  $S$ , нормальная реакция подшипников и сила трения в подшипниках. Дифференциальное уравнение вращения барабана можно записать так:

$$J d^2\varphi/dt^2 = Sr - M_{\text{тр}},$$

где  $M_{\text{тр}}$  — момент сил трения.

На груз действуют сила тяжести  $G=mg$  и сила натяжения троса  $S$  (рис. 7.1). Дифференциальное уравнение движения груза имеет вид

$$G/g (d^2y/dt^2) = mg - S.$$

Угол поворота барабана связан с ординатой  $y$  зависимостью  $y = r\varphi$ . Продифференцировав это выражение, получим

$$d^2y/dt^2 = r d^2\varphi/dt^2 \quad \text{и} \quad d^2\varphi/dt^2 = \frac{d^2y/dt^2}{r}.$$

После преобразований ускорение системы

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{gr (Gr - M_{\text{тр}})}{Gr^2 + Jg}.$$

Но так как  $d^2y/dt^2 = \text{const}$ , то при  $t_0=0$ ,  $y_0=0$  и  $dy_0/dt=0$   $y = \frac{t^2 d^2y/dt^2}{2}$ , т. е. движение является равнопеременным.

При  $t=T$  и  $y=H$

$$H = \frac{gr (Gr - M_{\text{тр}})}{2 (Gr^2 + Jg)} T^2,$$

откуда время срабатывания привода

$$T = \sqrt{\frac{2H (Gr^2 + Jg)}{gr (Gr - M_{\text{тр}})}}.$$

Зная ускорение системы ( $a=2H/t^2$ ), нетрудно определить необходимые усилия и зону торможения РО. Под силой тяжести барабана  $Q$  следует в данном случае понимать приведенную силу тяжести раскручиваемой системы. Пусть, например, с барабаном связана система передач (рис. 7.2), раскручивающая ротор двигателя. На основании уравнения баланса кинетической энергии можно определить приведенный к барабану момент инерции системы:

$$J_{\text{пр}} \omega_{\text{бар}}^2/2 = J_{\text{дв}} \omega^2/2 + J_1 \omega_1^2/2 + J_{\text{бар}} \omega_{\text{бар}}^2/2,$$

откуда  $J_{\text{пр}} = J_{\text{дв}} i_1^2 i_2^2 + J_1 i_2^2 + J_{\text{бар}}$ .

Если диаметр барабана  $D_{\text{бар}}$ , то, выражая момент инерции через маховой момент, получаем  $Q_{\text{пр}} = 4J_{\text{пр}}g/D^2_{\text{бар}}$ .

Принцип действия механизма пусковых органов СУЗ, обеспечивающего быстрое извлечение ОР СУЗ из активной зоны реактора и необходимый импульс мощности, аналогичен принципу действия механизмов АЗ. Основным требованием, определяющим принципиальную конструктивную схему механизма пускового органа СУЗ, является обеспечение надежности срабатывания механизма при извлечении пускового органа СУЗ из активной зоны реактора. Для этих целей применяют конструкцию из неуравновешенной системы грузов (регулирующий орган — противовес). При этом обеспечивается извлечение РО без подвода энергии от внешних источников.

Пусть система состоит из двух грузов, имеющих силу тяжести  $G_1$  и  $G_2$  ( $G_1 > G_2$ ), связанных гибким звеном с блоком радиусом  $R$ . Воспользуемся уравнением Лагранжа

$$d/dt (\partial T / \partial \dot{q}_i) - \partial T / \partial q_i = Q_i,$$

где  $T$  — кинетическая энергия системы;  $q_1, q_2, \dots, q_k$  — обобщенные скорости;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_k$  — обобщенные силы;  $j=1, 2, \dots, k$ .

В потенциальном поле обобщенная сила

$$Q_j = \partial U / \partial q_j = -\partial V / \partial g_j = -\partial \Pi / \partial g_j.$$

Здесь  $U$  — силовая функция;  $V$  — потенциал;  $\Pi$  — потенциальная энергия.

Выразив перемещение грузов через  $H_1$  и  $H_2$

$$H_1 = h_1 + R\varphi; \quad H_2 = h_2 - R\varphi,$$

где  $\varphi$  — угол поворота блока;  $h_1, h_2$  — начальные высоты грузов под произвольной горизонтальной поверхностью, можно записать уравнения для кинетической и потенциальной энергии грузов:

$T = (1/(2g)) (G_1 + G_2) R^2 (d\varphi/dt)^2$ ;  $\Pi = G_1 H_1 + G_2 H_2$ ;  $(\partial T / \partial \varphi) = (1/g) \times (G_1 + G_2) R^2 (d^2\varphi/dt^2)$ ;  $\partial T / \partial \varphi = 0$ ;  $\partial \Pi / \partial \varphi = (G_1 - G_2) R$ , тогда

$$\frac{(G_1 + G_2) R^2}{g} \frac{d^2\varphi}{dt^2} - (G_1 - G_2) R = 0.$$

Из этого выражения можно определить угловое ускорение системы

$$\varepsilon = d^2\varphi/dt^2 = (G_1 - G_2) g / [(G_1 + G_2) R].$$

Соответственно линейное ускорение можно определить из выражения

$$a = d^2H/dt^2 = (G_1 - G_2) g / (G_1 + G_2).$$

Это соотношение справедливо без учета сил сопротивления и влияния раскручиваемых масс, которыми, как правило, можно пренебречь, так как при разработке конструкции всегда принимаются меры для возможного уменьшения инерции раскручиваемых масс.

Так как движение системы равноускоренное, то при перемещении груза с высоты  $H$  можно записать  $H = at^2/2$ .

После подстановки можно определить время перемещения РО

$$t = \sqrt{(2H/g)(G_1 + G_2)/(G_1 - G_2)}.$$

Если вместе с блоком раскручивается система с эквивалентной силой тяжести  $G_3$ , то

$$a = \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2 + G_3} g \text{ и } t = \sqrt{(2H/g)(G_1 + G_2 + G_3)/(G_1 - G_2)}.$$

Движение регулирующего органа под действием упругой силы. Для обеспечения требуемого аварийного срабатывания РО устанавливают дополнительные ускоряющие устройства (пружины), обеспечивающие ускорения  $W > g$ . Пружины используют и в тех случаях, когда РО вводится в активную зону снизу, а также в корабельных реакторах, работающих в условиях качек и дифферентов корабля, когда только на силу тяжести РО рассчитывать нельзя.

Рассмотрим движение РО под действием вертикально направленной упругой силы. Работа силы тяжести на пути  $h$   $A_T = Gh$ . Работа силы упругости пружины  $A_n = ch^2/2$ , где  $c$  — жесткость пружины. Можно записать

$$mv_1^2/2 - mv_0^2/2 = ch^2/2 + Gh.$$

Учитывая, что при аварийном срабатывании привода начальная скорость  $v_0 = 0$ , получаем

$$v_1 = \sqrt{(ch^2g/G) + 2gh}.$$

Время падения определяется как  $t = 2h/v$ .

При введении РО снизу его конечная скорость

$$v_1 = \sqrt{ch^2g/G - 2gh}.$$

## 7.5. УЧЕТ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

При эксплуатации ИМ, а также вследствие неисправности или поломки отдельных элементов привода могут возникать ударные нагрузки. Конструкция ИМ должна быть, как правило, рассчитана на восприятие таких нагрузок. При расчете ИМ можно рассматривать как упругую систему, обладающую определенной жесткостью. Напряжения, возникающие в упругой системе под воздействием ударной нагрузки, определяются как произведение напряжений при статической нагрузке на динамический коэффициент  $k_{дин}$ . В ИМ чаще всего встречаются продольный и крутящий удары. Рассмотрим эти случаи.

Допустим, что РО, имеющий силу тяжести  $G_0$ , перемещается парой винт — шариковая гайка. Предположим, что в результате неисправности системы питания привода винт получил возможность свободно раскручиваться и РО, перемещаясь ускоренно вниз со

скоростью  $v$ , ударяется в заплечик винта. Когда масса винта мала по сравнению с массой РО, динамическое удлинение винта определяется по уравнению

$$\lambda_{\text{дин}} = \lambda_{\text{ст}} (1 + \sqrt{1 + v^2/(g\lambda_{\text{ст}})})$$

Подставив значение  $\lambda_{\text{ст}} = G_0 l / (EF)$ , получим

$$\lambda_{\text{дин}} = \lambda_{\text{ст}} (1 + \sqrt{1 + v^2 EF / (g G_0 l)})$$

Здесь  $E$  — модуль упругости;  $F$  — площадь поперечного сечения винта;  $l$  — длина винта;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Напряжение при продольном ударе

$$\sigma_{\text{дин}} = \sigma_{\text{ст}} k_{\text{дин}} = (G_0 / F) (1 + \sqrt{1 + v^2 EF / (g G_0 l)})$$

Влияние массы винта может быть учтено коэффициентом приведенной массы  $k$ . Динамический коэффициент с учетом влияния массы РО

$$k_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g\lambda_{\text{ст}}} \frac{1}{1 + k P_{\text{в}} / G_0}}$$

где  $P_{\text{в}}$  — сила тяжести винта.

Если динамическое напряжение при ударе превышает допустимое, то для его снижения целесообразно ввести в конструкцию упругий элемент, например пружину с ходом  $x$ . Тогда

$$\lambda_{\text{ст}} = G_0 l / (EF) + x = G_0 l / (EF) + P_{\text{пр}} / c,$$

где  $c$  — жесткость пружины;  $P_{\text{пр}}$  — усилие пружины. Динамическое напряжение в этом случае

$$\sigma_{\text{дин}} = (G_0 / F) \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g (G_0 l / (EF) + x)}} \right)$$

При внезапной остановке раскручиваемых при работе привода масс может возникнуть явление крутящего удара. Предположим, что ротор двигателя с моментом инерции  $J$  раскручивается при движении РО. Если в конце движения не сработает тормоз, то наряду с продольным возникнет крутящий удар. Если скорость ротора  $\omega$ , то динамический момент

$$M_{\text{к.дин}} = \sqrt{J G_{\text{г}} J_{\text{р}} \omega^2 / l},$$

где  $G_{\text{г}}$  — модуль упругости материала вала при кручении;  $J_{\text{р}} = 0,1 d^4$  — полярный момент инерции круглого поперечного сечения вала диаметром  $d$ ;  $l$  — расстояние от ротора до заторможенного сечения вала.

Угол закручивания  $\varphi$  и динамическое касательное напряжение  $\tau$  при ударе определяются из соотношений

$$\varphi = M_{\text{к.дин}} / (G_{\text{г}} J_{\text{р}}); \quad \tau = M_{\text{к.дин}} / (0,2 d^3).$$

Влияние крутящего удара может быть уменьшено соответствующим

щим выбором длины и диаметра закручивающего вала или установкой упругого звена с большим углом закручивания.

## 7.6. ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМАХ СУЗ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

Реальный ИМ можно рассматривать состоящим из отдельных масс, связанных упругими звеньями, обладающими определенной жесткостью. В период неустановившихся движений в элементах системы возникают малые упругие колебания, приводящие к возрастанию инерционных нагрузок по сравнению с их средними значениями, определяемыми законами движения абсолютно твердого тела. Свободные колебания системы зависят от массы и упругости системы. Благодаря наличию сил сопротивления свободные колебания системы быстро затухают. Внешние воздействия на привод вызывают в нем вынужденные колебания, амплитуда которых зависит от соотношения периода вынужденных и собственных (свободных) колебаний. При совпадении этих периодов наступает резонанс, вызывающий значительное возрастание амплитуд нагрузки. Это явление часто наблюдается в приводе в случае импульсного возбуждения при различных скоростях дискретного перемещения РО. Расчет динамических усилий в общем виде — сложная задача. Здесь рассмотрим только основные положения учета динамических нагрузок при расчете ИМ. Главное влияние на развитие динамических процессов в приводах оказывают упругие звенья, особенно упругость троса в ИМ с преобразователями вращения барабан — трос.

В первом приближении можно считать, что система ИМ состоит из двух масс: массы ротора двигателя  $m_p$  и приведенных к нему масс нагрузки  $m_n$ , связанных между собой упругим звеном с жесткостью  $k$  (рис. 7.3).

Для определения динамического усилия в упругом элементе можно воспользоваться следующей методикой. Уравнения движения системы могут быть записаны в виде

$$m_p d^2 x_p / dt^2 + k(x_p - x_n) = 0;$$

$$m_n d^2 x_n / dt^2 - k(x_p - x_n) = 0.$$

Этими уравнениями определяются свободные колебания системы. Если в их правые части подставить значения движущих сил, каковыми являются  $T_{дв} = Q + T_{дин}$  и  $-Q$  (рис. 7.3), и принять, что динамическое усилие  $T_{дин} = \text{const}$ , то получим уравнения, описывающие вынужденные колебания:

$$m_p d^2 x_p / dt^2 + k(x_p - x_n) = T_{дв} = Q + T_{дин};$$

$$m_n d^2 x_n / dt^2 - k(x_p - x_n) = -Q.$$

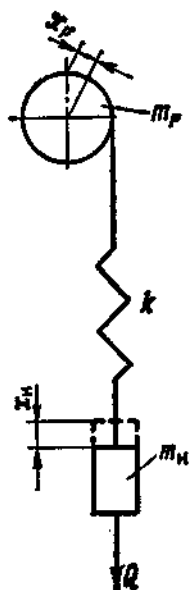


Рис. 7.3. Схема системы с упругим звеном

Преобразуя, получаем

$$d^2x/dt^2 + mkx = mQ + T_{\text{дин}}/m_p,$$

где  $x_p - x_n = x$ ;

$$(m_p + m_n)/(m_p m_n) = m;$$

$$d^2x_p/dt^2 - dx_n^2/dt^2 = d^2x/dt^2.$$

Это дифференциальное уравнение определяет деформацию упругого элемента, а его решение дает возможность определить усилие в упругом звене  $P_y = kx$ .

Решение последнего уравнения позволяет получить значения

$$P_{y \max} = Q[1 + 2\varphi_0 m_n/(m_n + m_p)], \text{ или } P_{y \max} = k_{\text{дин}} Q, \text{ или } k_{\text{дин}} =$$

$$= 1 + 2\varphi_0 m_n/(m_n + m_p).$$

Здесь  $\varphi_0$  — приведенный угол закручивания. Основными упругими элементами привода являются валы. Приведенную жесткость вала постоянного сечения можно определить из соотношения  $k_b = 0,1d^4 G_y/l$ , где  $d$  — диаметр вала, м;  $l$  — длина вала, м;  $G_y$  — модуль упругости при сдвиге. Отдельные углы закручивания зависят от соответствующих жесткостей  $\varphi = M/k_b$ , где  $M$  — приложенный момент. Общий угол закручивания, приведенный к валу,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 i_{1/2} + \dots + \varphi_n i_{1/n}.$$

#### 7.7. СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА И ЖИДКОСТИ В КОНТУРЕ

Векторы сил, действующих на РО в канале СУЗ, показаны на рис. 7.4. В общем виде уравнение движения любого тела в жидкости имеет вид

$$m_t dv_t/dt = \Sigma P,$$

где  $m_t$  — масса тела;  $\Sigma P$  — сумма действующих на тело сил.

На РО ядерного реактора могут действовать сила тяжести, сила пружины, гидродинамическая сила. Сумма сил, за исключением гидродинамической, составляет сумму движущих сил  $\Sigma P_{\text{дв}}$ . После ряда преобразований общего уравнения движения, которые здесь опускаются, можно записать уравнение движения РО [13]

$$\left(m_t + \rho_{\text{ж}} f l_t \frac{f}{f_{\text{ш}}}\right) (dv_t/dt) - \left(\rho_{\text{ж}} f l_t \frac{F}{f_{\text{ш}}}\right) (dv_n/dt) =$$

$$= \Sigma P_{\text{дв}} \pm \Gamma_e (k_f v_k^2 - 2k_f v_k v_t + k_f v_t^2)$$

и уравнение движения жидкости [13]

$$m_t dv_t/dt + \rho_{\text{ж}} f l_{\text{кон}} dv_n/dt =$$

$$= \Sigma P_{\text{дв}} + P_{\text{ан}} f \pm \left(\Gamma_e \frac{f_{\text{ш}}}{F}\right) (k_{\text{кон}} v_k^2 - 2v_k v_t + v_t^2).$$



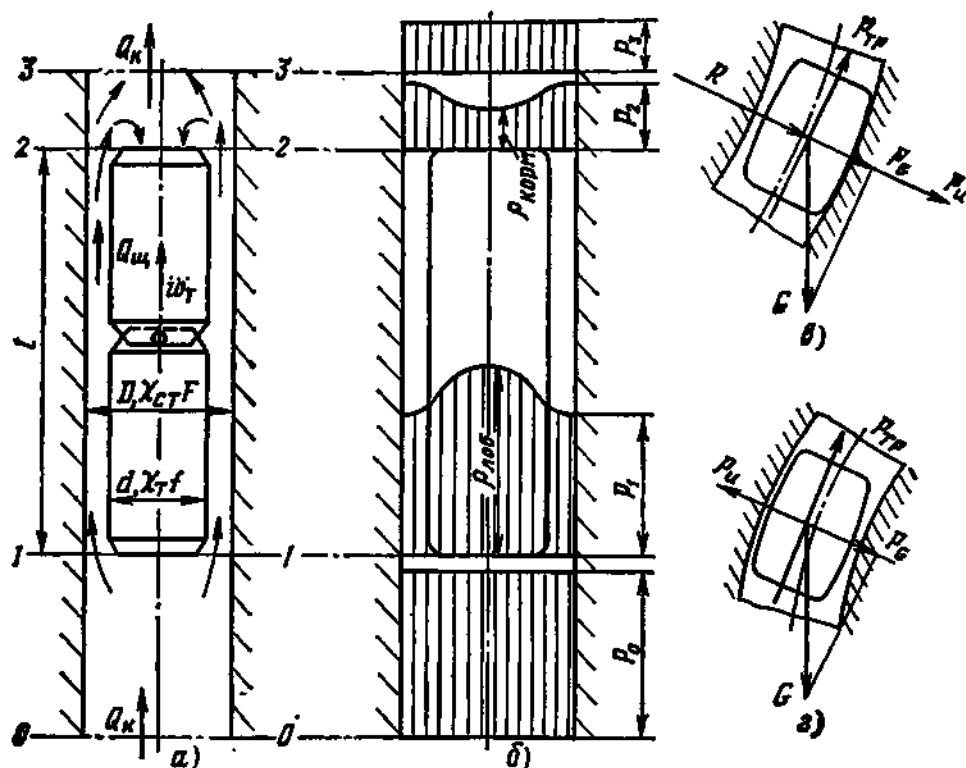


Рис. 7.4. Схема расположения тела в вертикальном прямолинейном канале при подъеме (а, б) и в криволинейном канале при сбросе (в, г) (0—0, 1—1, 2—2, 3—3 — характерные сечения):

$Q_k$  и  $Q_{ш}$  — расход жидкости в канале и щели соответственно;  $w_T$  — скорость движения тела;  $l$  — его длина;  $d$  — его диаметр;  $D$  — диаметр канала;  $\chi_T$  и  $\chi_{ст}$  — периметр тела и стенки канала соответственно;  $f$  — площадь поперечного сечения тела;  $P_{лоб}$  и  $P_{корм}$  — давление лобовое и кормовое;  $P_G$  — составляющая силы тяжести тела по нормали к стенке;  $P_H$  и  $P_{Tp}$  — силы инерции и трения;  $G$  — масса тела;  $R$  — радиус кривизны

В этих уравнениях  $m_T$  — масса тела;  $v_T$  — скорость тела;  $\Sigma P_{дв}$  — сумма сил, движущих тело;  $f$  — площадь поперечного сечения тела;  $l_T$  — длина тела;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости;  $F$  — площадь поперечного сечения канала;  $v_k$  — скорость жидкости в канале;  $k_{f_n}$ ,  $k_{f_1}$ ,  $k_{f_2}$  — коэффициенты, определяемые по формуле

$$k_{f_n} = 1 + \frac{c_{F_{ст}}}{c_{F_T}} \frac{\chi_{ст}}{\chi_T} \frac{f^n}{F^n}, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

где  $\chi$  — смоченный периметр тела (здесь индекс «ст» означает «стенка»);  $f_{ш}$  — площадь щели;  $l_{кон}$  — длина контура;  $P_{ак}$  — давление в аккумуляторе;  $Ge$  — геометрический параметр,  $Ge = \chi_T l \frac{\lambda_T}{8} \rho_{ж} \frac{F^3}{f_{ш}^3}$ ;  $\lambda_T$  — коэффициент трения о поверхность тела;

$k_{кон} = 1 \pm \frac{\lambda_{кон}}{\lambda_T} \frac{l_{кон}}{l} \frac{4f}{\chi_T D} \frac{f_{ш}^2}{F^2}$ ;  $\lambda_{кон}$  — коэффициент трения в трубопроводах контура.

Система уравнений неустановившегося движения может быть решена только численными методами. Аналитически могут быть решены системы соответствующих уравнений только в некоторых частных случаях. Рассмотрим эти случаи.

**Падение тела в замкнутом контуре при очень малом зазоре между телом и каналом.** Ввиду малого зазора между телом и каналом  $f \approx F$  и  $v_k \approx v_T$ .

Выразим скорость, время, путь и ускорение тела через безразмерные параметры:

$$W = v_T/v_{T.уст}; \quad T = tg/v_{T.уст};$$

$$S = sg/v_{T.уст}^2; \quad \delta = \frac{\Sigma P_{дв}}{(m_T + f l_{кон} \rho_{ж}) g}.$$

Тогда уравнение движения можно записать в виде

$$dW_T/dT = \delta (1 - W_T)^2.$$

Решая это уравнение, можно определить безразмерное ускорение  $\delta = 0,69/(T - S)$ , а также время достижения установившейся скорости на отрезке пути от 0 до  $y$ :  $t_{0-y} = 2v_{T.уст}/(g\delta)$  и путь, после прохождения которого эта скорость будет достигнута телом:  $S_{0-y} = 1,32v_{T.уст}^2/(g\delta)$ .

**Падение тела при очень большом зазоре между ним и каналом.** При очень большом зазоре между телом и каналом можно считать, что влияние канала отсутствует, т. е.  $f/F = 0$ . Уравнение движения в этом случае имеет вид

$$m_T dv_T/dt = \Sigma P_{дв} - (\rho_{ж} l c_{F_T} \chi_T v_T^2)/2.$$

После интегрирования получим в безразмерной форме

$$W = \text{th } \delta T; \quad \delta = \Sigma P_{дв}/(m_T g).$$

**Падение тела в контуре с очень большим сопротивлением по длине.** Пределом увеличения сопротивления контура является отсутствие расхода в трубопроводах, т. е.  $v_k = 0$ . Это соответствует падению тела в стоячей жидкости. Уравнение движения тела в этом случае имеет вид

$$\left( m_T + f l \rho_{ж} \frac{f}{F-f} \right) \frac{dv_{T.0}}{dt} = \Sigma P_{дв} - \frac{c_{F,T.н} \chi_T l F^3}{2(F-f)^3} k_{f,\rho_{ж}} v_{T.0}^2.$$

После интегрирования в безразмерной форме запишем

$$W = \text{th } \delta T; \quad \delta = \frac{\Sigma P_{дв}}{\left[ m_T + f l \rho_{ж} \frac{f}{(F-f)} \right] g}.$$

Расчет пневматического привода может производиться по методике, приведенной в [6].

## 7.8. ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ С ЛИНЕЙНЫМИ ШАГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Математическая модель механизма СУЗ в ЛШД. Приводы СУЗ ядерных энергетических установок размещаются на патрубках каналов СУЗ, как правило, в вертикальном положении и перемещают РО или группы РО, имеющих значительную массу, которая в зависимости от типа ядерного реактора может колебаться от 50 до 250, а в ряде случаев превышает 1000 кг. Во время перемещения на РО действует кроме силы тяжести поток теплоносителя, который может иметь различное направление. В этих условиях привод СУЗ должен устойчиво работать в режиме перемещения РО. Сбои в его работе, особенно приводящие к неконтролируемому перемещению РО в сторону увеличения реактивности, не допускаются, так как в этом случае не обеспечивается ядерная безопасность установки. Указанные обстоятельства требуют при разработке ИМ с ЛШД тщательного анализа динамических режимов его работы.

Привод с ЛШД представляет собой сложную электромеханическую систему, поведение которой в рабочем режиме определяется свойствами собственно ЛШД, характером нагрузки и режимом схемы управления.

Каждый шаг, отрабатываемый двигателем, сопровождается переходными процессами в его обмотках управления. Перемещение якоря двигателя вызывает изменение магнитной проводимости в рабочем зазоре зубцовой зоны, влияющее на протекание переходных процессов в обмотках управления.

В процессе отработки шага или серии шагов при определенных электромагнитных характеристиках ЛШД и частотах управления якорь двигателя, а следовательно, и регулирующий орган могут совершать колебания с некоторой амплитудой, а при определенных условиях могут иметь место явления электромеханического резонанса системы.

Наличие монолитных массивных элементов магнитной системы в герметичных ЛШД обуславливает возникновение в этих элементах вихревых токов, в свою очередь оказывающих влияние на характер переходных процессов.

Поведение привода с ЛШД в динамическом режиме описывается сложной системой дифференциальных уравнений, решение которых представляет известные трудности. Создать точную математическую модель сложной электромеханической системы, которой является привод с ЛШД, без определенных допущений весьма трудно. Поэтому за основу приближенной математической модели можно принять уравнения равновесия в электромагнитных и механических звеньях.

В общем виде для дискретного механизма с ЛШД, имеющим  $m$  обмоток управления, можно написать  $(m+1)$  уравнений, из

которых  $m$  уравнений — электромагнитного равновесия:

$$i_1 R_1 + \frac{d}{dt} \Psi_1(i_1, i_2, i_3, \dots, i_m, x) = u_1(t);$$

$$i_2 R_2 + \frac{d}{dt} \Psi_2(i_1, i_2, i_3, \dots, i_m, x) = u_2(t);$$

.....

$$i_m R_m + \frac{d}{dt} \Psi_m(i_1, i_2, i_3, \dots, i_m, x) = u_m(t);$$

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + P_H = P(i_1, i_2, i_3, \dots, i_m, x_m),$$

где  $u_k$ ,  $i_k$ ,  $\Psi_k$  — мгновенные значения напряжения, тока и потоко-сцепления  $k$ -й фазы соответственно;  $k=1, 2, \dots, m$ ;  $P(i_1, i_2, i_3, \dots, i_m, x_m)$  — мгновенное значение синхронизирующего усилия на якоре ЛШД;  $R_k$  — активное сопротивление цепи  $k$ -й фазы;  $m$  — суммарная масса якоря двигателя и нагрузки;  $P_H$  — усилие нагрузки;  $x_m$  — геометрическое перемещение якоря;  $x$  — перемещение якоря в электрических единицах.

Перемещение якоря двигателя, связанного с РО, происходит за счет изменения запасенной энергии  $dW$  в системе. Если за время  $dt$  перемещения якоря  $dx$  к системе подводится электрическая энергия  $W_e$  и механическая энергия  $W_m$ , то исходя из закона сохранения энергии можно записать  $dW = W_e + W_m$ .

На основании приведенных выше общих соображений можно составить конкретные уравнения привода с ЛШД. Условия электромагнитного равновесия в фазной обмотке двигателя можно записать в виде

$$I_k R_k(t) + d\Psi_k/dt = U_k;$$

$$i_{kn} R_{kn}(t) + d\Psi_{kn}/dt = 0,$$

где  $I_k$  — ток в обмотке  $k$ -й фазы;  $R_k(t)$  — активное сопротивление  $k$ -й фазы;  $\Psi_k$  — потоко-сцепление  $k$ -й фазы;  $i_{kn}$  — ток  $n$  вторичного паразитного контура  $k$ -й фазы, наводимый от  $I_k$ ;  $U_k$  — напряжение, приложенное к  $k$ -й фазе.

Сделаем ряд упрощающих решение уравнений допущений: а) так как статор двигателя монолитен и учет действия вторичных контуров весьма затруднен, пренебрежем их действием; б) будем считать, что фазные обмотки не действуют друг на друга, поэтому в потоко-сцеплении учтем только индуктивность обмотки, которая складывается из постоянной и переменной составляющих (обусловленных изменением магнитного потока статор — якорь); в) будем считать, что электромагнитные процессы в стали происходят линейно и без насыщения.

Заменяя потокосцепление  $\Psi_k$  на величину, пропорциональную индуктивности фазной обмотки  $AL_k$ , получим

$$I_k R_k(t) + AL_k \frac{dI_k}{dt} + I_k \frac{dL_k}{dx \left( \frac{dx}{dt} \right)} = U_k.$$

Уравнение равновесия сил механического звена имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + P_n + P_{тр} \left( \text{sign} \frac{dx}{dt} \right) + cx + B \left( \frac{dx}{dt} \right)^\alpha = \\ = P_{max} \sum_1^k i_k^2 \sum_1^\infty G_v \sin \left( \frac{2\pi x}{\tau} \right),$$

где  $i_k$  — безразмерное значение тока;  $k$  — число фаз двигателя;  $m$  — масса якоря и нагрузки;  $c$  — жесткость возвратной пружины;  $B$  — коэффициент вязкости;  $G_v$  — значение безразмерной  $v$ -й пространственной гармоники разложения кривой магнитной проводимости системы зубец — впадина;  $P_{max}$  — максимальное статическое усилие двигателя;  $\tau$  — зубцовое деление;  $2\pi x/\tau$  — электрический угол рассогласования зубцов якоря и статора;  $P_{тр}$  — усредненное реактивное усилие (типа сухого трения).

Сделаем допущения: а) представим зубцовую зону симметричной, т. е.  $\tau = a + c$  и  $a = c$ , где  $a$  — ширина зубца;  $c$  — ширина впадины; б) зависимость усилия трения выразим как функцию линейной зависимости  $P_{тр} = kP'_{тр}$ ; в) количество членов ряда по  $v$  ограничим первой гармоникой. Тогда уравнение механического равновесия запишется следующим образом:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + P_n + P_{тр} \left( \text{sign} \frac{dx}{dt} \right) + B \left( \frac{dx}{dt} \right)^\alpha = P_{max} \sum_1^k i_k^2 G_1 \sin \frac{\pi x}{a}.$$

Запишем также уравнение электромагнитного равновесия в фазной обмотке:

$$I_k R_k(t) + L_k \frac{dI_k}{dt} + I_k \frac{dL_k}{dx} \left( \frac{dx}{dt} \right) = u_k.$$

Полученная система уравнений является системой в естественных координатах, так как построена для конкретных физических величин. Она содержит большое число неизвестных, поэтому ее решение целесообразно выполнять с помощью ЭВМ, для чего систему уравнений необходимо преобразовать и привести к безразмерным параметрам. Для преобразования введем обозначения.

1. *Базовые величины*:  $I_0$  — установившийся ток в фазе в тормозном режиме;  $R_0$  — активное сопротивление фазы в установившемся режиме.

2. *Временные величины*:  $\omega_0 = \sqrt{P_{max} \pi / (ma)}$  — собственная частота колебаний механического звена;  $T_0 = L_0 / R_0$  — постоянная

времени фазной обмотки от индуктивности рассеяния;  $T_0 = L_0/R_6$  — постоянная времени фазной обмотки от постоянной составляющей индуктивности;  $T_1 = L_1 \cos(\pi x/a)/R_6$  — постоянная времени фазной обмотки от переменной составляющей (первой гармоники) индуктивности;  $\tau = \omega_0 t$  — безразмерное время;  $F(x) = T_0 + T_1 \cos x$  — функция, пропорциональная магнитной проводимости в рабочем зазоре;  $F_1(x) = -T_1 \sin x$  — функция, пропорциональная статическому усилию.

3. *Относительные величины:*

$$i_k = \frac{I_k}{I_6}; \quad \rho(t) = \frac{R_k(t)}{R_6}; \quad u_k = \frac{U_k}{I_6 R_6}.$$

Произведем замену параметров и переменных через введенные величины. Уравнение электромагнитного равновесия в форме Коши примет вид

$$\frac{di_k}{dt} = \left[ \frac{1}{T_0 + F(x)} \right] \left[ U_k - i_k \left( \rho(t) + F_1(x) \frac{dx}{dt} \right) \right].$$

Для преобразования уравнения механического равновесия обозначим

$$P_{\pi} = \frac{a p_{\pi}}{\pi P_{\max}}; \quad P_{\tau p} = \frac{a p_{\tau p}}{\pi P_{\max}}; \quad C = \frac{ac}{\pi P_{\max}}.$$

Разделим все члены последнего уравнения электромагнитного равновесия на  $P_{\max}$  и введем  $t = \tau / \sqrt{P_{\max} \pi / (m a)}$ . Тогда

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \sum_{k=1}^m i_k \sin x - P_{\pi} - P_{\tau p} \left[ \operatorname{sign} \left( \frac{dx}{d\tau} \right) \right] - \frac{B}{\sqrt{P_{\max} \pi / g a}} \left( \frac{dx}{d\tau} \right)^{\alpha}.$$

Учитывая, что ЛШД выполняют четырехфазными со смещением зубцов на  $1/4$  зубцового деления, и принимая  $b = \frac{B}{\sqrt{P_{\max} P_{\pi} \pi / (g a)}}$ , получаем

$$\frac{d^2 x}{d\tau_1^2} = \sum_{k=1}^4 i_k \sin \left( x - k \frac{\pi}{2} \right) - P_{\pi} - P_{\tau p} \left[ \operatorname{sign} \left( \frac{dx}{d\tau_1} \right) \right] - b \left( \frac{dx}{d\tau_1} \right)^{\alpha}.$$

Таким образом, получена система уравнений дискретного линейного привода.

Подобная система из пяти уравнений аналитического решения не имеет. Для численного решения уравнений на ЭВМ необходимо определить границы изменения параметров, коэффициентов, определить начальные условия и выбрать метод решения.

Не останавливаясь подробно на разработке рабочей программы, можно рекомендовать метод интегрирования системы уравнений по Рунге—Кутту. Этот метод дает возможность получать промежуточные значения искомой величины, зная предыдущие значения и шаг интегрирования. Определение начальных условий



Рис. 7.5. Схема алгоритма программы

можно вести приравниванием к нулю всех производных в системе. Опуская промежуточные выкладки, можно записать основной параметр системы — текущую координату перемещения якоря двигателя или, что то же самое, РО в процессе отработки шага:

$$x_0 = \arccos \sqrt{(1 - P_n)/2}.$$

Алгоритм вычисления динамических характеристик составлен с учетом решения следующих основных задач: вычисление координат перемещения подвижной системы исполнительного механизма СУЗ в функции времени на единичном шаге; то же при серии шагов и при серии шагов с реверсом; вычисление значений токов в фазах двигателя при указанных выше режимах работы; вычис-

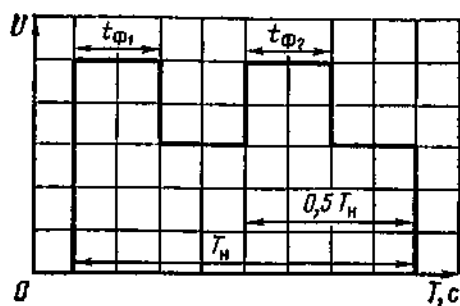


Рис. 7.6. График управляющих импульсов, подаваемых на обмотки ЛШД

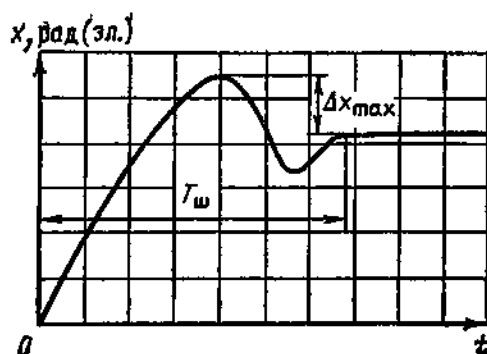


Рис. 7.7. Определение величины  $\Delta x_{max}$  при отработке шага

ление значений скорости перемещения подвижной системы, КПД и электромагнитного усилия двигателя.

Разработка алгоритма вычисления динамических характеристик дискретного линейного привода ведется с учетом использования в дальнейшем основных частей алгоритмов для решения различных задач. Поэтому алгоритм основной задачи разбит на автономные процедуры. На рис. 7.5 представлена схема алгоритма программы. Программа работает следующим образом. После ввода всех массивов производится перепись начальных данных и вычисление всех относительных значений величин, необходимых для работы блоков 6, 10, 11.

При коммутации ЛШД на его фазы подаются, как правило, импульсы повышенного (форсирующего) напряжения определенной длительности  $t_{\Phi}$ .

Разбиение времени форсировки  $T_H$  на две составляющие (рис. 7.6) выбрано для обеспечения возможности в дальнейшем усложнить форму рабочего импульса. Кроме этих величин в блоке 9 вычисляются также некоторые вспомогательные величины. Затем переходят к обращению к стандартной программе Рунге—Кутта, вычисляющей значение всех функций и производных, описываемых математической моделью. В блоках 10, 11, 6, 7 происходит вычисление правых частей и при необходимости производится форсировка.

После каждого очередного обращения к стандартной программе Рунге—Кутта производится проба на конец счета, на конец интервала (если счет не окончен), а также оценка на необходимость коммутации.

На рис. 7.7 показано, как определялись значения перерегулирования  $\Delta x_{max}$  и времени достижения приводом следующего установившегося положения  $T_{ш}$ .

Программа написана на языках АЛГОЛ-60 и АЛГОЛ-ГДР. Время просчета по программе одного шага вместе с трансляцией составляет для ЭВМ М-220 около 10 мин. Расчеты по программе составили объем 150 вариантов. На первой стадии исследовалась отработка единичного шага.



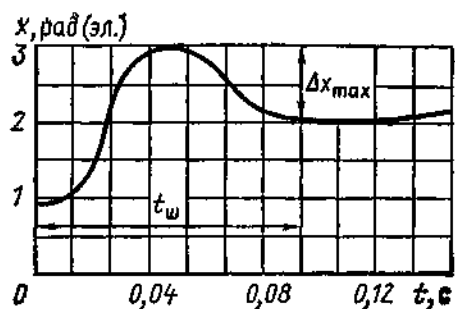


Рис. 7.8. График отработки единичного шага ЛШД с нагрузкой 700 Н

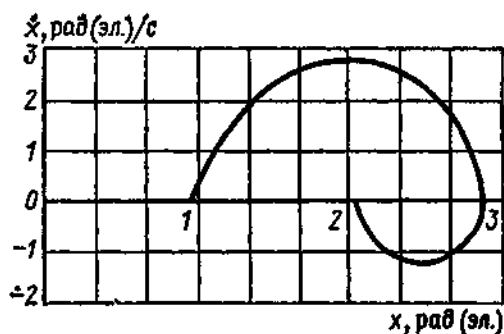


Рис. 7.9. Фазовый портрет отработки шага двигателя

На рис. 7.8 приведена типичная кривая перемещения РО с нагрузкой 700 Н, при максимальном статическом усилии двигателя 1300 Н и сопротивлении воды первого контура 250 Н при отработке единичного шага. Характер изменения скорости виден на фазовом портрете отработки шага, приведенном для рассматриваемого случая на рис. 7.9. Скорость перемещения якоря ЛШД при разгоне примерно вдвое превышает скорость при торможении.

Анализ семейства характеристик, подобных приведенным на рис. 7.8, позволяет выявить границы рабочих параметров привода, при которых движение носит устойчивый характер, т. е. имеет место один выброс перерегулирования и колебательный процесс прекращается за время отработки шага.

Это условие соблюдается при  $P_H \approx 0,7P_{max}$  и  $b \approx 4,1P_{max}$ .

Следует отметить, что при  $b < 0,05P_{max}$  значение перерегулирования увеличивается в несколько раз и превышает шаг.

Проведенный анализ позволил также выявить влияние нагрузки, сопротивления жидкости и электромагнитного усилия, развиваемого приводом, на время отработки единичного шага; эти зависимости приведены на рис. 7.10.

Как видно из рис. 7.10, время отработки шага значительно уменьшается с ростом электромагнитного усилия, затем это уменьшение замедляется. В небольшой области время отработки шага зависит линейно от гидравлического сопротивления. При дальнейшем увеличении напора время отработки шага при прочих равных условиях изменяется незначительно, что объясняется увеличением демпфирующего действия жидкости. Большое влияние на увеличение времени отработки шага оказывает инерционная нагрузка, значительно снижающая ускорения при отработке шага и увеличивающая колебательный процесс. Поэтому снижение массы подвижных элементов ИМ, в том числе и массы якоря ЛШД, является одной из основных задач, решаемых при конструировании.

Для повышения тягового усилия ЛШД и уменьшения электромагнитной постоянной времени магнитной системы двигателя используется форсировка подаваемых импульсов управления по напряжению. В связи с этим на математической модели исследовалось влияние амплитуды и длительности форсирующих импульсов

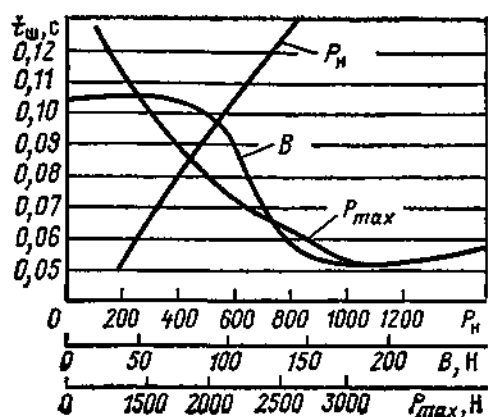


Рис. 7.10.

Рис. 7.10. Зависимость времени отработки шага  $t_{\text{ш}}$  от максимального статического усилия  $P_{\text{max}}$  нагрузки  $P_{\text{н}}$  и сопротивления потока жидкости  $B$

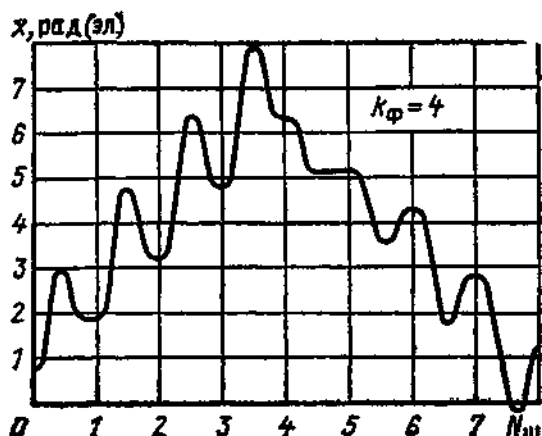


Рис. 7.11.

Рис. 7.11. Отработка шагов двигателя при четырехкратном увеличении напряжения

на характер перемещения подвижной системы, при этом значения коэффициента форсировки  $k_{\text{ф}}$  и длительности форсирующего импульса  $t_{\text{ф}}$  варьировались в пределах  $k_{\text{ф}}=2\div5$ ;  $t_{\text{ф}}=0,3\div0,8$ .

Расчеты проводились для различных сочетаний указанных параметров. При исследованиях было принято выбираемое обычно отношение максимального статического усилия к нагрузке  $P_{\text{max}}/P_{\text{н}}=2,5\div3$ , а отношение максимального статического усилия к силе трения, имеющее место в реальных двигателях с подшипниками из материала на основе графита,  $P_{\text{max}}/P_{\text{тр}}=4,5\div5$ . С учетом реальных расходов воды для охлаждения РО было принято  $P_{\text{max}}/b=18\div20$ .

Влияние амплитуды форсирующего импульса при указанных выше параметрах исследовалось при  $t_{\text{ф}}=0,6$ , что соответствует частоте около 6,5 Гц. Как показали исследования, устойчивая работа привода достигается при  $k_{\text{ф}}=4\div5$  (рис. 7.11).

Влияние длительности форсирующего импульса исследовалось при  $k_{\text{ф}}=5$ . Удовлетворительные результаты работы привода достигаются при  $t_{\text{ф}}=0,4\div0,8$ .

На рис. 7.12 приведены графики, на которых показано, как изменяется ошибка в отработке шага при  $t_{\text{ф}}=0,4\div0,7$ .

Исследования предельных частот, на которых двигатель может работать без сбоев, показало, что при указанных выше параметрах предельная частота для исследуемого двигателя составляет примерно 40 Гц (рис. 7.13). На рис. 7.14 и 7.15 показано, как влияют длительность и амплитуда управляющего импульса на тяговое усилие ЛШД.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что математическая модель ИМ с ЛШД позволяет определить основные параметры и характеристики ИМ, соответствующие его работе в динамическом режиме, с достаточной точностью (рис. 7.16).

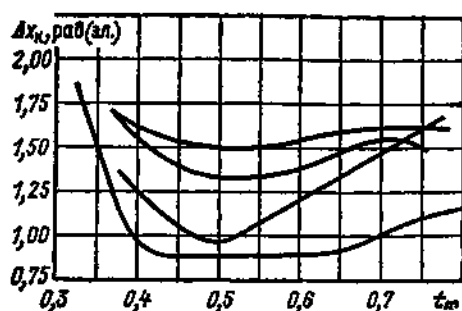


Рис. 7.12. Изменение ошибки при отработке шагов ЛШД в зависимости от длительности форсирующего импульса

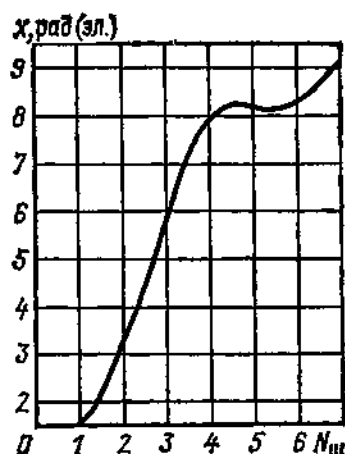


Рис. 7.13. Отработка ЛШД шагов при  $f=40$  Гц

**Динамические режимы работы исполнительного механизма СУЗ с ЛШД при воздействии возмущающих нагрузок.** ИМ СУЗ в процессе их эксплуатации могут испытывать воздействие внешних возмущающих нагрузок. Учет этих воздействий необходимо производить при проектировании механизмов с целью исключения влияния этих нагрузок на работоспособность конструкции. Переменные внешние силы могут вызывать перемещения, изменение скорости и ускорения отдельных элементов конструкции. В механизмах СУЗ с ЛШД, в которых РО удерживается или перемещается силами, создаваемыми электромагнитным полем, внешние возмущающие нагрузки могут привести к недопустимым выбросам РО из активной зоны реактора или к потере шагов, отрабатываемых ЛШД. Влияние этих внешних воздействий должно учитываться в основном при разработке исполнительных механизмов СУЗ для реакторов, эксплуатируемых в сейсмически опасных зонах.

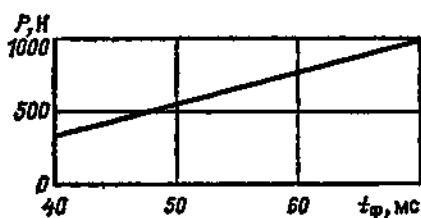
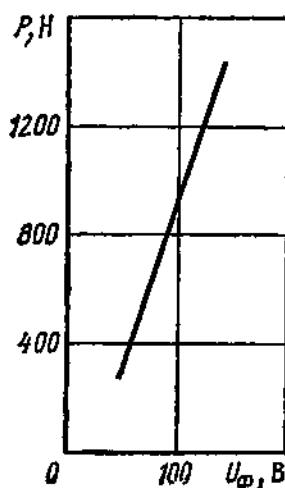


Рис. 7.14. Зависимость усилия ЛШД от длительности форсирующего импульса

Рис. 7.15. Зависимость усилия ЛШД от амплитуды форсирующего напряжения



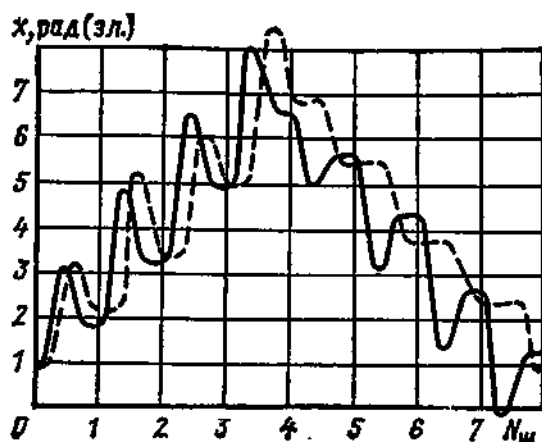


Рис. 7.16. Расчетная (—) и экспериментальная (---) зависимости отработки ЛШД серии шагов

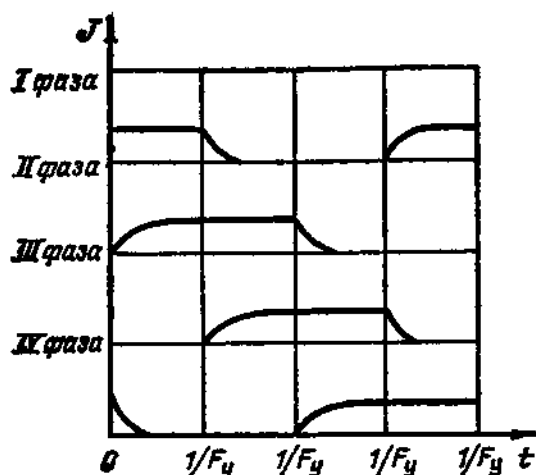


Рис. 7.17. Циклограмма коммутации ЛШД:  
1/F — частота коммутации

Рассмотрим режимы работы ИМ с ЛШД при воздействии возмущающих нагрузок. Отработка единичного шага и серии шагов ЛШД характеризуется кратковременно действующими на якорь усилиями, создаваемыми электромагнитным полем при импульсном питании фаз двигателя.

Возмущающая нагрузка может совпадать или не совпадать по фазе с электромагнитными усилиями и увеличивать или ослаблять эти усилия.

Исходными уравнениями, описывающими работу привода, являются уравнение электромагнитного равновесия в фазной обмотке и уравнение равновесия сил механического звена:

$$I_k R_k(t) + L_k \frac{dI_k}{dt} + I_k \frac{dL_k}{dx} \frac{dx}{dt} = U_k;$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + P_{тр} \operatorname{sign} \frac{dx}{dt} + P_n + cx +$$

$$+ B \left( \frac{dx}{dt} \right)^\alpha = P_{max} \sum_{k=1}^n i^2 G_1 \sin \frac{\pi x}{a}.$$

Закон функционирования системы (т. е. способ подключения питающих напряжений к обмоткам статора ЛШД) можно выразить циклограммой (рис. 7.17) и системой неравенств, которая для этого случая может быть записана в виде

$$U_k(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } (k+1)T \geq t > (k-1)T; \\ 0 & \text{при } (k+3)T \geq t > (k+1)T, \end{cases}$$

где  $k=1, 2, 3, 4$ ;  $T$  — период коммутации.

При учете влияния внешних нагрузок предполагается, что на ИМ действует инерционная сила, равная произведению массы подвижной системы на ускорение. Сила прикладывается в центре тяжести и рассматривается как статическая. Тогда указанные уравнения с учетом влияния внешних нагрузок примут вид

$$\begin{aligned} I_k R_k(t) + L_k \frac{dI_k}{dt} + I_k \frac{dL_k}{dx} \frac{dx}{dt} &= U_k; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} + P_{\pi} \operatorname{sign} \frac{dx}{dt} + P_{\pi} + cx + B \left( \frac{dx}{dt} \right)^{\alpha} &= \\ &= P_{\max} \sum_{k=1}^4 i_k G_1 \sin \frac{\pi x}{a} + m \frac{d^2 \varphi}{dt^2}, \end{aligned}$$

где  $\varphi$  — перемещение якоря под действием внешней нагрузки. Приведение членов уравнения к безразмерной форме было рассмотрено ранее.

Замена параметров и переменных дает следующее представление системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{1}{T_0 + F(x)} \left\{ U_k - i_k \rho(\tau) + F_1(x) \sqrt{\frac{P_{\max} \pi \cdot 9,81}{P_{\pi} a}} \frac{dx}{d\tau} \right\}; \\ \frac{d^2 x}{d\tau^2} &= \sum_{k=1}^4 i_k \sin \left( x - k \frac{\pi}{2} \right) - P_{\pi} - P_{\text{тр}} \operatorname{sign} \frac{dx}{d\tau} - \\ &- \frac{B}{\sqrt{P_{\max} P_{\pi} \pi / (9,81 a)}} \left( \frac{dx}{d\tau} \right)^{\alpha} + \frac{d^2 \varphi}{d\tau^2}. \end{aligned}$$

В данном случае возбуждение рассмотрено в форме полуволны синусоиды и задано в виде ускорения  $\varphi$ . Система из пяти уравнений может быть решена методом Рунге—Кутты на ЭВМ. Рассмотрим решение этой задачи на примере исполнительного механизма СУЗ с ЛШД для V блока Нововоронежской АЭС.

Ядерные реакторы АЭС типа ВВЭР-1000, оснащенные механизмами СУЗ с ЛШД, эксплуатируются в сейсмически опасных зонах, поэтому возникла задача проверки их работоспособности при воздействии возмущающих сейсмических нагрузок.

В техническом решении по вопросу проектирования реакторной установки ВВЭР-1000 в сейсмостойком исполнении представлено максимальное ускорение колебания почвы  $0,4g$  для периода  $0,1—0,5$  с (расчетная сейсмичность 9 баллов по шкале Рихтера).

В связи с этим было решено исследовать влияние максимального расчетного землетрясения при следующих режимах работы механизмов СУЗ: в тормозном режиме — удержание РО (статический режим); в рабочем режиме — перемещение РО (динамический режим); при остановке ИМ в условиях воздействия сейсми-

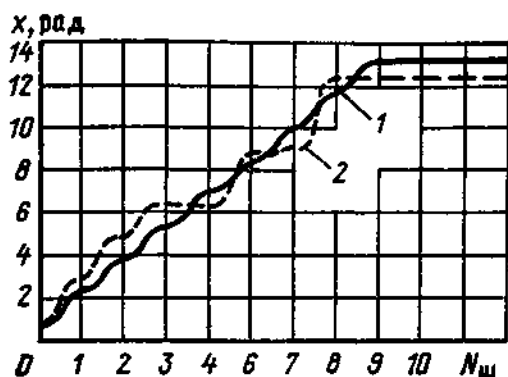


Рис. 7.18. График перемещения якоря ЛШД:

1 — без возбуждения; 2 — с возбуждением 0,4 g (период возбуждения 0,4 с)

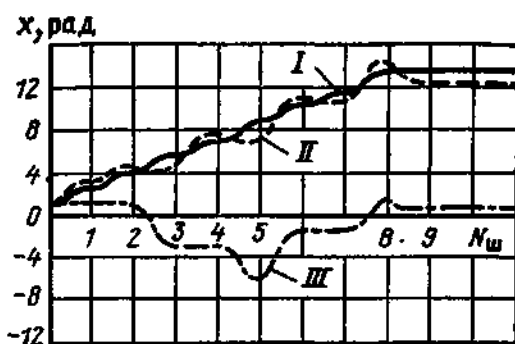


Рис. 7.19. График перемещения якоря ЛШД:

I — без возбуждения; II — положительное возбуждение; III — отрицательное возбуждение

ческих нагрузок (переход от динамического режима работы к статическому).

Предполагалось, что на ИМ СУЗ действует то же ускорение, что и на грунт. В этом случае возмущающая нагрузка вычислялась как произведение массы подвижной системы механизма на ускорение. При этих допущениях механизм исследовался в наиболее тяжелых условиях.

За основу для разработки программы была взята описанная выше программа расчета динамических режимов исполнительных механизмов СУЗ. Однако в эту программу были внесены коррективы, касающиеся учета внешних воздействий, автоматического перехода от динамического режима работы механизма к статическому и расчета ошибки в шагах, обрабатываемых ЛШД. В программе предусматривался автоматический счет вариантов. Количество вариантов не ограничено. Время просчета одного варианта при восьми шагах занимало 11 мин.

Программа составлена на языке АЛГОЛ-ГДР. Колода перфокарт составлена с учетом требований мониторинг системы ДУБНА и операционной системы ДИСПАК. Стандартная программа Рунге—Кутты включена в виде стандартного массива. Время просчета одного шага (одной коммутации) в динамике около 45 с. Подробное изложение исследований приведено в [23]. Расчеты велись при значении параметров  $P=1300$  Н;  $P_n=580$  Н;  $P_{тр}=380$  Н.

При расчетах учитывались только внешние нагрузки, направленные вдоль оси привода, так как это направление является наиболее опасным с точки зрения обеспечения требований ядерной безопасности установки. Оно может быть направлено вертикально вверх (положительное возбуждение) или вертикально вниз (отрицательное возбуждение).

Результаты расчета привода в режиме статики показывают, что привод выдерживает внешние нагрузки до  $5g$  ( $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>) с периодом до 0,5 с. Смещение при этом незначительное. В динамике смещение якоря зависит от направления удара. При поло-

жительном направлении смещение якоря незначительное (рис. 7.18). При отрицательном направлении удара (рис. 7.19) смещение якоря может быть от 32 до 60 мм, а при возбуждении 0,4g и периоде 0,5 с — до 120 мм. Смещение происходит в направлении удара, т. е. в направлении ввода в активную зону, а поэтому к аварийной ситуации не приводит.

При больших возмущениях смещение увеличивается, но при переходе на статику движение якоря вверх или вниз прекращается, т. е. существует возможность прекратить движение РО, вызванное ударом, превышающим допустимое значение.

Следует заметить, что в результате эксперимента возможны изменения коэффициентов, входящих в основные уравнения, и как следствие, уточнение модели.

Устойчивость работы исполнительного механизма СУЗ V блока Нововоронежской АЭС при воздействии возмущающих нагрузок, определенная по приведенной методике, подтверждена экспериментальным путем.

Приведенная выше методика может быть использована и при воздействии другого вида возмущающих нагрузок. Для этого в уравнение механического звена, описывающего поведение привода в динамическом режиме работы, необходимо ввести дополнительный член, учитывающий характер этой возмущающей нагрузки.

Оптимизация динамических режимов исполнительного механизма СУЗ с линейным шаговым электродвигателем. В процессе проведения расчетов возникает задача отыскания таких сочетаний параметров ИМ, при которых характер движения нагрузки был бы наиболее близок к оптимальному. Задача может быть сформулирована как определение значений переменных  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , при которых целевая функция  $\Pi(x_n)$  при определенных ограничениях имеет оптимальные значения.

Для решения этой задачи была разработана программа для ЭВМ, рассчитывающая параметры привода, наиболее точно отвечающие поставленной задаче. Задача оптимизации функции многих переменных обычно сводится к решению системы уравнений в некоторых областях. При этом предполагается, что функция унимодальна, т. е. дифференцируема во внутренней точке области по всем переменным. Тогда оптимум этой функции будет соответствовать точке, где частные производные по всем переменным равны нулю. Будем в дальнейшем называть функцию  $\Pi(x_n)$  целевой функцией. Известно, что задача отыскания глобального максимума (минимума) в оптимизационных расчетах находится еще в стадии разработки. Поэтому на основании опыта выбирают некоторые точки, в области которых производится поиск локальных экстремумов. Анализ результатов такого поиска помогает подойти к определению области глобального экстремума. Существует ряд методов поиска локальных экстремумов. Из наиболее часто применяемых в практике расчетов можно назвать метод дополнения до квадрата (метод наименьших квадратов), градиентный метод и метод конфигураций. Последний метод и был выбран для

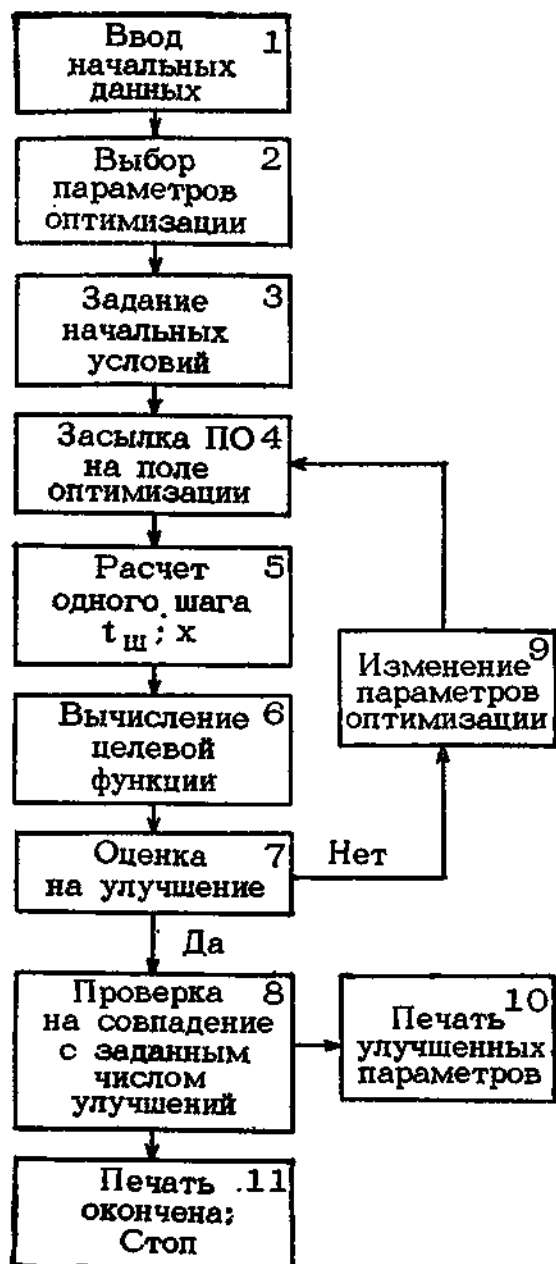


Рис. 7.20. Структурная схема алгоритма программы поиска оптимальных параметров привода

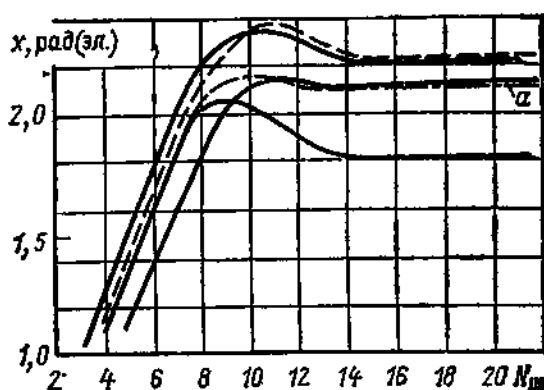


Рис. 7.21. Единичные шаги последовательно оптимизируемого привода

решения задачи определения оптимума целевой функции при расчетах динамических характеристик ИМ с линейным шаговым электродвигателем как наиболее скоростной.

Схема алгоритма программы поиска оптимальных параметров исполнительного механизма приведена на рис. 7.20.

Поскольку процесс перехода якоря с одного установившегося положения на другое сопровождается пере-

ходным процессом, был использован разработанный в теории автоматического регулирования метод интегральной оценки. Оптимизация велась только по параметрам: максимальное статическое усилие двигателя, постоянные времени катушек, амплитуда и время форсировки. Остальные параметры (по технологии И. М. Гельфанда «несущественные») были приняты постоянными.

Сравнение оптимизации по пяти параметрам с шаговой оптимизацией по одному показало, что оптимизационные расчеты следует вести последовательно, внося улучшающие изменения по одному. Для проверки этой гипотезы были проведены расчеты. Результат оптимизации по каждому параметру вносился в массив исходных параметров оптимизации, и дальнейшая оптимизация по нему запрещалась. На рис. 7.21 представлены единичные шаги



последовательно оптимизированного привода. Из зависимости рис. 7.21 видно, что наилучшее состояние параметров соответствует кривой *a*.

## **Глава восьмая**

# **РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ**

## **8.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ НОВОГО КЛАССА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ С ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ**

Прогресс в развитии ядерных энергетических установок, повышение их экономичности связаны с увеличением их единичной мощности, что обеспечивается повышением энергонапряженности активных зон ядерных реакторов, т. е. мощности на единицу объема активной зоны.

Это приближает параметры эксплуатации тепловыделяющих элементов к предельным значениям. При этом увеличиваются также размеры активных зон, что требует выравнивания энерговыделения или плотности нейтронного потока по всему их объему.

Значительно возрастает также интенсивность ионизирующих излучений и повышаются параметры теплоносителя (температура, расход, давление), что приводит к работе элементов конструкции, расположенных в первом контуре, в условиях, близких к экстремальным.

Кроме того, характерной особенностью динамики таких установок является нестабильность распределения энерговыделения в активной зоне. В зависимости от конкретных физических, термодинамических и геометрических характеристик реактора форма и время развития нестабильности распределения энерговыделения могут меняться в широких пределах, при этом время развития нестабильности распределения может достигать десятков секунд.

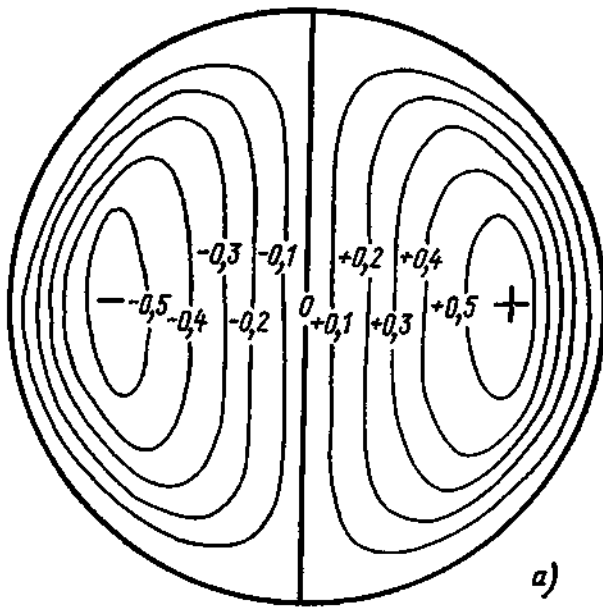
Проведенные расчетно-теоретические исследования и эксперименты по определению эффектов реактивности и характеристик распределения энерговыделения при работе ядерного реактора большой мощности показали, что отклонения поля от исходного состояния при включенном автоматическом регуляторе, когда действия по поддержанию формы поля временно прекращаются, имеют вид, показанный на рис. 8.1.

Наряду с азимутальной ориентацией перекосов поля имеют место также колебания аксиального распределения энерговыделения. Таким образом, колебания поля энерговыделения в активной зоне мощных ядерных реакторов носят объемный характер (рис. 8.2).

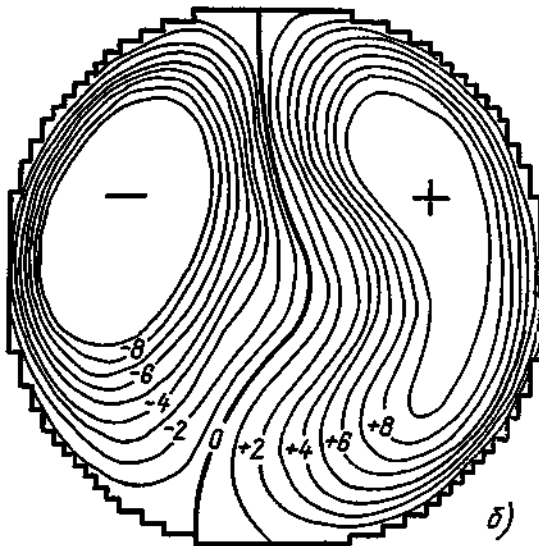
Это потребовало нового подхода к формированию и построению систем управления, которые могли бы эффективно решать задачи оптимизации энерговыделения в активных зонах в целях по-

Рис. 8.1. Отклонения поля от исходного состояния:

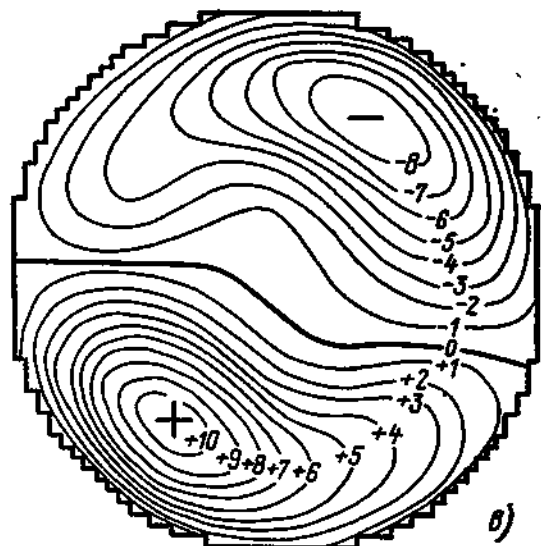
*a* — линии равных значений первой азимутальной гармоники; *б* и *в* — линии равных отклонений поля энерговыделения



*a)*



*б)*



*в)*

вышения экономичности и обеспечения безопасной эксплуатации ядерных установок. Важнейшими особенностями таких систем являются большое число контролируемых технологических параметров и параметров, контролируемых датчиками плотности потока нейтронов системы контроля энергораспределения (СКЭ) по объему активной зоны, использование большого числа РО и специальных локальных регуляторов, осуществляющих выравнивание энерговыделения в отдельных областях активной зоны.

В связи со значительным увеличением объема информации для ее обработки и выдачи сигналов оператору и в систему управления в настоящее время используются ЭВМ, на базе которых формируются автоматизированные системы контроля и управления (АСКУ), проектирование которых тесно связано с проектированием реакторной установки.

Создание ИМ для таких ядерных установок потребовало: обес-

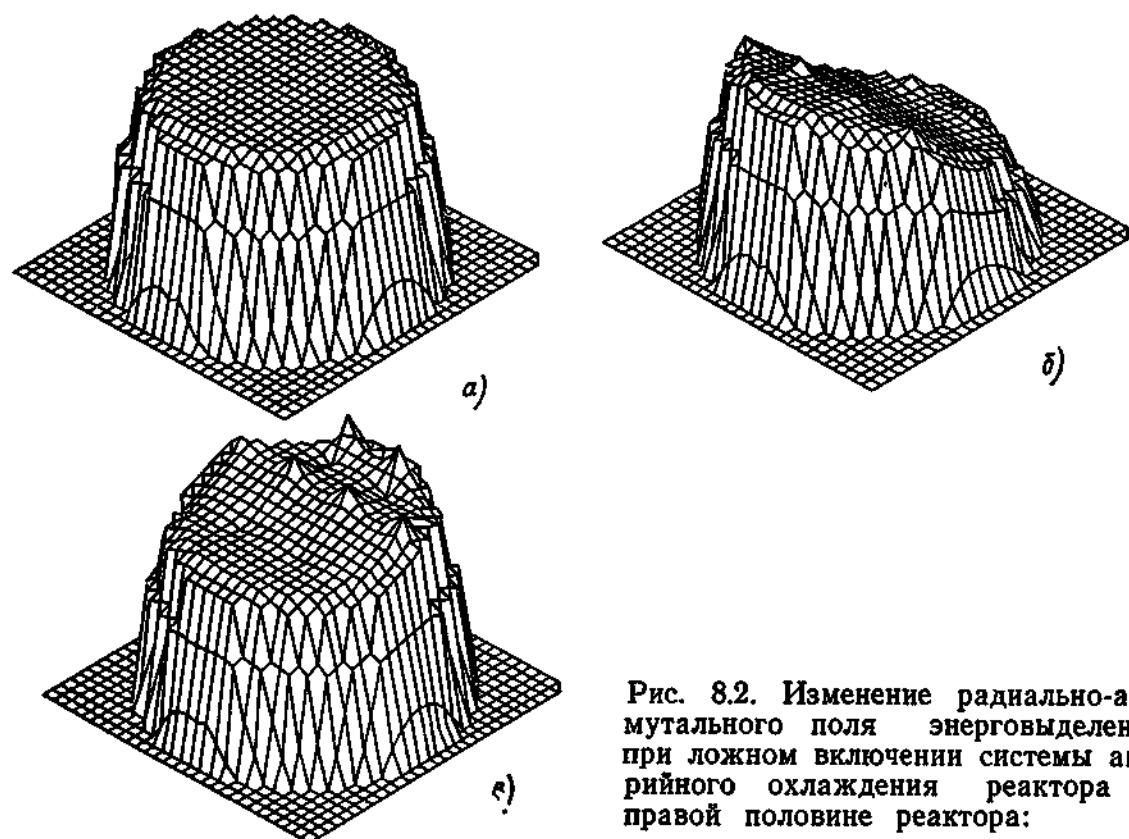


Рис. 8.2. Изменение радиально-азимутального поля энерговыделения при ложном включении системы аварийного охлаждения реактора на правой половине реактора:  
 $a - t=0$ ;  $b - t=6$  с;  $c - t=32$  с

печения универсальности ИМ, выполняющих в системе управления реактором функции автоматического регулирования, компенсации реактивности, аварийной защиты, а при необходимости и функции локальных регуляторов и регуляторов плотности нейтронного потока по высоте активной зоны; обеспечения высокого быстродействия; обеспечения высокой точности перемещения РО в заданное положение, сведения к минимуму числа элементов механизма, расположенных в первом контуре реактора; максимального упрощения кинематической схемы; возможности регулирования скорости перемещения регулирующего органа; обеспечения хорошей согласованности с ЭВМ по сигналам как управления приводом СУЗ, так и датчика положения регулирующего органа; надежного обеспечения во всех случаях срабатывания по аварийным сигналам; обеспечения устойчивой работы и аварийного срабатывания при воздействии возмущающих нагрузок; обеспечения высокой надежности.

Выполнение этих требований обусловило проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по апробации различных конструктивных решений. Важным этапом в решении этой задачи явилось создание дискретного ИМ с герметичным линейным шаговым двигателем для реактора ВВЭР-1000 В блока Нововоронежской АЭС. Такие ИМ позволили впервые в отечественной практике создать дискретные системы управления и блоки управления силовыми шаговыми электродвигателями [9].

Основными свойствами систем управления с дискретными исполнительными механизмами СУЗ являются: высокое быстродействие; жесткое преобразование управляющих импульсов в фиксированное перемещение РО дискретным ИМ; пропорциональность средней скорости перемещения РО частоте управляющих импульсов; пропорциональность перемещения РО числу управляющих импульсов, поданных на вход дискретного ИМ; фиксация РО в интервалах между подачей управляющих импульсов; вхождение дискретных ИМ в синхронизм без скольжения и остановка их без выбега; высокая точность перемещения РО; возможность синхронного перемещения групп РО без применения дополнительных устройств для их синхронизации.

## 8.2. КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ДИСКРЕТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕХАНИЗМА СУЗ

Большинство ядерных реакторов регулируется путем перемещения в активной зоне регулирующих органов СУЗ различной конфигурации, содержащих поглощающие нейтроны материалы и совершающих возвратно-поступательное движение. Эти регулирующие органы СУЗ, как правило, находятся в среде теплоносителя при высоких температуре и давлении. С учетом этих условий понятен интерес, проявляемый конструкторами, к созданию привода для перемещения регулирующего органа с использованием сил электромагнитного поля. Такие приводы могут быть созданы на основе линейных электрических машин. Они имеют значительные преимущества перед другими видами приводов, а именно возможность создания герметичных приводов (так как электромагнитное поле может проходить сквозь герметичную перегородку) и замены индуктора без разгерметизации привода; универсальность привода, т. е. работа его в различных режимах; регулирование скорости перемещения органов СУЗ с помощью изменения параметров электромагнитного поля; использование сил электромагнитного поля для разгона РО при аварийном срабатывании и его торможении в конце пути.

Важным этапом в реализации этого направления было создание впервые в отечественном реакторостроении линейного электромагнитного дискретного ИМ СУЗ на основе четырехфазного линейного шагового электродвигателя.

На рис. 8.3 приведена конструктивная схема такого механизма.

На прочном корпусе 1 устанавливается статор 2 четырехфазного ЛШД; внутри корпуса 1 установлены полюсные наконечники 3 и подшипники 4, в которых перемещается якорь 5. На якоре 5 смонтирован активный элемент 6 датчика положения РО, связанного с якорем. Катушки 7 датчика расположены на прочном корпусе, смонтированном, например, на патрубке крышки реактора. Позициями 8, 9 и 10 показаны магнитные силовые линии в рабочем зазоре ЛШД. В режиме фиксированного удержания

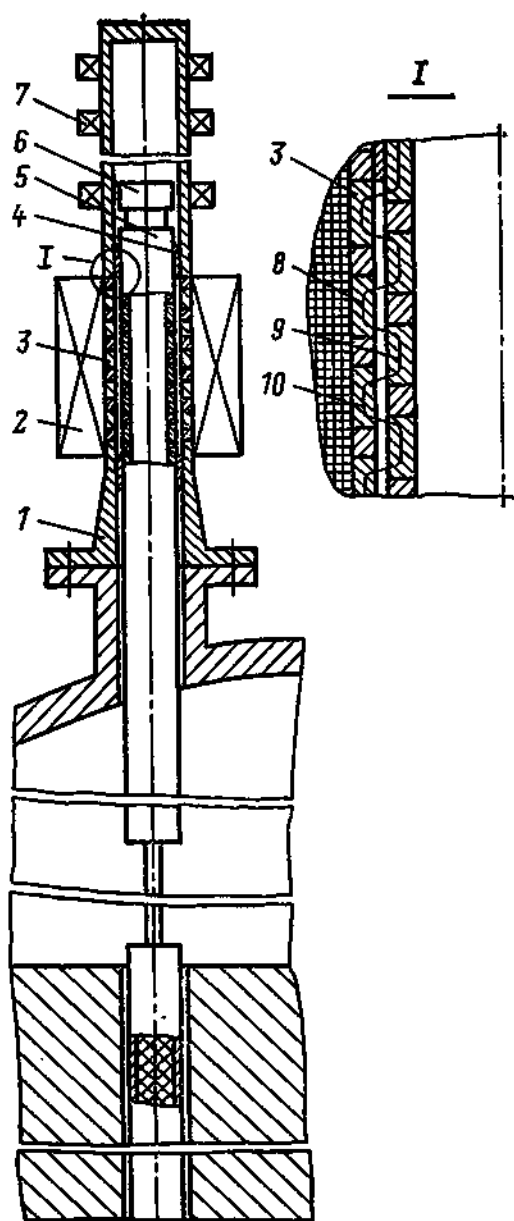


Рис. 8.3. Конструкция линейного шагового механизма СУЗ

РО (тормозной режим) якорь, связанный с РО, удерживается силами, создаваемыми электромагнитным полем в зубчатом рабочем зазоре при возбуждении обмоток управления.

Статор двигателя выполнен из четырех секций-фаз. Фаза имеет магнитопровод с обмоткой управления. В расточке магнитопровода статора или на полюсных наконечниках расположены зубцы. Такие же зубцы выполнены и на якоре, который соединен с РО. Секции разделены немагнитными вставками.

На рис. 8.4 представлена схема отработки шагов при коммутации четырехфазного ЛШД. На каждой секции (фазе) условно показан только один зубец. Для обеспечения реверсивности зубцы статора каждой соседней фазы сдвинуты относительно друг друга на четверть расстояния между зубцами (на четверть зубцового деления  $\tau$ ). Если обозначить ширину зубца через  $a$ , а впадины через  $c$ , то зубцовое деление  $\tau = a + c$ .

При включении двух фаз (например, I и II) ЛШД находится в режиме фиксированной стоянки. Якорь удерживается силами, образуемыми магнитными потоками, которые замыкаются через

зубцы статора и якоря. При этом на III фазе конструктивно обеспечивается некоторое перекрытие зубцов статора и якоря  $y$ .

Для перемещения якоря (рабочий режим) включается следующая фаза ЛШД и отключается включенная ранее. При этом якорь перемещается на шаг  $t_{ш} = \tau/m$ , где  $m$  — число фаз двигателя.

Обозначив  $c/a = \beta$ , можно записать  $t_{ш} = a(1 + \beta)/m$ .

На пусковые характеристики исполнительного механизма СУЗ с ЛШД оказывает влияние перекрытие зубцов  $y$  якоря и статора на включаемой фазе:

$$y = a - \frac{\tau}{m} \left[ \frac{n-1}{2} + i \right] \quad \text{или} \quad y = a - \frac{a(1+\beta)}{m} \left[ \frac{n-1}{2} + i \right],$$



Рис. 8.4. Отработка шагов при коммутации ЛШД

где  $i$  — число, показывающее, на какой по счету фазе после включенных определяется значение  $y$ . Например, если в четырехфазном двигателе включены первая и вторая фазы ( $n=2$ ) и нужно определить  $y$  на третьей, то  $i=1$ . Удобнее написать эти выражения в долях зубцового деления

$$y = \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{m} \left[ \frac{n-1}{2} + i \right], \quad t_{\text{ш}} = 1/m.$$

К основным преимуществам исполнительных механизмов СУЗ, построенным на базе четырехфазных ЛШД, относятся: высокое быстродействие, высокая точность отработки шага, отсутствие выбегов, так как на якорь двигателя в фиксированном положении воздействуют две фазы двигателя, и относительная простота схемы управления.

Использование в последнее время в схемах управления ЛШД тиристоров открыло перспективу создания бесконтактных систем дискретного действия с силовыми ЛШД.

### 8.3. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

Принципиальная схема магнитной системы, направление магнитных потоков и конструктивное выполнение отдельных элементов магнитной системы во многом определяются конструкцией исполнительного механизма СУЗ, его параметрами и характеристиками, компоновкой на ядерном реакторе и условиями его эксплуатации (требования к герметизации, условия охлаждения, условия монтажа и демонтажа, характер связи с РО и др.).

При значительной партии изготавливаемых серийно механизмов СУЗ на выбор конструктивной схемы магнитной системы значительное влияние оказывают технологические факторы.

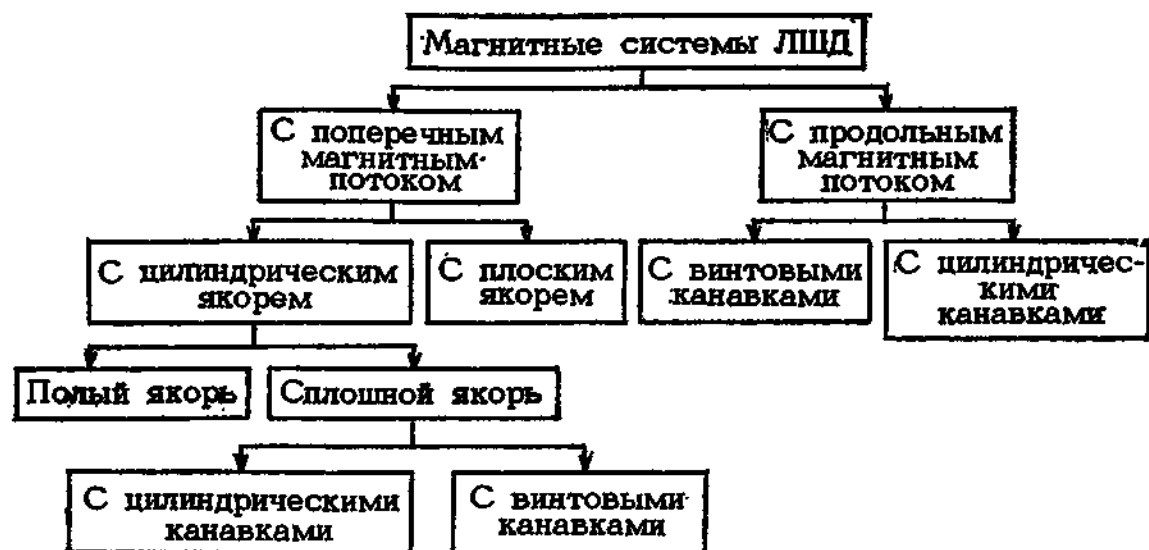


Рис. 8.5. Магнитные системы ЛШД

В настоящее время накоплен известный опыт по разработке линейных электромагнитных исполнительных механизмов СУЗ с ЛШД, обобщение которого позволяет произвести выбор наиболее рациональных конструктивных схем магнитных систем ЛШД для исполнительных механизмов СУЗ различных ядерных реакторов с учетом указанных выше факторов.

На рис. 8.5 показаны используемые в реакторостроении магнитные системы ЛШД. Рассмотрим эти системы.

**Магнитные системы с поперечным магнитным потоком.** В настоящее время магнитные системы ЛШД с поперечным магнитным потоком (проходящим через якорь в его поперечном сечении) и цилиндрическим якорем получили распространение в ряде исполнительных механизмов СУЗ.

Магнитная система с цилиндрическим сплошным якорем показана на рис. 8.6. Такая схема является достаточно технологичной, позволяет обеспечить относительно высокое быстродействие ЛШД, так как его электромагнитная постоянная времени определяется постоянной времени отдельного магнитного контура. Однако использование сплошного якоря значительно снижает удельные показатели ЛШД за счет увеличения массы одного погонного метра якоря. Поэтому такая магнитная система используется, как правило, в исполнительных механизмах СУЗ с относительно небольшим ходом РО (когда масса якоря невелика), в основном в исследовательских ядерных реакторах, в которых масса РО, как правило, составляет 0,5—5 кг.

Для формирования зубцовой зоны в таких магнитных системах на якорь, полюсах или полюсных наконечниках протачивались цилиндрические кольцевые канавки.

Однако выполнение таких канавок значительно осложняло технологию изготовления и, кроме того, приводило к накопленной погрешности в шаге по длине якоря, что в свою очередь ухудшало характеристики двигателя.

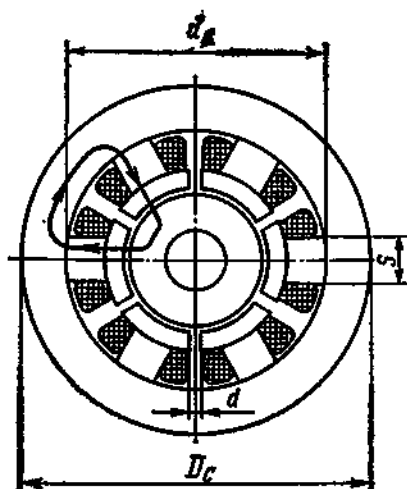


Рис. 8.6. Магнитная система ЛШД с цилиндрическим сплошным якорем

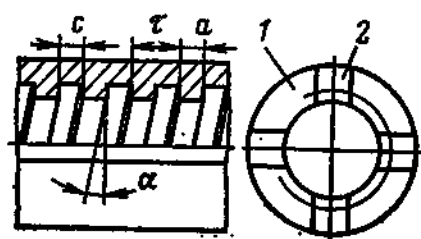


Рис. 8.7. Полусный наконечник с зубцовым делением в виде резьбы:

1 — полусный наконечник; 2 — немагнитные проставки

Для устранения этих недостатков была разработана и испытана конструктивная схема магнитной системы с винтовыми канавками на якоре и полюсных наконечниках, при выполнении которых снижаются погрешности в шаге зубцовой зоны и повышается технологичность конструкции.

При выполнении ЛШД по четырехполюсной схеме (рис. 8.7) полюсной наконечник 1 выполняется в виде втулки из магнитомягкого материала, в которую ввариваются немагнитные проставки 2 для предотвращения шунтирования магнитного потока (рис. 8.7). После механической обработки втулки на ее внутренней цилиндрической поверхности нарезается прямоугольная резьба с осевым шагом  $\tau$ , соответствующим зубцовому делению. Такая же резьба нарезается на цилиндрическом якоре (рис. 8.8). Эта конструкция была впервые использована при создании исполнительного механизма СУЗ с ЛШД для исследовательского реактора.

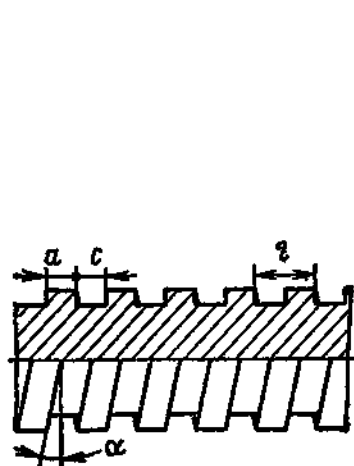


Рис. 8.8. Якорь ЛШД с полюсным делением в виде резьбы

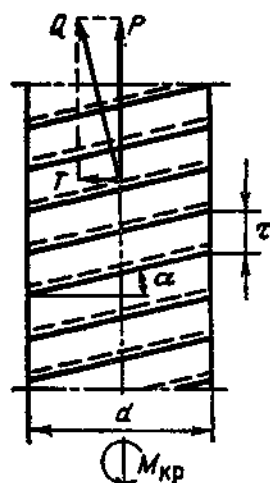


Рис. 8.9. Усилия, действующие на якорь ЛШД (пунктиром показаны зубы статора)

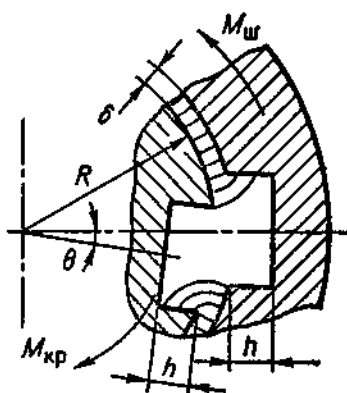


Рис. 8.10. Принцип действия магнитной шпонки



Однако в этой конструкции на якорь действует крутящий момент (рис. 8.9), который определяется из соотношения  $M_{кр} = Q\tau/(2\pi)$ , где  $Q$  — электромагнитное усилие, действующее по нормали к зубцам.

Использование для предотвращения вращения якоря традиционных механических элементов связано с возникновением сил трения и износом этих элементов. Поэтому для указанных целей была разработана конструкция магнитной системы с «магнитной шпонкой», принцип действия которой приведен на рис. 8.10.

На якоре и полюсных наконечниках выполняются продольные пазы глубиной  $h$ , число которых соответствует числу магнитных контуров.

При возникновении на якоре ЛШД крутящего момента  $M_{кр}$  якорь поворачивается на некоторый угол  $\theta$  и в этом положении уравнивается моментом  $M_{ш}$ , создаваемым «магнитной шпонкой».

Магнитные силы возникают вследствие смещения продольного паза якоря относительно продольного паза полюсного наконечника.

Статический момент  $M_{ш}$  может быть определен из выражения

$$M_{ш} = kF_{\delta}^2 \frac{dG}{d\theta} n,$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $n$  — число пазов на якоре и полюсных наконечниках;  $F_{\delta}$  — магнитодвижущая сила рабочего зазора  $\delta$ ;  $G$  — магнитная проводимость рабочего зазора.

Значение производной магнитной проводимости по углу рассогласования  $dG/d\theta$  может быть определено по методике, приведенной в гл. 4.

Выполнение на якоре двигателя винтовой нарезки и продольных пазов для создания эффекта «магнитной шпонки» требует тщательной зачистки большого числа острых кромок для предотвращения износа подшипников и, кроме того, вызывает неравномерное давление на цилиндрическую поверхность подшипников и уменьшение рабочей поверхности трения, что также увеличивает износ подшипников. Для устранения этих недостатков была разработана технология заполнения впадин винтовой нарезки и продольных пазов нержавеющей немагнитной сталью методом плазменного напыления. Материал якоря и напыляемый материал должны иметь одинаковые температурные коэффициенты линейного расширения. Подготовка напыляемой детали заключается в очистке ее поверхности от загрязнений и последующем придании поверхности шероховатости.

На рис. 8.11 показан якорь ЛШД с винтовой нарезкой и четырьмя продольными пазами для «магнитных шпонок», изготовленный с использованием указанной технологии для исследовательского реактора. После заполнения пазов на якоре методом плазменного напыления якорь протачивается и шлифуется. При использовании цилиндрического гладкого якоря необходимо вы-

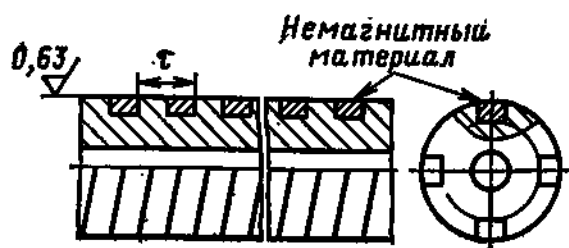


Рис. 8.11. Якорь ЛШД

полнить на подшипниках продольные или спиральные канавки для перетечки воды или газа при движении якоря.

Для улучшения показателей линейного шагового двигателя была разработана конструктивная схема магнитной системы с полым якорем.

Магнитная система с полым якорем показана на рис. 8.12. При такой конструкции якоря удалось примерно на порядок уменьшить массу одного погонного метра якоря и примерно в 2 раза увеличить усилие ЛШД за счет двойного рабочего зазора.

Шунтирование магнитного потока в этой конструкции предотвращается немагнитными вставками, выполненными на полюсных наконечниках и вдоль якоря. Эти же вставки выполняют функции «магнитной шпонки», предотвращая вращение якоря.

Такая магнитная система использована при разработке ряда исполнительных механизмов СУЗ с большим ходом РО (до 3,5 м), и в частности исполнительных механизмов СУЗ ядерного реактора ВВЭР-1000 для Нововоронежской АЭС.

Точная фрезеровка пазов в якорь ЛШД требует использования специального оборудования, в частности фрезерных станков с цифровым программным управлением; после фрезеровки требуется снятие заусенцев на зубцах и тщательная отделка внутренней и наружной поверхностей якоря. Для прохождения магнитного потока в прочный корпус двигателя необходима сварка магнитомягких вставок, а для исключения шунтирования магнитного потока нужна наплавка немагнитных продольных швов вдоль оси якоря и полюсных наконечников.

В такой конструкции ЛШД силы бокового тяжения действуют как на внутренний сердечник, так и на якорь с внешней стороны, что требует установки удвоенного количества подшипников.

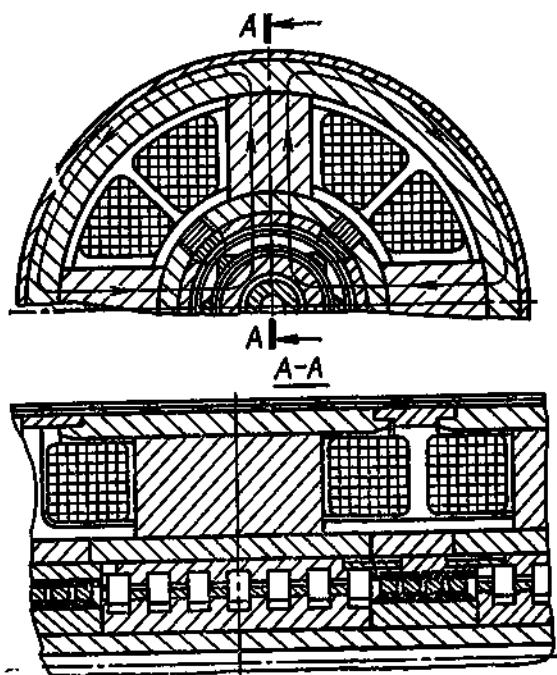


Рис. 8.12. Конструкция ЛШД

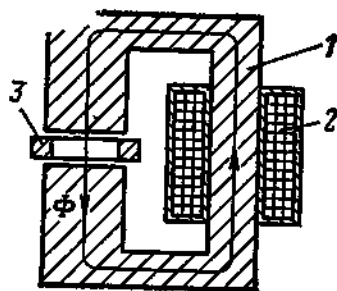


Рис. 8.13.

Рис. 8.13. Магнитная система ЛШД с плоским якорем:

1 — магнитопровод; 2 — катушка; 3 — якорь

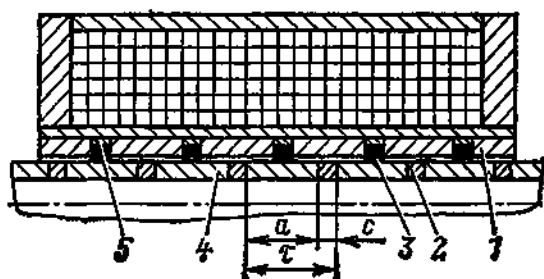


Рис. 8.14.

Рис. 8.14. Магнитная система с подшипниками на статоре:

1 — полюсный наконечник; 2 — немагнитный материал; 3 — подшипник; 4 — втулка из магнитомягкого материала; 5 — кольцо

Магнитная система с поперечным прохождением магнитного потока не позволяет разместить вокруг полюсов значительный объем меди, что для обеспечения повышенных электромагнитных усилий при двойном рабочем зазоре приводит к увеличению форсировки по напряжению, а следовательно, к более напряженным тепловым режимам работы ЛШД. Оптимальное решение указанной задачи требует использования нагревостойких обмоточных проводов и пропиточных составов и введения дополнительного охлаждения путем циркуляции воздуха между статором и прочным корпусом двигателя.

Магнитная система статора, расположенного за прочным корпусом, может быть изготовлена из обычных электротехнических сталей или изготовлена шихтованной из тонколистовой электротехнической стали с теплостойким покрытием пластин (например, путем фосфатирования) и скреплением их между собой с помощью сварки. Использование шихтованного статора позволяет значительно снизить потери в стали от вихревых токов, а монолитный якорь способствует гашению его колебаний при отработке шага вследствие возникновения в нем вихревых токов. Выделяемое при этом в якоре тепло отводится теплоносителем. Магнитные системы с плоским якорем имеют ряд преимуществ, к основным из которых относятся относительно простая конструкция и небольшой вес якоря. Магнитная система ЛШД с плоским якорем дана на рис. 8.13.

Проведем сравнительный анализ магнитных систем ЛШД с плоским и полым якорями. Если принять, что рабочая ширина плоского якоря соответствует наружному диаметру полого якоря, а толщины их одинаковы, то нетрудно показать, что при тех же параметрах зубцового деления активная поверхность полого якоря примерно в 2 раза больше активной поверхности плоского якоря. Если допустить, что усилие двигателя при прочих равных условиях пропорционально активной поверхности, то усилие двигателя с плоским якорем будет примерно в 2 раза меньше.

Несмотря на некоторое недоиспользование магнитной системы с плоским якорем по усилию, такие магнитные системы могут успешно использоваться в тех случаях, когда необходимо значительно повысить приемистость ЛШД за счет снижения инерционности якоря и получить простую конструкцию магнитной системы.

**Магнитные системы с продольным магнитным потоком.** В отличие от магнитных систем, в которых магнитный поток проходит поперек якоря, в таких системах магнитный поток проходит вдоль оси якоря, а магнитное поле многократно модулируется в рабочем зазоре зубцовой зоны якоря и полюсных наконечников.

Схема одной фазы ЛШД с такой магнитной системой показана на рис. 8.14. Магнитная система с продольным магнитным потоком имеет ряд существенных преимуществ, к которым относятся: простая конструкция магнитопровода и обмотки управления; обеспечение значительных усилий двигателя.

Важным преимуществом этой системы является то, что магнитный поток проходит по периферийной части якоря, поэтому общая площадь его сечения практически не оказывает влияния на усилие. Это позволяет размещать внутри якоря различные элементы исполнительного механизма СУЗ, такие, как индуктивные катушки датчика положения РО, элементы сцепления привода с РО и др.

Пространство статорной части магнитопровода рационально используется и позволяет разместить большой объем меди, достаточный для создания необходимой МДС, обеспечивающей требуемую магнитную индукцию в рабочем зазоре.

Следует также отметить, что суммарный рабочий зазор, через который проходит магнитный поток, может колебаться от нескольких миллиметров до десятков миллиметров, чем и обеспечиваются значительные усилия, развиваемые двигателем, при условии создания необходимой МДС.

При значительных размерах магнитной системы обмотка управления может изготавливаться из нескольких частей, которые могут быть в зависимости от требуемого сопротивления соединены последовательно, параллельно или последовательно-параллельно.

Важной особенностью магнитной системы с продольным магнитным потоком является соотношение основных параметров зубцовой зоны  $\beta = c/a < 1$ , так как при других значениях  $\beta$  модуляция магнитного потока будет невозможна.

Минимальный шаг, который может устойчиво отрабатывать ЛШД с такой магнитной системой, составляет 2,5—3 мм.

Важное значение в таких магнитных системах имеет конструктивное выполнение подшипниковых узлов. На рис. 8.14 показана установка подшипников на немагнитных участках полюсных наконечников. Для обеспечения работоспособности таких подшипников требуется тщательная обработка наружной поверхности якоря и, кроме того, выбор материала немагнитных проставок с коэффициентом линейного расширения, соответствующим магнитомягким элементам, во избежание ступенчатости поверхности якоря при высоких температурах.

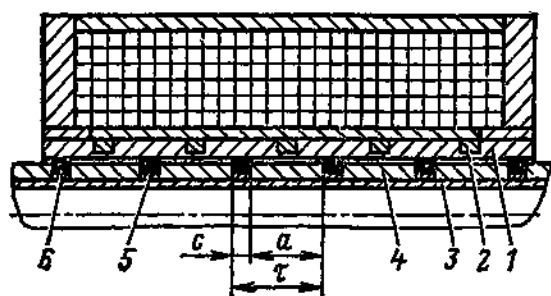


Рис. 8.15. Магнитная система с подшипниками на якоре:

1 — полюсный наконечник; 2 — немагнитный материал; 3 — труба; 4 — втулка из магнитомягкого материала; 5 — кольцо; 6 — подшипник

Износ подшипников может быть значительно уменьшен при конструкции, показанной на рис. 8.15. В этой конструкции полюсные наконечники 1 изготавливают в виде втулки с кольцевыми проточками по наружному диаметру, оставляя небольшой шунт для магнитного потока (1—1,5 мм). Для придания втулке жесткости, кольцевые проточки могут быть заполнены немагнитным материалом 2. Якорь изготавливается в виде немагнитной трубы 3, на которую надеваются втулки 4 из магнитомягкого материала и немагнитные кольца 5. На кольца 5 надеваются с некоторым осевым зазором подшипники скольжения 6. Основное преимущество такой конструкции заключается в том, что, во-первых, подшипники скользят по гладкой цилиндрической поверхности полюсных наконечников, во-вторых, количество подшипников значительно увеличено, что снижает удельные давления, и, наконец, в-третьих, новые подшипники вступают в работу по мере перемещения якоря, что также снижает их общий износ.

Выше были рассмотрены основные типы магнитных систем ЛШД, используемых в исполнительных механизмах СУЗ ядерных реакторов. Представляет интерес провести сравнение рассмотренных магнитных систем по удельным показателям, в качестве которых можно использовать коэффициент совершенства конструкции якоря  $k_{\text{я}} = P_{\text{max}} / \Delta G_{\text{я}}$ , где  $P_{\text{max}}$  — максимальное статическое усилие ЛШД;  $\Delta G_{\text{я}}$  — масса одного погонного метра якоря; и коэффициент совершенства проектирования по усилию  $K_{\text{у}} = VG / P_{\text{max}}$ , где  $V$  — объем, занимаемый двигателем;  $G$  — масса двигателя.

В табл. 8.1 приведены основные показатели ЛШД, которые наглядно иллюстрируют преимущества и недостатки тех или иных магнитных систем. При расчете показателей, приведенных в таблице, за единицу были приняты показатели магнитной системы со сплошным цилиндрическим якорем. Было принято, что статическое усилие изменяется примерно пропорционально активной поверхности (при прочих равных условиях). Основные геометрические размеры были приняты одинаковыми. Было принято также допущение, что объем и масса рассматриваемых магнитных систем одни и те же.

В герметичных ЛШД исполнительных механизмов СУЗ, работающих в ядерных реакторах с водой под давлением, ход якоря имеет большое значение (до 3,5 м), а размеры для размещения ЛШД весьма ограничены, поэтому в таких конструкциях ЛШД

**Таблица 8.1. Удельные показатели различных магнитных систем ЛШД**

Направление магнитного потока $\downarrow$	Конструкция якоря	Удельные показатели	
		$k_{\text{я}}$	$k_{\text{у}}$
Поперечное	Сплошной цилиндрический якорь	1	1
	Полый цилиндрический якорь	20	0,5
	Плоский якорь	27	2
Продольное	Полый цилиндрический якорь	11,2	0,53

предпочтительно использовать магнитные системы с полым цилиндрическим якорем при поперечном направлении магнитного потока или с полым цилиндрическим якорем при продольном направлении магнитного потока. Удельные показатели таких магнитных систем достаточно высоки (табл. 8.1). Хотя коэффициент совершенства проектирования  $k_{\text{у}}$  у этих магнитных систем примерно одинаков, однако усилие у ЛШД с магнитной системой с продольным направлением магнитного потока может быть значительно выше вследствие многократной модуляции потока в зубцовой зоне двигателя.

#### **8.4. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

Расчет магнитного поля является основой расчета и конструирования ЛШД. На основе расчета магнитного поля в рабочем зазоре двигателя проводятся дальнейшие расчеты его магнитной системы и определяются его основные параметры и характеристики. Магнитное поле ЛШД имеет пространственно-периодический характер с периодом, соответствующим зубцовому или полюсному делению.

Возникновение электромагнитного усилия ЛШД связано с изменением магнитной проводимости по продольной и поперечной осям. С увеличением разницы этих магнитных проводимостей увеличивается модуляция магнитного поля и возрастает электромагнитное усилие двигателя. Таким образом, важнейшими характеристиками, влияющими на электромагнитное усилие двигателя, являются магнитная проводимость рабочего зазора и ее производная. Определение этих значений является одной из основных задач расчета магнитных полей. Строгое решение этой задачи возможно только при тщательном анализе распределения магнитного поля в зубчатом рабочем зазоре.

Как известно, магнитные статические поля описываются в общем виде уравнением Пуассона

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} \Omega) = -\rho_m/(\mu\mu_0),$$

где  $\rho_m$  — плотность магнитной массы;  $\mu$  и  $\mu_0$  — магнитные проницаемости среды и вакуума соответственно;  $\Omega$  — магнитный потенциал.

Для парных магнитных полюсов результирующий поток, пересекающий любую поверхность, равен нулю:

$$\operatorname{div} B = 0 \quad \text{и} \quad \operatorname{div}(\operatorname{grad} \Omega) = 0,$$

т. е. магнитный потенциал  $\Omega$  удовлетворяет уравнению Лапласа.

В декартовых координатах уравнение Пуассона имеет вид

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho_m}{\mu\mu_0}.$$

Для области, не содержащей магнитной массы,  $\rho_m=0$  и

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

т. е. в этом случае уравнение Пуассона преобразуется в уравнение Лапласа для трехмерного поля. Однако точные аналитические решения уравнения Лапласа для трехмерных полей представляют значительные трудности, и для практических целей приближенные решения могут быть найдены путем сведения трехмерной задачи к двумерной, т. е. без учета изменения поля вдоль зубцов, таким образом, при  $\partial^2 V/\partial z^2=0$  уравнение Лапласа примет вид

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0.$$

Строгое аналитическое решение уравнения Лапласа и в этом случае представляет известные трудности.

Определение магнитной проводимости может быть выполнено на основе метода конформных отображений и сводится к решению известной задачи Дирихле. Метод конформных отображений получил дальнейшее развитие для расчета магнитных полей электрических машин, в частности двигателей постоянного тока [27]. Инвариантность уравнения Лапласа при конформном преобразовании, когда потенциал остается гармонической функцией новых координат (например,  $U$  и  $V$ ),  $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial U^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial V^2} = 0$ , позволяет расчет поля в сложной области свести к расчету поля в относительно простой области, в которой известно выражение для магнитного потенциала.

В [25] приводится методика определения магнитных проводимостей зубчатого рабочего зазора на основе отображения поля в рабочем зазоре в виде суммы полей, имеющих простые геометрические формы. С учетом изложенного для определения магнитной проводимости рабочего зазора в качестве основы можно использо-

вать метод отображения поля в рабочем зазоре в виде суммы отдельных полей, имеющих простые конфигурации, и представления на этой основе магнитных проводимостей рабочего зазора в виде аналитических зависимостей.

Однако, учитывая то обстоятельство, что аналитические зависимости, получаемые по указанной методике, основаны на упрощенной картине магнитного поля в рабочем зазоре, эти зависимости следует уточнить путем математического моделирования [27] поля в зубчатом рабочем зазоре, используя метод конформных отображений, т. е. аналогию в протекании электрических и магнитных стационарных процессов, описываемых одним и тем же уравнением Лапласа, а также отмеченную выше инвариантность уравнения Лапласа, а затем экспериментально проверить полученные таким путем аналитические зависимости на реальных моделях магнитных систем. Преимуществом такого решения задачи является создание аналитических зависимостей для определения магнитной проводимости рабочего зазора ЛШД, носящих универсальный характер, проверенных экспериментально и пригодных для инженерных расчетов при широкой вариации геометрии зубцовой зоны.

**Математическое моделирование магнитного поля.** Физическую аналогию между стационарным магнитным полем и стационарным электрическим полем тока в проводящей среде можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{j} &= -\sigma \operatorname{grad} \varphi; & \mathbf{B} &= -\mu \operatorname{grad} U_m; \\ I &= \int_S \mathbf{j} dS; & \Phi &= \int_S \mathbf{B} dS; \\ \operatorname{div} \mathbf{j} &= 0; & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned}$$

где  $\varphi$  — электрический потенциал;  $\mathbf{j}$  — вектор плотности тока;  $\sigma$  — удельная электропроводность;  $I$  — сила тока;  $U_m$  — скалярный магнитный потенциал;  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $\Phi$  — магнитный поток;  $\mathbf{B}$  — вектор магнитной индукции.

При моделировании можно построить лишь поле потенциальной функции  $\varphi$ , т. е. эквипотенциалы  $\varphi = \text{const}$ , но не линии сопряженной с ней функции тока. Однако можно построить новую модель, в которой эквипотенциальные линии и линии тока меняются ролями. Подобное «обращение» можно использовать при моделировании для упрощения реализации граничных условий. Таким образом, электрические эквипотенциалы отображали бы распределение не магнитных эквипотенциалей, а трубок магнитного потока  $\Phi$ . При моделировании магнитного поля в воздушном промежутке используются следующие граничные условия:  $\partial\varphi/\partial n = 0$  и  $\varphi = \text{const}$ .

Для реализации первого условия необходимо удалить электропроводный материал вдоль рассматриваемых участков. Второе условие реализуется установкой на участках границы  $\tau$  металлических шин и подачей на них требуемого потенциала. Другим гра-



ничным условием является  $U_m = \text{const}$ , что соответствует ненасыщенной зубцовой зоне. Целью моделирования является нахождение закона изменения магнитной проводимости воздушного (рабочего) зазора ЛШД в зависимости от положения зубцов якоря по отношению к зубцам статора. При этом необходимо также выяснить, как влияют на моделируемую зависимость параметры геометрии зубцовой зоны. Поэтому в процессе исследований использовались различные конфигурации моделей. В общем виде полная магнитная проводимость в зубцовом зазоре является функцией многих переменных

$$\Lambda = F(x, a, \beta, h, \delta, b, \mu),$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды рабочего зазора;  $b$  — активная длина зубца в рабочем зазоре;  $\delta$  — значение рабочего зазора;  $h$  — высота зубца;  $a$  — ширина зубца;  $\beta = a/c$  ( $c$  — ширина паза между зубцами);  $x$  — рассогласование зубцов статора и якоря относительно оси симметрии.

Поскольку поле в рабочем зазоре принималось плоскопараллельным, магнитную проводимость можно представить в виде  $\Lambda = \lambda_z \mu b$ , где  $\lambda_z = f(x, a, \beta, h, \delta)$ , т. е. для любой конфигурации поля достаточно определить только удельную геометрическую проводимость  $\lambda_z$ , которая затем легко переводится в реальную магнитную проводимость.

Магнитный поток  $\Phi$  и магнитный потенциал  $U_m$  моделировались электрическими величинами  $U$  и  $I$  соответственно. Исходя из аналогии  $\lambda = \Phi/U_m$  и  $R = U/I$ , определялась магнитная проводимость  $\lambda_z = k_1 R$ , где  $k_1$  — коэффициент подобия, который зависит от электропроводимости материала и может быть записан в виде

$$k_1 = \Delta/\rho,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала электропроводного листа.

Таким образом, для определения значения  $\lambda_z$  на зубцовом делении необходимо измерить разность потенциалов между какими-нибудь точками, идентично расположенными на зубцовом делении, значение протекающего тока, вычислить сопротивление участка и умножить на коэффициент подобия.

Учитывая, что на практике имеет место разброс значений параметров материала (толщина, электрическое сопротивление), коэффициент подобия необходимо определять для каждой исследуемой модели или проводить исследования на моделях с постоянным значением  $k_1$ .

В этих целях для моделирования можно использовать в качестве проводящего материала стандартную листовую электротехническую сталь толщиной 0,35 мм одной партии проката.

Для увеличения точности моделируемые участки рабочего зазора разных размеров зубцовой зоны следует увеличить в 40—80 раз, что особенно важно для моделирования узких участков перекрытия зубцов статора и якоря. С учетом этого была прове-

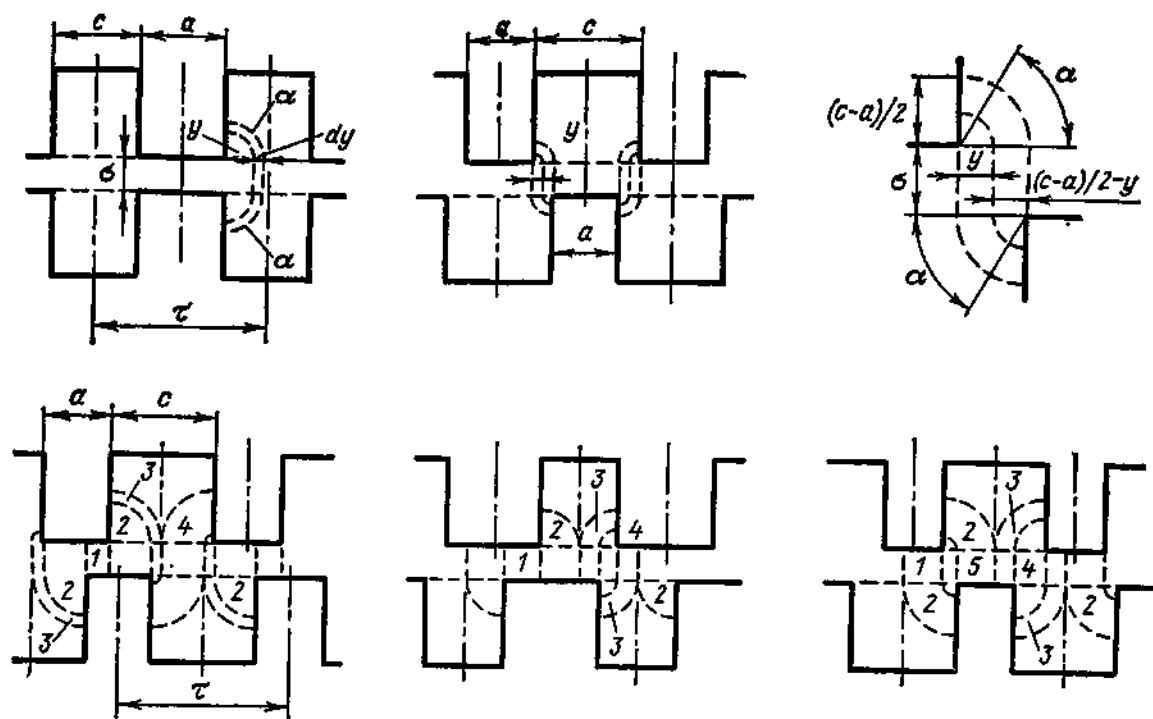


Рис. 8.16. Магнитные силовые линии в рабочем зазоре

дена серия экспериментов на математических моделях. После соответствующей обработки результатов измерений было установлено, что высота зуба  $h$  не оказывает реального влияния на магнитную проводимость при высоте зуба, не превышающей 15—25 рабочих зазоров для зазоров примерно 0,2—0,3 мм. Это значение уменьшается приблизительно до  $10\delta$  при зазорах 0,5—0,6 мм и более.

**Магнитная проводимость рабочего зазора.** В результате моделирования был получен ряд зависимостей  $\lambda_z = f(x)$ . Для полученных значений необходимо было подобрать аналитические выражения, которые бы достаточно точно аппроксимировали эти зависимости.

Допуская, что магнитные силовые линии в рабочем зазоре можно аппроксимировать дугами окружностей и отрезками прямых, и учитывая, что магнитное поле в зазоре равномерно, удельную геометрическую продольную проводимость зубцового деления  $\tau = a + c$  на единицу длины измерения выразим в виде (рис. 8.16)

$$\lambda = \frac{a}{\delta} + 2 \int_0^{c/2} \frac{dy}{\delta + 2y\pi/2} = \frac{a}{\delta} + \frac{2}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{\pi c}{2\delta} \right).$$

Однако, как показали данные математического моделирования, действительная картина магнитного поля является более сложной, и при аппроксимировании силовых линий дугами окружностей и отрезками прямых следует брать центральный угол дуги не  $\pi/2$ , а меньше, т. е. умножать этот угол на некоторый коэффициент  $k$ ,

меньший единицы. Обозначим этот уменьшенный угол через  $\alpha = k\pi/2 < \pi/2$  (рис. 8.16).

В этом случае формула для продольной проводимости примет вид

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{1}{\alpha} \ln \left( 1 + \frac{\alpha c}{\delta} \right).$$

В инженерных расчетах удобнее пользоваться десятичными логарифмами, тогда

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \frac{\alpha c}{\delta}.$$

Поперечная проводимость  $\lambda_q$ , соответствующая сдвигу зубцов якоря относительно зубцов статора на половину зубцового деления  $x = (a+c)/2$ :

при  $\beta = c/a < 1$

$$\lambda_q = \frac{a-c}{\delta} + 4 \int_0^{c/2} \frac{dy}{\delta + dy} = \frac{a-c}{\delta} + \frac{9,2}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right);$$

при  $\beta = 1$

$$\lambda_q = 4 \int_0^{c/2} \frac{dy}{\delta + dy} = \frac{9,2}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right);$$

при  $\beta > 1$

$$\begin{aligned} \lambda_q &= \frac{c-a}{2} / \left( \delta + \alpha \frac{c-a}{2} \right) + 4 \int_{(c-a)/2}^{c/2} \frac{dy}{\delta + dy} = \\ &= \frac{c-a}{\delta + \alpha (c-a)/2} + \frac{9,2}{\alpha} \lg \frac{1 + \alpha c/(2\delta)}{1 - \alpha (c-a)/(2\delta)}. \end{aligned}$$

Используя принцип разбиения магнитных силовых линий на простейшие фигуры с учетом угла  $\alpha$  (рис. 8.16), можно определить проводимости магнитного поля при любом промежуточном положении зубцов в интервале  $0 \leq x \leq \tau/2$ . Однако проводимость для всего интервала не удастся выразить единой зависимостью. Весь интервал придется разбивать на несколько участков, и общую магнитную проводимость определять как сумму проводимостей отдельных участков.

Анализ полученных при моделировании данных, сглаженных по методу наименьших квадратов, позволил установить следующее.

При заданных значениях  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $h$  коэффициент  $\alpha$  является некоторой функцией рассогласования зубцов  $x$ , т. е. аппроксимация реального магнитного поля требует корректирования значения фиктивного центрального угла. На рис. 8.17,  $a$  —  $g$  показаны значения коэффициента  $\alpha$  в функции координаты  $x$ , полученные для

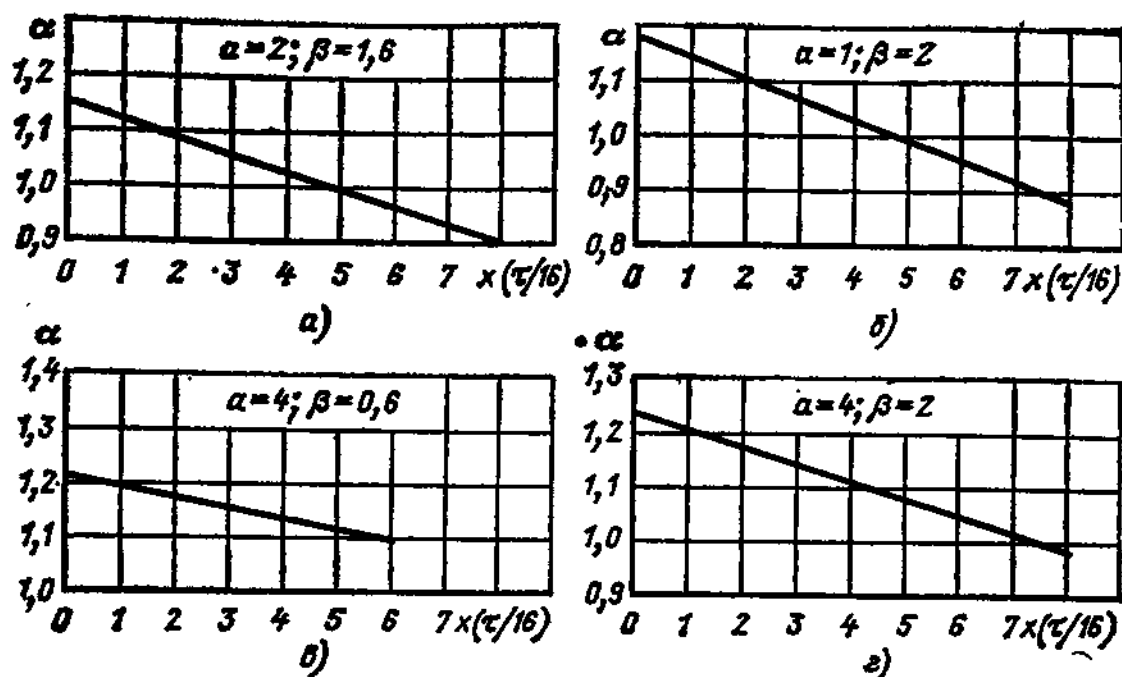


Рис. 8.17. Значения коэффициента  $\alpha$  в функции координаты  $x$

нескольких случаев моделирования. Здесь же для этих случаев показана линейная аппроксимация зависимости.

Для  $x=0$  (продольная проводимость) при заданных значениях  $\delta$  и  $h$  можно считать, что коэффициент  $\alpha$  не зависит от ширины зубца  $a$ , а только от ширины паза  $c$ . Этот коэффициент обозначим через  $\alpha_d$ .

Для  $x=(a+c)/2$  (поперечная проводимость) при заданных значениях  $\delta$  и  $h$  можно считать, что коэффициент  $\alpha$  при  $\beta \leq 1$  также зависит только от ширины паза  $c$ ; этот коэффициент обозначим через  $\alpha_q$ .

При  $\beta > 1$  выявляется зависимость коэффициента  $\alpha_q$  от ширины зубца  $a$ .

При использовании найденных при моделировании значений коэффициента  $\alpha_d$  построены кривые  $\alpha_d = f(c)$ , которые приведены на рис. 8.18.

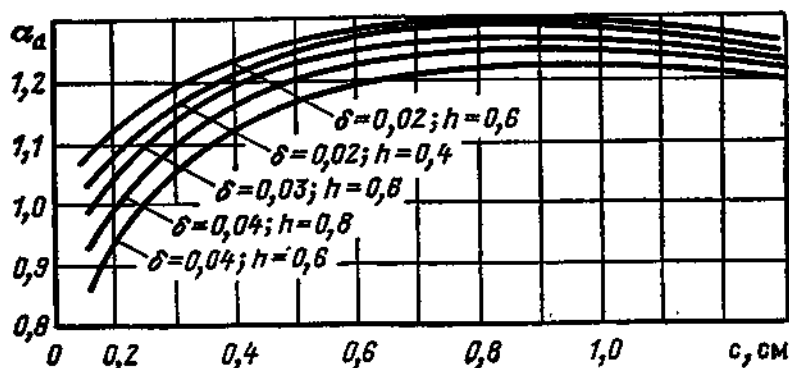


Рис. 8.18. Зависимость коэффициента  $\alpha_d$  от ширины впадины  $c$

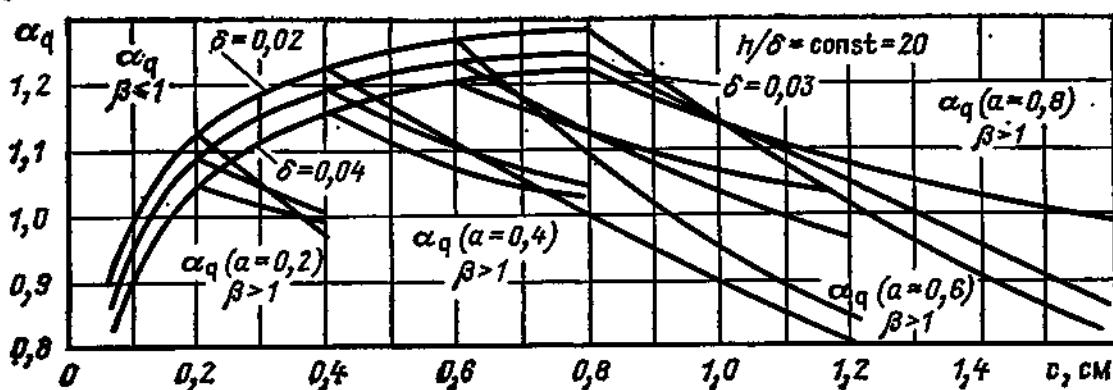


Рис. 8.19. Зависимость коэффициента  $\alpha_q$  от ширины впадины  $c$  при  $h=0,6$  см

В соответствии с формулами поперечной проводимости были получены значения коэффициента  $\alpha_q$ . На рис. 8.19 показаны зависимости коэффициента  $\alpha_q$  при  $h=\text{const}=0,6$  см. Кроме того, были промоделированы зависимости  $\lambda_q$  от указанных параметров при сохранении постоянным отношения  $h/\delta=\text{const}=20$ . Зависимости коэффициента  $\alpha_q$  от  $c$  и  $a$  при отношении  $h/\delta=\text{const}=20$  приведены на рис. 8.20. Здесь, так же как и на рис. 8.19, видно, что при  $\beta \leq 1$  коэффициент  $\alpha_q$  зависит только от  $c$ , а при  $\beta > 1$  он зависит как от  $c$ , так и от  $a$ . Из сравнения кривых  $\alpha_d(c)$  и  $\alpha_q(c)$  при  $\beta \leq 1$  для одних и тех же параметров видно, что первые кривые проходят выше других.

Из кривых рис. 8.18—8.20 для заданных значений  $a$  и  $c$  можно вычислить значения коэффициентов  $\alpha_d$  и  $\alpha_q$ .

Учитывая, что  $\alpha_d$  и  $\alpha_q$  являются переменными величинами, коэффициент  $\alpha$  можно представить как среднеарифметическое этих коэффициентов:  $\alpha = (\alpha_d + \alpha_q)/2$ .

Это допущение отвечает значению коэффициента  $\alpha$  в районе наибольшего изгиба кривой  $\lambda=f(x)$ , этот участок является наиболее важным для расчетов максимальных статических усилий.

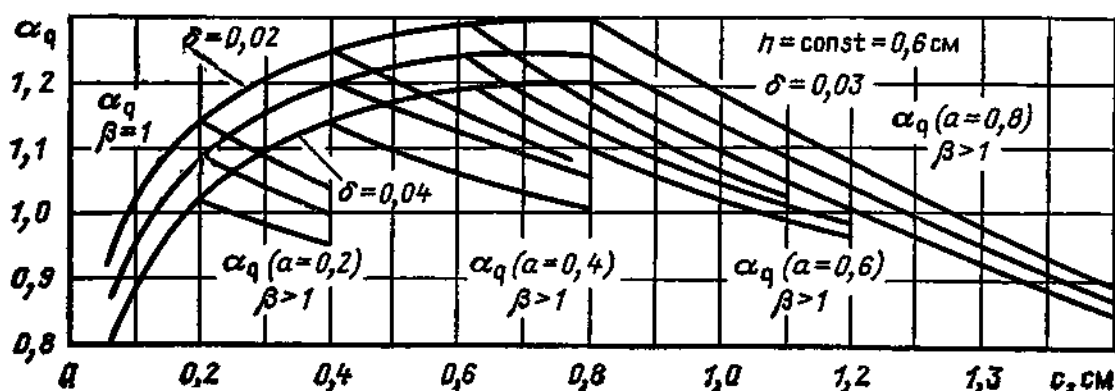


Рис. 8.20. Зависимость коэффициента  $\alpha_q$  от ширины впадины  $c$  при  $h/\delta=20$

Однако такой выбор коэффициента  $\alpha$  означает некоторое завышение начального участка кривой  $\lambda=f(x)$  и занижение участка кривой при значениях  $x$ , близких к  $(a+c)/2$ .

При этом допущении формулы для магнитной проводимости примут вид:

$$1) \beta < 1; a > c$$

при  $x=0$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{\delta} \right);$$

при  $0 < x < c/2$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha x}{\delta} \right) + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + \alpha(c-x)}{\delta + \alpha x} \right] + \frac{x}{\delta + \alpha(c-x)};$$

при  $c/2 < x < c$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right) + \lg \frac{\delta + \alpha c/2}{\delta + \alpha(c-x)} \right] + \frac{c-x}{\delta + \alpha(c-x)};$$

при  $c < x < a$

$$\lambda = \frac{a-c}{\delta} + \frac{9,2}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right) = \text{const.}$$

$$2) \beta = 1; a = c$$

при  $x=0$

$$\lambda_d = c/\delta + (2,3/\alpha) \lg (1 + \alpha c/\delta);$$

при  $0 < x < c/2$

$$\lambda = \frac{c-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha x}{\delta} \right) + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + \alpha(c-x)}{\delta + \alpha x} \right] + \frac{x}{\delta + \alpha(c-x)};$$

при  $c/2 < x < a$

$$\lambda = \frac{c-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right) + \lg \frac{\delta + \alpha c/2}{\delta + \alpha(c-x)} \right] + \frac{c-x}{\delta + \alpha(c-x)};$$

при  $x=a$

$$\lambda_q = \frac{9,2}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right).$$

$$3) \beta > 1$$

при  $x=0$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{\delta} \right);$$

при  $0 < x < c/2$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha x}{\delta} \right) + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + \alpha(c-x)}{\delta + \alpha x} \right] + \frac{x}{\delta + \alpha(c-x)};$$

при  $c/2 < x < a$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{2\delta} \right) + \lg \frac{\delta + \alpha c/2}{\delta + \alpha(c-x)} \right] + \frac{c-x}{\delta + \alpha(c-x)};$$

при  $a < x < (c+a)/2$

$$\lambda = \frac{4,6}{\alpha} \left[ \lg \frac{\delta + \alpha c/2}{\delta + \alpha (x-a)} + \lg \frac{\delta + \alpha c/2}{\delta + \alpha (c-x)} \right] + \frac{c-x}{\delta + \alpha (c-x)} + \frac{x-a}{\delta + \alpha (x-a)};$$

при  $x = (c+a)/2$

$$\lambda_q = \frac{c-a}{\delta + \alpha (c-a)/2} + \frac{9,2}{\alpha} \lg \frac{1 + \alpha c/(2\delta)}{1 + \alpha (z-a)/(2\delta)}.$$

Можно также сделать допущение, что коэффициент  $\alpha$  линейно зависит от координаты  $x$ , т. е.

$$\alpha = \alpha_d - kx,$$

где  $k = (\alpha_d - \alpha_q)/c$  при  $\beta < 1$ ;  $k = (\alpha_d - \alpha_q)/a$  при  $\beta = 1$ ;

$$k = \frac{2(\alpha_d - \alpha_q)}{a+c} \quad \text{при } \beta > 1.$$

При этом допущении формулы для магнитной проводимости с учетом приведенных выше выражений примут вид:

1)  $\beta < 1$   
при  $x = 0$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha_d} \lg \left( 1 + \frac{\alpha_d c}{\delta} \right);$$

при  $0 < x < c/2$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left\{ \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\delta} \right] + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)}{\delta + (\alpha_d - kx)x} + \frac{x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} \right\};$$

при  $c/2 < x < c$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left\{ \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\delta} \right] + \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} + \frac{c-x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} \right\};$$

при  $c < x < a$

$$\lambda = \frac{a-c}{\delta} + \frac{9,2}{\alpha_q} \lg \left( 1 + \frac{\alpha_q c}{2\delta} \right).$$

2)  $\beta = 1$

при  $x = 0$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha_d} \lg \left( 1 + \frac{\alpha_d c}{\delta} \right);$$

при  $0 \leq x \leq c/2$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left\{ \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\delta} \right] + \right.$$

$$+ \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)}{\delta + (\alpha_d - kx)x} \Big\} + \frac{x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)};$$

при  $c/2 \leq x \leq a$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left\{ \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\delta} \right] + \right. \\ \left. + \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} \right\} + \frac{c-x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)};$$

при  $x = a$

$$\lambda_q = \frac{9,2}{\alpha_q} \lg \left( 1 + \frac{\alpha_q c}{2\delta} \right).$$

3)  $\beta > 1$

при  $x = 0$

$$\lambda_d = \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha_d} \lg \left( 1 + \frac{\alpha_d c}{\delta} \right);$$

при  $0 \leq x \leq c/2$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left\{ \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\delta} \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)}{\delta + (\alpha_d - kx)x} \right\} + \frac{x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)};$$

при  $c/2 \leq x \leq a$

$$\lambda = \frac{a-x}{\delta} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left\{ \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\delta} \right] + \right. \\ \left. + \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} \right\} + \frac{c-x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)};$$

при  $a \leq x \leq (c+a)/2$

$$\lambda = \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left[ \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(x-a)} + \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} \right] + \\ + \frac{c-x}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} + \frac{x-a}{\delta + (\alpha_d - kx)(x-a)};$$

при  $x = (c+a)/2$

$$\lambda_q = \frac{c-a}{\delta + \alpha_q(c-a)/2} + \frac{9,2}{\alpha_q} \lg \frac{1 + \frac{\alpha_q c}{2\delta}}{1 + \frac{\alpha_q(c-a)}{\delta}}.$$

Определив значения продольной и поперечной проводимостей по приведенным выше формулам, можно также сделать допущение, что проводимость между этими крайними положениями меняется по закону косинуса

$$\lambda = \frac{\lambda_d + \lambda_q}{2} + \frac{\lambda_d - \lambda_q}{2} \cos kx,$$



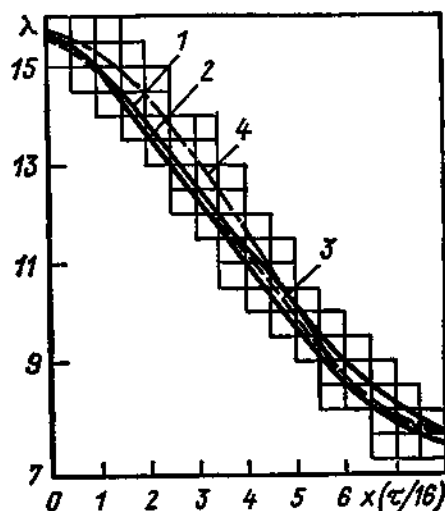


Рис. 8.21. Зависимость  $\lambda(x)$  при  $a=4$  мм;  $\beta=1$

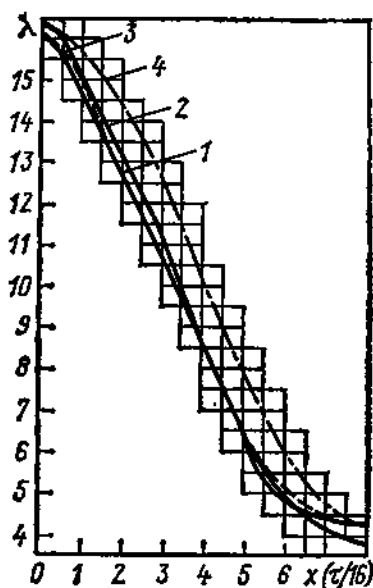


Рис. 8.22. Зависимость  $\lambda(x)$  при  $a=4$  мм;  $\beta=2$

где коэффициент

$$k = \pi/c \quad \text{при } \beta < 1;$$

$$k = \pi/a \quad \text{при } \beta = 1;$$

$$k = 2\pi/(a + c) \quad \text{при } \beta > 1.$$

На рис. 8.21 и 8.22 для двух вариантов зубцового деления ( $a=4$  мм;  $\beta=1$  и  $a=4$  мм;  $\beta=2$ ) показаны зависимости  $\lambda=f(x)$ , полученные математическим моделированием и рассчитанные по приведенным выше формулам при различных аппроксимациях зависимости: кривая 1 — по данным моделирования; кривая 2 — при  $\alpha = \frac{\alpha_d + \alpha_q}{2} = \text{const}$ ; кривая 3 — при  $\alpha = \alpha_d - kx$ ; кривая 4 — при

$$\lambda = \frac{\lambda_d + \lambda_q}{2} + \frac{\lambda_d - \lambda_q}{2} \cos kx.$$

Из рассмотрения рис. 8.21 и 8.22 видно, что логарифмические формулы при  $\alpha = \alpha_d - kx$  более точно отображают зависимость  $\lambda=f(x)$ , полученную в результате моделирования.

Формулы при  $\alpha = (\alpha_d + \alpha_q)/2$  дают менее точное приближение к зависимости  $\lambda=f(x)$ , но достаточно близкое.

Формулу для определения магнитной проводимости при допущении, что магнитная проводимость изменяется по закону косинуса, можно использовать только для приближенных расчетов.

**Производные магнитной проводимости рабочего зазора.** Как известно, статическое усилие ЛШД является функцией магнитодвижущей силы и производной магнитной проводимости рабочего зазора. Поэтому для расчетов ЛШД необходимо знать зависимость производной магнитной проводимости  $d\lambda/dx$  для различных значений рассогласования зубцов якоря и статора ЛШД.

Продифференцировав выражения магнитной проводимости при  $\alpha = (\alpha_d + \alpha_g)/2$ , можно получить производные магнитной проводимости зубцовой зоны для любого рассогласования  $x$ :

$$1) \beta < 1$$

$$\text{при } 0 \leq x \leq c/2$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta + \lambda(c-x)} - \frac{1}{\delta + \alpha x} - \frac{\delta + \alpha c}{[\delta + \alpha(c-x)]^2};$$

$$\text{при } c/2 < x < c$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c-x)]^2} - \frac{2}{\delta + \alpha(c-x)}.$$

$$2) \beta = 1$$

$$\text{при } 0 < x < c/2$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta + \alpha(c-x)} - \frac{1}{\delta + \alpha x} - \frac{\delta + \alpha c}{[\delta + \alpha(c-x)]^2};$$

$$\text{при } c/2 < x < a$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c-x)]^2} - \frac{2}{\delta + \alpha(c-x)}.$$

$$3) \beta > 1$$

$$\text{при } 0 \leq x \leq c/2$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta + \alpha(c-x)} - \frac{1}{\delta + \alpha x} - \frac{\delta + \alpha c}{[\delta + \alpha(c-x)]^2};$$

$$\text{при } c/2 < x < a$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c-x)]^2} - \frac{2}{\delta + \alpha(c-x)};$$

$$\text{при } a < x < (c+a)/2$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{2}{\delta + \alpha(x-a)} - \frac{2}{\delta + \alpha(c-x)} + \frac{\delta}{[\delta + \alpha(c-x)]^2} - \frac{\delta}{[\delta + \alpha(x-a)]^2}.$$

Продифференцировав выражения магнитной проводимости при  $\alpha = \alpha_d - kx$ , получим выражения для производных магнитной проводимости:

$$1) \beta < 1$$

$$\text{при } 0 < x < c/2$$

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dx} = & \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ \frac{\alpha_d - 2kx}{\delta + (\alpha_d - kx)x} + \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\delta} \right] + \right. \\ & + \frac{2kx - \alpha_d - ck}{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)} + \frac{2,3k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)}{\delta + (\alpha_d - kx)x} \left. \right\} - \\ & - \frac{\delta + c\alpha_d - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c-x)]^2}. \end{aligned}$$

$$\text{при } c/2 < x < a$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ -\frac{4kc}{2\delta + c(\alpha_d - kx)} + \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\delta} \right] + \right.$$

$$+ \frac{2(\alpha_d + kc - 2kx)}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} + \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + c(\alpha_d - kx)/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \Big\} -$$

$$- \frac{c^2k - \delta - 3kc + 2kc - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)]^2};$$

2)  $\beta = 1$

при  $0 < x < c/2$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ \frac{\alpha_d - 2kx}{\delta + (\alpha_d - kx)x} + \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\delta} \right] + \right.$$

$$+ \frac{2kx - \alpha_d - ck}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} + \frac{2,3k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)}{\delta + (\alpha_d - kx)x} \Big\} -$$

$$- \frac{\delta + c\alpha_d - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)]^2};$$

при  $c/2 < x < a$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ -\frac{4kc}{2\delta + c(\alpha_d - kx)} + \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\delta} \right] + \right.$$

$$+ \frac{2(\alpha_d + kc - 2kx)}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} + \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + c(\alpha_d - kx)/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \Big\} -$$

$$- \frac{c^2k - \delta - 2kc + 2kx - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)]^2};$$

3)  $\beta > 1$

при  $0 < x < c/2$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ \frac{\alpha_d - 2kx}{\delta + (\alpha_d - kx)x} + \right.$$

$$+ \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\delta} \right] + \frac{2kx - \alpha_d - ck}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} +$$

$$+ \frac{2,3k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)}{\delta + (\alpha_d - kx)x} \Big\} - \frac{\delta + c\alpha_d - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)]^2};$$

при  $c/2 < x < a$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\delta} - \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ -\frac{4kc}{2\delta + c(\alpha_d - kx)} + \right.$$

$$+ \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \left[ 1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\delta} \right] + \frac{2(\alpha_d + kc + 2kx)}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} +$$

$$+ \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + c(\alpha_d - kx)/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \Big\} - \frac{c^2k - \delta - 2kc + 2kx - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c - k)]^2};$$

при  $a < x < (c + a)/2$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{\alpha_d - kx} \left\{ \frac{2kc}{\delta + c(\alpha_d - kx)/2} + \frac{2(\alpha_d + ak - 2kc)}{\delta + (\alpha_d - kx)(x - a)} - \right.$$

$$- \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + c(\alpha_d - kx)/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(x - a)} + \frac{2(kx - \alpha_d - kc)}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} -$$

$$- \frac{4,6k}{\alpha_d - kx} \lg \frac{\delta + c(\alpha_d - kx)/2}{\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \Big\} - \frac{c^2k - \delta - 2kc + 2kx - kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(c - x)]^2} -$$

$$- \frac{ak^2 + \delta - 2akx + kx^2}{[\delta + (\alpha_d - kx)(x - a)]^2}.$$

При гармонической аппроксимации, продифференцировав соответствующее выражение, получим

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{k(\lambda_d - \lambda_q)}{2} \sin kx.$$

При различных значениях коэффициента  $\beta$  формула приобретает вид:  
при  $\beta < 1$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\pi(\lambda_d - \lambda_q)}{2c} \sin \frac{\pi x}{c};$$

при  $\beta = 1$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\pi(\lambda_d - \lambda_q)}{2a} \sin \frac{\pi x}{a};$$

при  $\beta > 1$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\pi(\lambda_d - \lambda_q)}{a + c} \sin \frac{2\pi x}{a + c}.$$

#### 8.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ И РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛШД

Приведенные выше исследования электромагнитных полей в зубцовой зоне были выполнены для ненасыщенной магнитной системы. Поэтому зависимости  $\lambda = f(x)$  справедливы только для ненасыщенной магнитной системы. При насыщении магнитной системы (индукции  $B > 1,5$  Тл) происходит значительное изменение картины магнитного поля.

В общем виде для насыщенной системы приращение электромагнитной энергии  $dW_m$  при перемещении якоря ЛШД на элементарный отрезок пути  $dx$  можно определить как

$$dW_m = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} [i_k(t, x) d\Psi_k(t, x) - \Psi_k(t, x) di_k(t, x)] + \int (BdH - HdB) dV \right\},$$

где  $B$  и  $H$  — магнитная индукция и напряженность магнитного поля в произвольной точке магнитопровода;  $V$  — полный объем магнитопровода.

Эта зависимость справедлива только при виртуальном перемещении, когда интенсивность источника поля в процессе перемещения не изменяется.

Вычисление объемного интеграла в этом уравнении представляет значительные трудности. В [4] приводится численный расчет магнитных полей с учетом насыщения, заключающийся в численном решении уравнения Пуассона. Расчет проводится на ЭВМ по методу конечных разностей. Уравнение Пуассона преобразуется в конечно-разностное. В расчетах используется итерационно-экстраполяционный метод Либмана, при котором итерации делаются с коэффициентом экстраполяции, большим единицы, при этом магнитная проницаемость  $\mu$  определяется по кривой намагничивания.

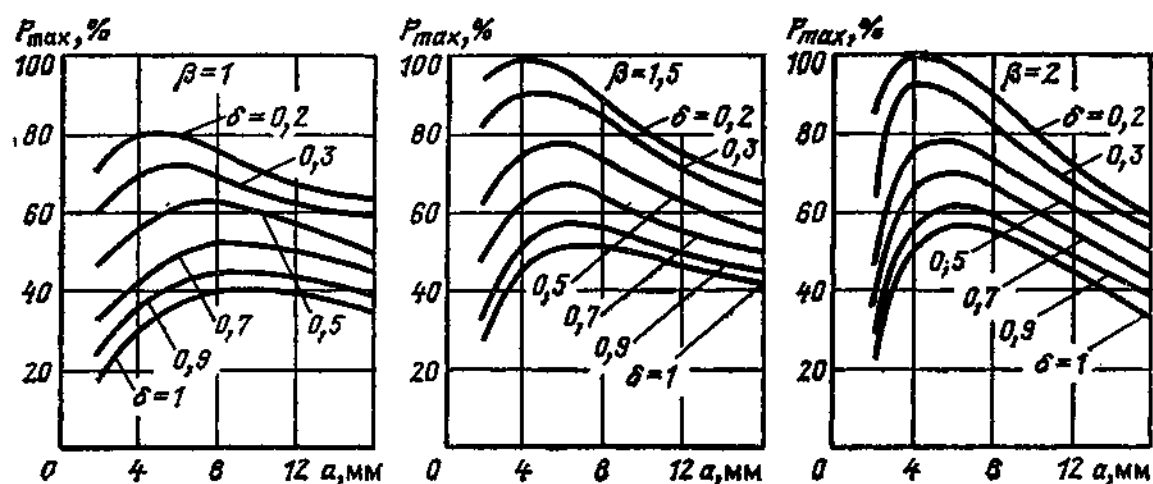


Рис. 8.23. Зависимость максимальных статических усилий двигателя от ширины зубца

Расчет статических характеристик ЛШД указанными методами сопряжен с большими затратами времени и является весьма трудоемким, если учесть, что при разработке ИМ СУЗ с учетом их ограниченных габаритных размеров приходится просчитывать большое число вариантов конструкций.

В связи с этим в [6] был предложен экспериментальный метод определения основных статических характеристик ЛШД и исследований по выбору оптимальных параметров зубцовой зоны при насыщенной магнитной системе. Для проведения исследований был изготовлен макет одной секции (фазы) двигателя с изменяемыми параметрами зубцовой зоны. В рабочем зазоре создавалась индукция примерно 1,8 Тл, соответствующая сильному насыщению машины, которое имеет место в используемых на практике конструкциях. В результате исследований было установлено, что для всех используемых в практике реакторостроения рабочих зазоров (0,2—1 мм) при различных значениях коэффициента  $\beta$  существует оптимальное значение ширины зубца  $a$ , соответствующее максимальному значению статического усилия.

Это иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 8.23. Как видно из рис. 8.23, для каждого рабочего зазора можно выбрать оптимальную геометрию зубцовой зоны при различных значениях скважности. Проведенные исследования позволяют значительно увеличить статические усилия двигателей при тех же габаритных размерах магнитной системы, что имеет большое значение при ограниченных габаритных размерах приводов СУЗ, расположенных на крыше ядерного реактора. Из рис. 8.23 также видно, что существуют области оптимальных размеров зубцовой зоны, позволяющие по условиям, определяемым требованиями регулирования ядерного реактора, варьировать в определенных пределах основные размеры зубцовой зоны, а следовательно, и значение шага перемещения РО при сохранении максимального значения статического усилия двигателя.

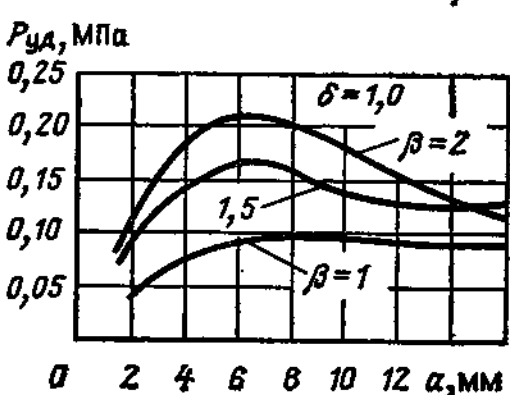
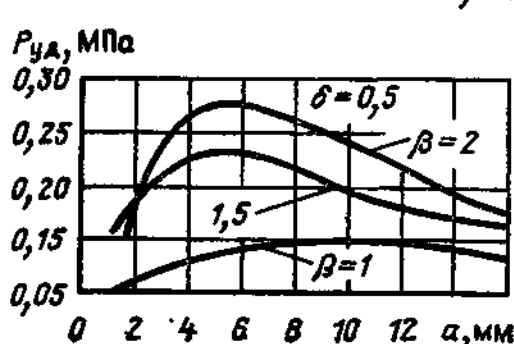
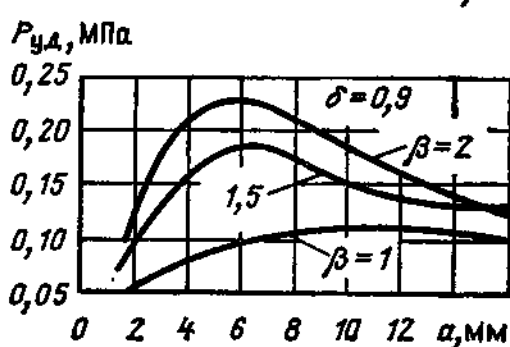
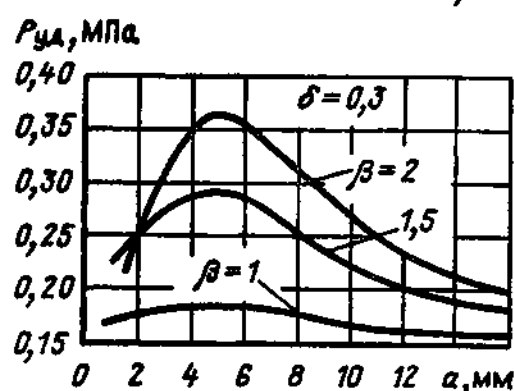
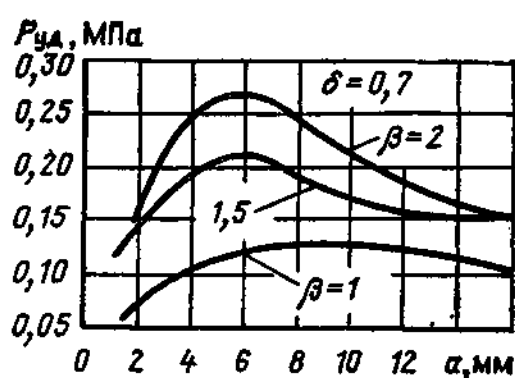
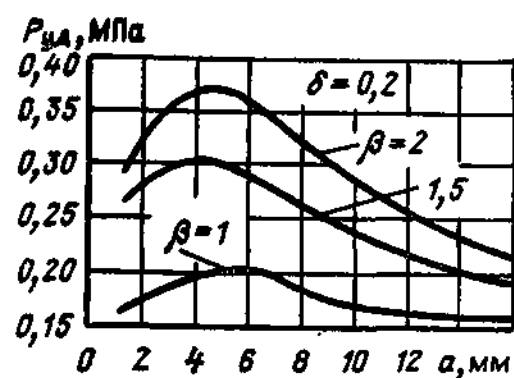


Рис. 8.24. Зависимости максимальных удельных усилий двигателя от ширины зубца

Как известно, статическая характеристика представляет собой зависимость усилия ЛШД от рассогласования  $x$  зубцов якоря и статора при заданном установившемся токе в обмотках управления  $P = f(x, I)$ .

Определение статических характеристик необходимо для выбора параметров тормозного режима ИМ, т. е. режима фиксированного удержания РО, с учетом действующих внешних нагрузок. Кроме того, статические характеристики необходимы для расчета динамических режимов работы привода.

Возникновение статического усилия связано с изменением магнитной энергии  $W_m$ , накопленной в системе,  $P = dW_m/dx$ .

Перемещение якоря двигателя происходит за счет магнитной энергии  $W_{m.з}$ , накопленной в рабочем зазоре,  $W_{m.з} = kF_{p.з}^2 \Lambda$ , где  $k$  — постоянный коэффициент;  $F_{p.з}$  — магнитодвижущая сила рабочего зазора;  $\Lambda$  — магнитная проводимость рабочего зазора.

Статическое усилие двигателя

$$P = kF_{p.з}^2 d\Lambda/dx.$$

Зависимость  $\Lambda(x)$  является сложной периодической функцией геометрии зубцовой зоны.

Однако при проведении инженерных расчетов пользоваться приведенной формулой для определения статических характеристик двигателя неудобно, так как при выборе основных характеристик привода на практике приходится проводить большой объем расчетных работ, варьируя различные параметры системы. Определение  $F_{p.з}$  требует построения кривой намагничивания для изменяемой геометрии магнитной системы, что является трудоемким процессом. Решение такой задачи может быть проведено с помощью ЭВМ, однако в этом случае требуется составление специальных программ. Немаловажным фактором является и то обстоятельство, что при насыщенной магнитной системе ЛШД магнитная проводимость рабочего зазора изменяется, что вносит определенные погрешности в саму методику расчета.

Для решения этой задачи были проведены экспериментальные исследования на установке, позволяющей варьировать геометрию зубцовой зоны. В результате исследований были определены значения максимальных удельных статических усилий, действующих на  $1 \text{ см}^2$  активной поверхности зубцов, в функции ширины зубца  $a$  для различных значений рабочих зазоров  $\delta$  и коэффициентов  $\beta$ . Эти зависимости приведены на рис. 8.24. Данные, приведенные на рис. 8.24, получены при магнитной индукции в рабочем зазоре  $1,8 \text{ Тл}$ , т. е. для сильно насыщенной магнитной системы.

Полученные экспериментальные зависимости позволяют достаточно быстро, без привлечения сложного математического аппарата производить при предварительных оценочных расчетах определение статических характеристик ЛШД и его основных размеров.

#### 8.6. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Как уже отмечалось, исполнительные механизмы СУЗ ядерных реакторов с ЛШД работают в специфических условиях, характеризующихся ограниченным монтажным пространством и наличием окружающей среды с высокой температурой. Поэтому возникает необходимость при заданных диаметрах статора и якоря  $D_c$  и  $D_a$  (см. рис. 8.6) оптимизировать магнитную систему таким образом, чтобы обеспечить минимальный ток управления, а следовательно, и минимальный нагрев при получении возможного в этих условиях максимума статического усилия. Это в свою очередь приводит к выбору таких соотношений меди и стали отдельных участков магнитопровода, при которых обеспечивается максимально возможная индукция в рабочем зазоре ЛШД.

Опуская здесь подробное описание программы и методики исследований, которые в каждом конкретном случае зависят от конструкции ЛШД, остановимся только на общем подходе к решению этой задачи.

Решение этой задачи обычными способами требует просчета большого количества вариантов и является весьма трудоемким

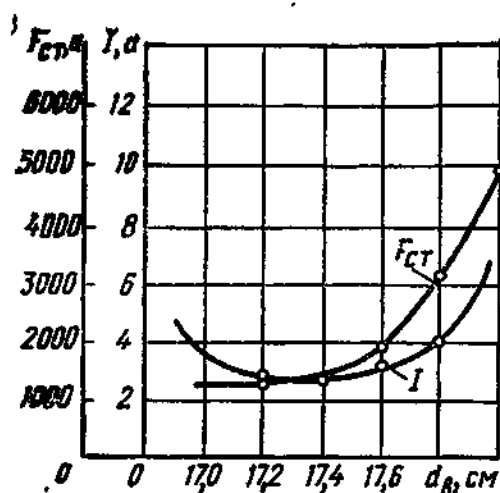


Рис. 8.25. Зависимость МДС в стали  $F_{ст}$  и тока в обмотках  $I$  от размера  $d_{в}$

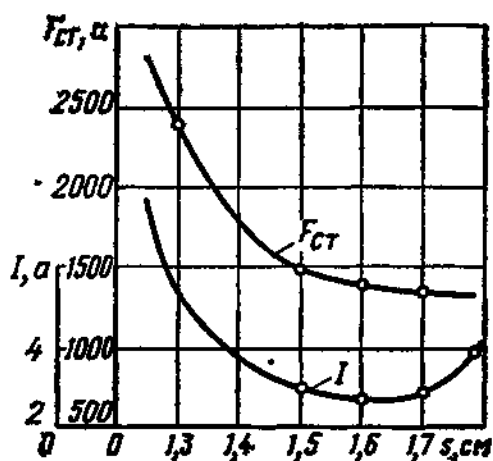


Рис. 8.26. Зависимость МДС в стали  $F_{ст}$  и тока в обмотках  $I$  от размера  $s$

процессом, поэтому такого рода задачи обычно решаются с помощью ЭВМ. Для этих целей можно составить специальную программу [6], которая связывает геометрические размеры с электромагнитными нагрузками.

Известно, что

$$\Sigma F = F_{ст} + F_{р.з} = 2I\omega_k.$$

Задаваясь индукцией в рабочем зазоре при совпадении осей зубцов статора и якоря и варьируя размеры  $d_{в}$  и  $s$  (см. рис. 8.6), определяют  $\Sigma F$ . При этом, с одной стороны, могут снижаться потери в стали и одновременно уменьшается объем меди, с другой, потери в стали могут увеличиваться при одновременном возрастании объема меди. Решение этой задачи позволяет определить оптимальное соотношение меди и стали.

На рис. 8.25 и 8.26 приведены характерные зависимости тока в обмотках управления и потерь в стали при изменении размеров  $d_{в}$  и  $s$  соответственно, рассчитанных на ЭВМ для конкретных двигателей. Как видно из рисунков, существуют оптимальные размеры магнитопровода, при которых ток управления будет минимален, так как дальнейшее увеличение сечения стали только уменьшает объем меди, не снижая при этом потери в стали, что приводит к росту тока управления. Уменьшение же сечения стали ведет к резкому увеличению потерь магнитодвижущей силы, что также приводит к возрастанию тока.

В общем виде решение задачи выбора габаритных размеров линейного герметичного ЛШД с монолитным магнитопроводом (в том числе и главных размеров) представляет известные трудности, так как необходимо связать габаритные размеры двигателя с электромагнитными нагрузками, динамическими и тепловыми режимами работы.



Однако уже на стадии предварительных расчетов по определению основных характеристик исполнительного механизма СУЗ с ЛШД оптимизация его магнитной системы по определенной здесь методике при прочих равных условиях позволяет значительно снизить перегрев ЛШД в заданных габаритных размерах. На последующих стадиях расчета ЛШД с учетом динамических характеристик при необходимости могут быть введены соответствующие коррективы в геометрию магнитной системы. Однако, если учесть, что исполнительные механизмы СУЗ работают в динамических режимах, т. е. в режимах перемещения РО, весьма кратко-временно и, следовательно, эти режимы могут не оказывать существенного влияния на нагрев ЛШД, оптимизации магнитной системы приводов, полученной на стадии предварительных расчетов с учетом токов тормозного режима, часто бывает достаточно при выборе основных размеров ЛШД.

Рассмотренные выше вопросы были связаны в основном с определением статических характеристик ЛШД ИМ ядерных реакторов. Вместе с тем определение этих характеристик необходимо для исследования динамических режимов работы механизма СУЗ с ЛШД, так как статические характеристики оказывают большое влияние на характеристики ИМ в динамических режимах работы, которые рассмотрены в гл. 7.

#### 8.7. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

**Тепловыделение в обмотках ЛШД.** Как известно, при протекании электрического тока по проводнику в последнем возникают потери мощности, обусловленные эффектом Ленца—Джоуля,

$$P = \int_V j^2 \rho dV,$$

где  $j$  — плотность тока;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление;  $V$  — объем проводника.

В тормозном режиме работы ЛШД, когда на его обмотки подается постоянное напряжение, и при однородном сечении по всей длине проводника

$$P_{\tau} = j^2 \rho V = j \rho l / s = I_{\tau}^2 R,$$

где  $I$  — действующее значение выпрямленного тока в тормозном режиме;  $R$  — сопротивление проводника,  $R = \rho l / s$ , зависящее от температуры,  $R = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$ , где  $R_0$  — сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — постоянные коэффициенты.

При многофазном выпрямлении и наличии сглаживающих фильтров пульсации выпрямленного напряжения значительно уменьшаются, поэтому протекающий по обмотке ток можно в тормозном режиме считать практически постоянным. Так как электрическое сопротивление обмоток ЛШД и напряжение на них известны, то определение тепловых потерь в тормозном режиме не представляет трудностей.

Значительно более сложную задачу представляет определение тепловых потерь в обмотках управления ЛШД при динамических режимах работы. В этих режимах на обмотки, запитанные постоянным током  $I_T$ , подаются переменные по значению и постоянные по знаку импульсы тока с амплитудным значением  $I_{max}$  определенной скважности (рис. 8.27).

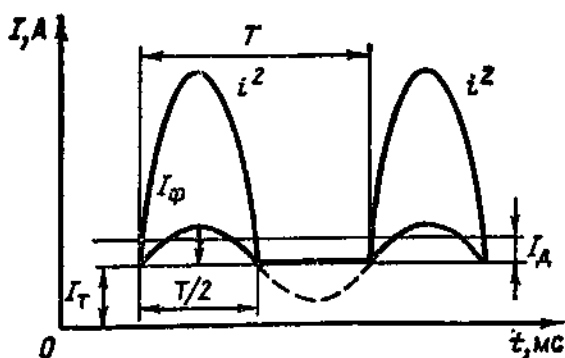


Рис. 8.27. Аппроксимация токов при импульсном питании обмоток ЛШД

Строгое определение эффективного значения тока этих импульсов представляет известные трудности и может быть определено экспериментальным методом пути записи на шлейфовый осциллограф формы этих импульсов, после чего эффективное значение тока может быть определено графическим построением. Однако этот метод является весьма трудоемким и непригодным для аналитических расчетов, так как предполагает использование уже изготовленного ЛШД.

Проведенные исследования динамических режимов работы линейных электромагнитных ИМ с ЛШД показали, что форма форсирующих импульсов тока может быть с известными допущениями аппроксимирована синусоидальным законом полуволной синусоиды, при этом скважность форсирующих импульсов примерно соответствует полупериоду синусоиды (рис. 8.27).

С учетом этого действующее значение тока форсирующего импульса можно по аналогии с однополупериодным выпрямлением определить как

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt},$$

во втором полупериоде  $i^2=0$  и при синусоидальном токе

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt; \quad I^2 = \frac{I_\phi^2}{2},$$

поэтому

$$\frac{1}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt = \frac{I_\phi^2}{2},$$

тогда действующее значение тока  $I = \sqrt{\frac{I_\phi^2}{4}} = \frac{I_\phi}{2}$ .

Таким образом, потери мощности в обмотке ЛШД в динамическом режиме могут быть определены как

$$P_{дин} = I_T^2 R + \frac{I_\phi^2 R}{4} = R \left( I_T^2 + \frac{I_\phi^2}{4} \right).$$

**Потери в стали магнитопровода от вихревых токов.** Магнитопровод ЛШД в процессе работы двигателя подвергается периодическому перемагничиванию с определенной затратой энергии, преобразуемой в тепло. Переменный магнитный поток при работе ЛШД в динамическом режиме вызывает в магнитопроводе вихревые токи.

Для шихтованных магнитопроводов потери в стали от вихревых токов с достаточной для практики точностью определяются по формулам или справочным данным. Однако при шихтованных магнитопроводах ЛШД эти потери невелики, и при практических расчетах ими, как правило, можно пренебречь. В большинстве случаев магнитопроводы для приводов СУЗ с ЛШД выполняются монолитными, и при определенных частотах управления эти потери необходимо учитывать.

Строгое аналитическое определение потерь в массивных магнитопроводах от вихревых токов при произвольной форме форсирующих импульсов представляет значительные трудности, связанные со сложным математическим аппаратом, описывающим протекающие при этом физические процессы.

Для листа стали можно записать следующие дифференциальные уравнения:

$$\rho \left( \frac{\partial S_y}{\partial x} - \frac{\partial S_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial B}{\partial t};$$

$$S_x = \frac{\partial H}{\partial y} \quad \text{и} \quad S_y = - \frac{\partial H}{\partial x},$$

где  $B$  — индукция в точке с координатами  $x, y$ ;  $S_y, S_x$  — составляющие плотности тока по осям  $x, y$ ;  $H$  — напряженность магнитного поля;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление.

Эти уравнения можно преобразовать в дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{\rho}{\mu} \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial B}{\partial t}.$$

Если размер листа по оси  $y$  достаточно велик, то  $\partial B / \partial y = 0$ . Если теперь использовать вышеприведенную аппроксимацию тока синусоидой при импульсном питании ЛШД, что означает, что магнитный поток и плотность тока также изменяются синусоидально, то вышеприведенное уравнение примет более простой вид

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = jB \frac{\omega \mu}{\rho}.$$

Решение этого уравнения при постоянном значении магнитной проницаемости ( $\mu = \text{const}$ ) позволяет определить индукцию, в точке  $x$ , ее модуль будет

$$B = B_s \sqrt{\frac{\cosh 2ax + \cos 2ax}{\cosh ab + \cos ab}},$$

и среднее значение индукции по толщине листа

$$B_{\text{ср}} = B_s \frac{\sqrt{2}}{\alpha b} \sqrt{\frac{\cosh \alpha b - \cos \alpha b}{\cosh \alpha b + \cos \alpha b}},$$

где  $B$  — индукция по краям листа;  $\alpha = \sqrt{\pi \mu f / \rho}$  — вспомогательная величина;  $b$  — ширина листа;  $f$  — частота перемагничивания.

Зная значение индукции  $B$ , потери от вихревых токов в массивном магнитопроводе (в Вт/м<sup>3</sup>) согласно [30] можно определить из соотношения

$$B = \frac{b B_{\text{ср}}^2}{2} \sqrt{\frac{\pi^2 f^3}{\rho \mu}},$$

где  $B$  — в Вб/м<sup>2</sup>;  $\rho$  — в Ом·м.

Таким образом, приведенная выше аппроксимация токов в импульсном режиме работы ЛШД синусоидальным законом позволяет относительно просто рассчитать тепловые потери в массивном магнитопроводе ЛШД от действия вихревых токов. Расчет на практике значительно упрощается, так как магнитный поток, проходящий через магнитную систему, определяется расчетом, а следовательно, известно и значение  $B_T$ .

**Потери на гистерезис.** Явление гистерезиса обусловлено структурой ферромагнитного материала. Энергия, сообщаемая материалу при намагничивании, не полностью уходит при размагничивании. Эта работа характеризуется формой петли гистерезиса, приводимой для определенного материала в [30]. Затраченная работа (в Вт·с/м<sup>3</sup>) равна площади петли гистерезиса и при перемагничивании составляет  $A = \oint H dB$ . Потери на гистерезис можно определять по эмпирическим формулам.

**Математическая модель теплообмена в статоре ЛШД.** Как уже указывалось, нагрев для электрической машины имеет большое значение, определяющее ее надежность и долговечность изоляции. Электрическая машина представляет собой достаточно сложное тело, и некоторые ее параметры практически не поддаются расчету. При расчетах температуры перегрева обмоток используют известную зависимость

$$\Delta t = \frac{R_{\text{гор}} - R_{\text{хол}}}{R_{\text{хол}}} (235 + t_1) + t_1 + t_A,$$

где  $\Delta t$  — температура перегрева;  $R_{\text{гор}}$  — сопротивление обмотки в горячем состоянии;  $R_{\text{хол}}$  — сопротивление обмотки в холодном состоянии;  $t_1$  — температура окружающей среды при измерении сопротивления в холодном состоянии;  $t_A$  — температура окружающей среды при измерении сопротивления в горячем состоянии.

Однако по этой зависимости можно определить только среднюю температуру перегрева обмоток над температурой окружающей среды.

Используется также метод расчета средних превышений температур по сечению обмотки с помощью тепловых схем замещения [30]. Этот метод, несмотря на громоздкость и трудоемкость, позволяет производить более точную оценку

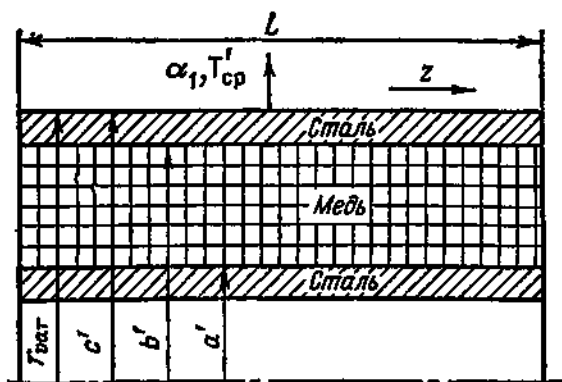


Рис. 8.28. Схема для расчета фазы ЛШД

нагрева обмоток. Однако для исполнительных механизмов СУЗ с ЛШД, работающих в экстремальных тепловых режимах, при которых температура обмоток близка к предельной, определяемой классом нагревостойкости изоляции, этот метод малоприменим. В этих условиях нарушение изоляции в наиболее нагретой части обмотки приводит к ее короткому замыканию и быстрому выходу из строя.

При расчете тепловых режимов ЛШД необходимо знать не среднюю, а максимальную температуру перегрева обмотки в ее наиболее напряженном в тепловом отношении сечении.

В основном тепловые расчеты электрических машин базируются на электрических зависимостях, полученных экспериментальным путем. Путем пересчетов с помощью этих зависимостей можно определить тепловые режимы однотипных машин.

Особое значение имеет определение превышения температур в отдельных участках обмотки, определяющих работоспособность ее изоляции.

Экспериментальные исследования тепловых режимов ЛШД могут проводиться на изготовленной машине, вместе с тем уже на стадии проектирования необходимо вводить в конструкцию ЛШД соответствующие коррективы с учетом обеспечения требуемых тепловых режимов его работы.

Наиболее оптимальным путем решения этой задачи является создание математической модели теплообмена в статоре ЛШД, позволяющей проводить численные эксперименты на стадии конструирования, варьируя начальные и граничные условия тепловых режимов привода.

Критерием достоверности такой модели является ее экспериментальная проверка на реальном приводе СУЗ.

Для построения математической модели введем некоторые упрощающие ее допущения: статор ЛШД будем рассматривать как трехслойный цилиндр конечной длины с тепловыделением во внутреннем слое, имитирующем обмотку; обмотки ЛШД заполнены композиционным веществом (пропиточным составом) равномерно по всему сечению с одинаковыми теплофизическими свойствами; внутреннее охлаждение привода отсутствует, теплосъем осуществляется только снаружи.

Расчетная схема статора ЛШД показана на рис. 8.28.

В самом общем виде условие теплообмена может быть записано в следующем виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{q_v(z, \tau)}{\rho c};$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_1 (T_{cp} - t); \quad r = c';$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r}; \quad t_1 = t_2; \quad r = b';$$

$$\lambda_2 = \frac{\partial t}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r}; \quad t_1 = t_2; \quad r = a';$$

$$\lambda = \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha_2 (T'_{\text{ср}} - t); \quad z = L,$$

где  $r$  — текущее значение радиуса;  $\lambda_1, \lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности стали и меди;  $\rho$  — плотность материала;  $t$  — температура (текущее значение по радиусу);  $z$  — координата;  $\alpha$  — коэффициент теплопроводности;  $q_v$  — плотность тепловыделения;  $\tau$  — время;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи от стали и меди к воздуху соответственно;  $t_1, t_2$  — температуры стали и меди соответственно.

Аналитическое решение поставленной задачи целесообразно проводить следующим образом: рассчитывать температурные поля для каждого слоя с последующей увязкой решений по граничным условиям последовательными приближениями.

В этом случае общее решение разделяется на три задачи: расчет температурного поля в круглом стержне конечной длины и в двух полых цилиндрах конечной длины. При этом на всех поверхностях цилиндров должны быть заданы соответствующие граничные и начальные условия. Рассмотрим эти задачи.

Расчет температурного поля в стальном полом цилиндре конечной длины, на верхнем торце которого и наружной цилиндрической поверхности происходит теплоотдача к воздуху в режиме естественной конвекции, нижний торец имеет постоянную температуру, а внутренняя цилиндрическая поверхность имеет идеальный контакт со вторым слоем. Источники тепла отсутствуют. Тогда

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{dt}{dr} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{1}{a_1} \frac{\partial t}{\partial \tau};$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} = \lambda_1 (T'_{\text{ср}} - t); \quad r = c';$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r}; \quad t_1 = t_2; \quad r = b';$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} = \alpha_1 (T'_{\text{ср}} - t); \quad z = L;$$

$$t = T_{\text{ср}}^2 = \text{const}; \quad z = 0.$$

При расчете температурного поля в полом цилиндре конечной длины с тепловыделением в двух из четырех одинаковых по длине секциях граничные условия на торцах такие же, как и в предыдущей задаче. Полый цилиндр имеет по внутренней поверхности идеальный тепловой контакт с сердечником.

Будем считать, что режим тепловыделения не зависит от времени, что соответствует режиму работы ЛШД. Тогда уравнения будут записаны в виде

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{1}{a_2} \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{q_v(z)}{\rho c};$$

$$\begin{aligned}\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} &= \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r}; & t_1 &= t_2; & r &= b'; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r} &= \lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r}; & t_1 &= t_2; & r &= a'; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial z} &= \alpha_1 (T'_{cp} - t); & z &= L; \\ t &= T_{cp}^2 = \text{const}; & z &= 0.\end{aligned}$$

Одной из проблем при решении этой задачи является определение теплофизических свойств полого цилиндра, представляющего собой обмотки электродвигателя. Обмотка электродвигателя выполнена из медного провода, покрытого изоляционным слоем,

Вся обмотка пропитана изоляционным составом. Таким образом, сама по себе обмотка представляет довольно сложное тело. Определение теплофизических свойств обмотки приводится ниже.

Уравнения при расчете температурного поля в стальном стержне конечной длины без источника тепла имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} &= \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial t}{\partial \tau}; \\ \lambda_1 \frac{\partial t}{\partial r} &= \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r}; & t_1 &= t_2; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial z} &= \alpha_1 (T'_{cp} - t); \\ t &= T_{cp}^2 = \text{const}; & z &= 0.\end{aligned}$$

Примем допущения, что по внутреннему стержню тепло распространяется только в осевом направлении, т. е. тепловой поток через цилиндрическую поверхность равен нулю, так как длина сердечника намного больше его диаметра. Вместо наружного цилиндра введем дополнительное термическое сопротивление, которое ввиду малой толщины стенки  $\delta$  запишем как  $R = \delta/\lambda_1$ ; и эту величину приведем к величине термического сопротивления на наружной поверхности внешнего цилиндра, т. е. величине  $1/\alpha_1$ .

В этом случае вместо трех задач можно решать одну задачу и записать ее в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} &= \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{q_v(z)}{\rho c}; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r} &= \frac{\lambda_1 \alpha_1}{\alpha_1 \delta + \alpha_1} (T'_{cp} - t); & r &= b'; \\ t &= T_{cp}^2 = \text{const}; & z &= 0; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial z} &= \frac{\alpha_1 \alpha_1}{\delta \alpha_1 + \lambda_1} (T'_{cp} - t).\end{aligned}$$

Решение последних уравнений можно свести к решению двух более простых задач: для полого цилиндра бесконечной длины и пластины с внутренним источником тепла

$$\begin{aligned}\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) &= \frac{1}{a_2} \frac{\partial t}{\partial \tau}; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r} &= \alpha (T_{\text{ср}} - t); \quad r = b'; \\ \frac{\partial t}{\partial r} &= 0; \quad r = a'; \\ \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_v(z)}{\lambda_2} &= \frac{1}{a_2} \frac{\partial t}{\partial \tau}; \\ \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial z} &= \alpha (T'_{\text{ср}} - t); \quad z = L; \\ t &= T_{\text{ср}}^2 = \text{const}; \quad z = 0.\end{aligned}$$

В этих уравнениях учитывается, что  $1/\alpha = 1/\alpha_1 \pm \delta/\lambda_1$ . Знак плюс должен соответствовать прохождению тепла через внешний цилиндр по направлению из внутреннего пространства наружу. Кроме того, не будем учитывать стальных торцевых стенок в магнитопроводе.

Решение уравнений теплопроводности для полого цилиндра бесконечной длины может быть при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned}k_1 \partial t / \partial r - k_2 t &= k_3; \quad r = a'; \\ k'_1 \partial t / \partial r + k'_2 t &= k'_3; \quad r = b',\end{aligned}$$

где  $k_1, k_2, k'_1, k'_2$  — постоянные коэффициенты, которые могут быть положительными или равняться нулю при условии, что  $k_1$  и  $k_2$  или  $k'_1$  и  $k'_2$  равны нулю не одновременно, а  $k_3$  и  $k'_3$  — любые константы. При соответствующем выборе этих коэффициентов задача будет решена для случаев постоянной температуры, постоянного теплового потока, нулевого потока и теплообмена на любой из поверхностей. В данном случае  $k_1 = k'_1 = \lambda_2$ ;  $k'_2 = 0$ ;  $k_2 = \alpha$ ;  $k_3 + k'_3 = q_v(z)/(\rho c)$ . Полученные решения затем можно уточнить последовательными приближениями.

Решение этой задачи при принятых граничных условиях имеет вид

$$t = \frac{-a'k_2 [k'_1 - b'k'_2 (\ln r/a) + b'k'_3 [k_1 + a'k_3 (\ln r/a')]]}{a'k_2k'_1 + b'k_1k'_2 + a'b'k_2k'_2 \ln(b'/a')}.$$

Численный анализ температурных полей в статоре ЛШД с учетом описанной выше математической модели был выполнен по программе для расчета температурных полей с использованием метода конечных элементов [18]. Программа позволяет решать широкий круг прикладных задач теплопроводности и позволяет варьировать граничные условия и теплофизические свойства тела. Схема алгоритма программы показана на рис. 8.29.



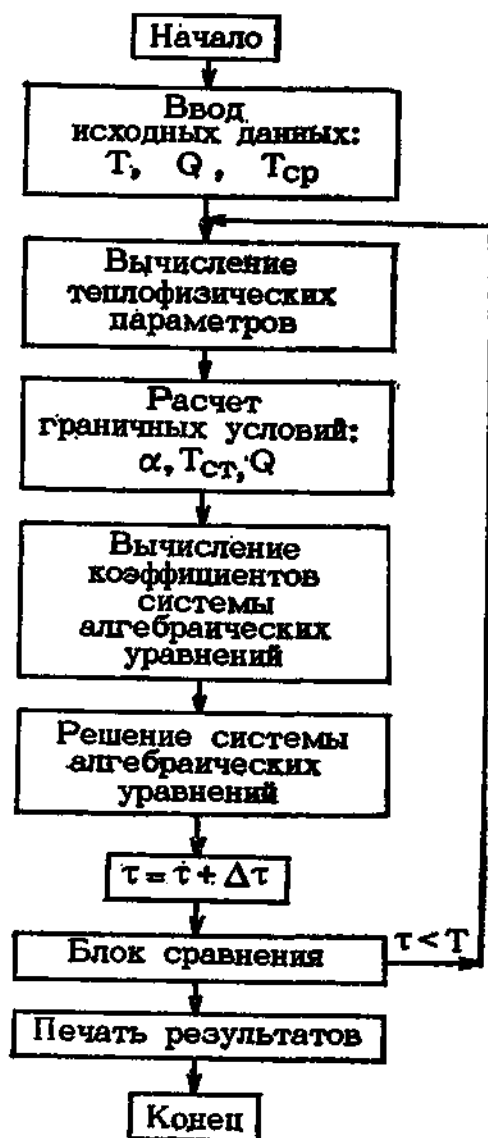


Рис. 8.29. Схема алгоритма расчета тепловых характеристик ЛШД

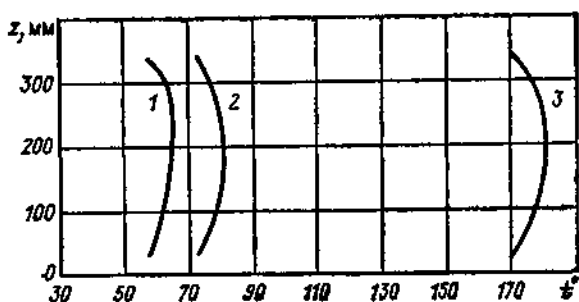


Рис. 8.30. Изменение температуры по высоте обмотки ЛШД в тормозном режиме:

1 — при  $I_T = 4$  А; 2 — при  $I_T = 5$  А; 3 — при  $I_T = 8$  А

На рис. 8.30 показано распределение температур в средней части обмотки по ее длине при установившемся значении температуры и сравнительное распределение температур в средней части обмотки по ее длине при различных токах тормозного режима (4 А, 5 А, 8 А). Из распределения температур видно, что хотя абсолютное значение максимального

превышения в наиболее напряженном в тепловом отношении среднем сечении обмотки изменяется с ростом тормозных токов, характер изменения температур остается одинаковым. На рис. 8.30 видно, что кривые распределения температур расположены эквидистантно.

Максимальные значения превышения температур в установившемся тепловом режиме по длине обмотки примерно пропорциональны квадратам токов. Более того, эквидистантное расположение кривых свидетельствует о том, что абсолютное превышение температур вдоль среднего сечения обмотки остается примерно постоянным и не зависит от токов.

Рассчитав распределение температур в наиболее энергонапряженном сечении обмотки, без дополнительных расчетов можно производить оценку распределения температур в необходимом для практических задач диапазоне при различных значениях токов.

На рис. 8.31 показано распределение температур по длине обмотки в ее среднем сечении при динамическом режиме работы двигателя  $I_T = 5$  А;  $I_\phi = 15$  А (действующее значение) при тех же режимах нагрева теплоносителя.

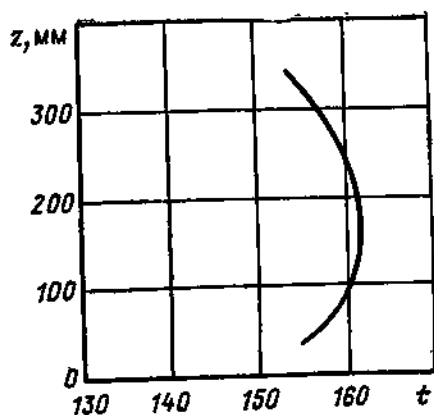


Рис. 8.31

Рис. 8.31. Изменение температуры по высоте обмотки ЛШД в динамическом режиме

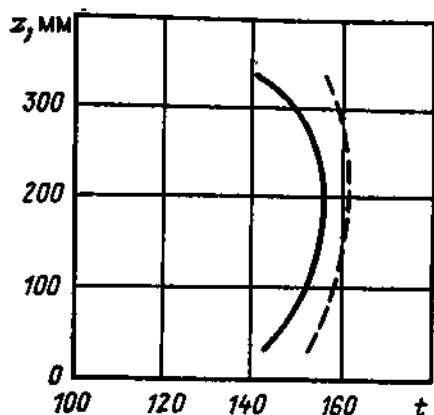


Рис. 8.32

Рис. 8.32. Изменение температуры по высоте обмотки ЛШД в тормозном режиме:

—— — экспериментальные данные; - - - - расчетные данные

Как видно из рисунка, характер распределения температур аналогичен показанному на рис. 8.30, т. е. в тормозном режиме. Абсолютное превышение температуры в средней части сечения обмотки в динамическом режиме примерно такое же, что и в тормозном режиме.

Аналогичное показанное на рис. 8.30 и 8.31 распределение температур было получено при численном анализе температурного поля на основе описанной выше математической модели.

На рис. 8.32 показаны сравнительные кривые распределения температур вдоль обмотки в ее среднем сечении, полученные экспериментально при токе тормозного режима 7 А. Как видно, расхождения расчетных и экспериментальных данных не превышают 12 %. Теоретическая кривая несколько отличается от экспериментальной в крайних точках. Это можно объяснить принятыми в модели допущениями. В действительности имели место перетечки тепла в осевом направлении, в то время как в теоретических расчетах предполагалось их отсутствие.

Однако следует отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных в наиболее напряженных в тепловом отношении точках обмотки. Расхождение этих данных не превышает 5 %.

Указанные обстоятельства позволяют использовать описанную выше математическую модель для тепловых расчетов обмоток статоров силовых ЛШД, используемых в исполнительных механизмах СУЗ ядерных реакторов.

## 8.8. ПОДШИПНИКОВЫЕ УЗЛЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

В линейном электромагнитном механизме СУЗ подшипниковые узлы являются практически единственными элементами ИМ, подверженными трению и износу и в значительной степени определяющими его ресурс работы.

Аналитическое решение задачи износа подшипников скольжения исполнительного механизма СУЗ. На выбор материалов пары трения якорь ЛШД — подшипник оказывают влияние различные факторы, такие, как характер нагрузки, температура, скорость скольжения, условия смазки и др.

Однако важнейшим из этих факторов, определяющим при прочих условиях долговечность подшипника скольжения, является контактное давление. В связи с этим аналитическое решение задачи определения износостойкости подшипника скольжения и прогнозирования его износа сводится к решению контактной задачи.

Типичная зависимость интенсивности износа записывается в виде

$$I = di/dS,$$

где  $i$  — линейный износ;  $S$  — путь трения скольжения.

Эту зависимость можно представить также в виде  $I = kp^m$ , где  $p$  — контактное давление;  $k$ ,  $m$  — константы, зависящие от температуры, характера окружающей среды и других факторов. Контактное давление  $p$  в свою очередь является функцией износа тел вращения.

Таким образом, для определения износа тел при заданном законе изнашивания (например, по закону, приведенному в [29], когда константы  $k$  и  $m$  известны), необходимо решать контактную задачу для подшипника скольжения с учетом его износа. Если известно решение контактной задачи с учетом износа, то можно решать обратную задачу, т. е. с помощью экспериментальных данных находить константы  $k$  и  $m$ , нахождение которых теоретическим путем ввиду множества факторов, влияющих на их характер и значения, представляет большие трудности и практически не может быть реализовано с достаточной достоверностью.

Рассматривалась контактная задача [28] для вала и подшипника скольжения с учетом износа подшипника скольжения с металлическим вкладышем, моделируемым упругим слоем, расположенным в жесткой обойме; перемещение тела пропорционально контактному давлению. В этом случае решение задачи упрощается. Это допущение может быть принято за основу при решении контактной задачи трения подшипниковой пары исполнительного механизма СУЗ, так как конструктивное выполнение подшипников в ЛШД отвечает этому условию.

Во всех указанных работах задача решалась при постоянной по значению и направлению нагрузке, действующей на вал. В данном случае нагрузка, как уже указывалось, меняется сложным образом: она меняется в продолжении каждого шага, обрабатываемого ЛШД, вследствие изменения боковых нагрузок, действующих на якорь в магнитном поле, а также по мере углубления якоря во вкладыш подшипника вследствие его износа. Кроме того, в механизме СУЗ указанные нагрузки изменяются не только по значению, но и в радиальном направлении. При этом цикличность изменения направления этих нагрузок в настоящее время еще не изучена. Однако в общем случае это изменение направления нагрузки уменьшает общий износ подшипника. Поэтому на данной стадии целесообразно рассмотреть экстремальный случай, т. е. рассмотреть контактную задачу с учетом износа при нагрузке, меняющейся по значению, но не изменяющейся по направлению.

Согласно литературным данным, для материалов с графитом можно применять константу  $m=1$  ( $m$  зависит от свойств материалов). В нашем случае

изнашивается только вкладыш подшипника, а якорь практически не изнашивается (рис. 8.33). Кроме того, толщина вкладыша значительно меньше его радиуса, поэтому его можно моделировать тонким упругим слоем, закрепленным в жесткой обойме, что, как указывалось выше, позволяет значительно упростить решение контактной задачи.

Рассмотрим контакт жесткого якоря 1 и упругого кольцевого слоя 2, закрепленного в жесткой обойме 3 (рис. 8.33). Условия контакта якоря и вкладыша можно записать в виде

$$i + w + \Delta = \delta \cos \varphi,$$

где  $i$  — линейный износ вкладыша;  $w$  — упругие перемещения точек, расположенных на внутренней поверхности вкладыша;  $\Delta$  — радиальный зазор;  $\delta$  — сближение тел (эксцентриситет), причем  $w = \alpha r$ , где

$$\alpha = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \frac{\varepsilon}{E}.$$

В этой формуле  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\varepsilon$  — толщина кольца;  $E$  — модуль упругости.

Тогда можно записать  $i + \alpha r + \Delta = \delta \cos \varphi$ .

В это уравнение входят две неизвестные функции:  $i$  и  $p$ . Другое соотношение между ними имеет вид  $\partial i / \partial s = k p$ .

Функция распределения контактного давления  $p(\varphi)$ , входящая в два последних уравнения, должна удовлетворять условиям

$$R \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} p(\varphi) \cos \varphi d\varphi = Q; \quad \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} p(\varphi) \sin \varphi d\varphi = 0,$$

где  $R$  — радиус (рис. 8.33);  $Q$  — погонная нагрузка;  $\varphi_0$  — половина угла контакта.

Можно пренебречь влиянием касательных напряжений на износ и контактное давление. В этом случае  $p(\varphi) = p(-\varphi)$  и приведенное выше второе условие можно не рассматривать, так как оно будет выполняться в силу симметрии  $p$ .

Нагрузка  $Q$  в последних уравнениях является сложной функцией пути трения  $s$ . Во-первых, она меняется в течение одного шага якоря и, во-вторых, при изменении  $\delta$  изменения положения тел. Кроме того, точка на поверхности вкладыша может находиться или не находиться в контакте с якорем в зависимости от того, находится ли на ней зубец якоря или впадина. Однако можно считать, что рассматриваемая точка на поверхности вкладыша все время находится в контакте с якорем (это допущение может быть учтено при дальнейших расчетах уменьшением пути трения), тогда погонная нагрузка выразится как

$$Q = p_0 / L$$

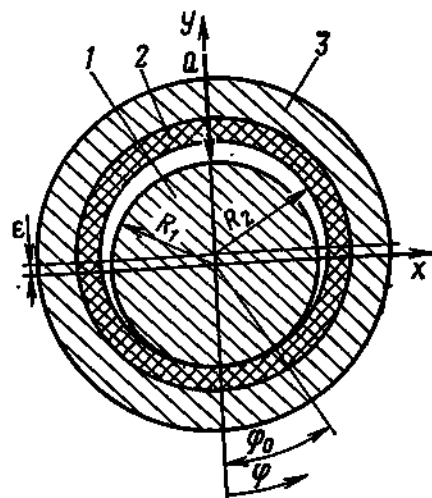


Рис. 8.33. Схема контакта якоря ЛШД с подшипником

где  $p_0$  — полная нагрузка;  $L$  — полная длина всех вкладышей, воспринимающих нагрузку.

Как уже указывалось, нагрузка  $Q$ , вызываемая боковым притяжением якоря магнитным полем из-за зубчатости якоря и полюсных наконечников статора ЛШД, является сложной функцией перемещения. При этом на характер изменения  $Q$  оказывает влияние характер нарастания и спада токов в обмотках управления ЛШД при их коммутации. Решение контактной задачи при строгом учете изменения нагрузки  $Q$  за один шаг якоря представляет значительные трудности. Поэтому по аналогии с аппроксимацией токов при импульсном питании ЛШД будем считать, что нагрузка за один шаг якоря не изменяется и представляет собой некоторое усредненное значение. Таким образом, будем считать, что  $Q$  с учетом принятого допущения будет зависеть только от сближения тел  $\delta$ , т. е.  $Q=Q(\delta)$ .

С учетом изложенного система уравнений примет вид

$$i \pm \Delta \pm \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \frac{e}{E} p = \delta \cos \varphi;$$

$$\frac{\partial i}{\partial s} = \frac{p}{k}; \quad R_2 \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} p(\varphi) \cos \varphi d\varphi = Q,$$

где  $i=i(\varphi, \tilde{t})$ ;  $\Delta=R_2-R_1$ ;  $R_2$  — внутренний радиус вкладыша;  $R_1$  — радиус якоря;  $\tilde{t}$  — время.

Так как  $ds=hdN$ , где  $h$  — путь трения скольжения за один цикл (двойной ход якоря ЛШД);  $N$  — полное число циклов, то можно записать  $\partial i/\partial N = =hp/k$ .

Введем безразмерные переменные

$$p = \frac{PR_1}{Q_0}; \quad q = \frac{Q}{Q_0}; \quad I = \frac{i}{\Delta}; \quad t = \frac{hNQ_0}{kR_1\Delta},$$

где  $Q_0$  — погонная нагрузка на подшипниках в начальный момент времени;  $k$  — коэффициент, зависящий от условий работы пары трения.

С учетом этого уравнения примут вид

$$1 + I + \beta P = x \cos \varphi; \quad \partial I / \partial t = P; \quad (8.1)$$

$$\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} P(\varphi, t) \cos \varphi d\varphi = q(t), \quad (8.2)$$

где

$$\beta = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)eQ_0}{(1-\nu)E\Delta R_1}; \quad x = \frac{\delta}{\Delta}.$$

Согласно [6] погонная нагрузка будет

$$Q = \frac{0,64 \cdot 10^{-2} \Phi_0^2 \delta}{La \sqrt{(2/a)+1} R_1 R_c L_{\text{подш}} n},$$

где  $a=(c^2-\delta^2)/(2R_1R_c)$ ;  $R_c$  — радиус полюсного наконечника (расточки);  $c=R_c-R_1$ ;  $L_{\text{подш}}$  — длина подшипника;  $n$  — число подшипников;  $\Phi_0$  — магнитный поток в рабочем зазоре ЛШД.

Введем безразмерные переменные  $\bar{c} = c/\Delta$ ,  $Q = (1/4) (\Delta^2/R_1 R_c)$ , и, учитывая, что  $\delta = k\Delta$ , последнее уравнение запишем в виде

$$Q = \frac{0,64 \cdot 10^{-2} \Phi_0^2 \Delta x}{LR_1 R_c L_{\text{подш}}^n (\Delta/\sqrt{R_1 R_c}) \sqrt{\bar{c}^2 - x^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x^2)^2}} = \\ = \frac{0,64 \cdot 10^{-2} \Phi_0^2}{L \sqrt{R_1 R_c} L_{\text{подш}}^n} \frac{x}{\sqrt{\bar{c}^2 - x^2 + Q(\bar{c}^2 - x^2)^2}}.$$

Из последнего уравнения следует

$$Q_0 = \frac{0,64 \cdot 10^{-2} \Phi_0^2}{L \sqrt{R_1 R_c} L_{\text{подш}}^n} \frac{x_0}{\sqrt{\bar{c}^2 - x_0^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x_0^2)^2}},$$

где  $x_0$  — значение эксцентриситета в начальный момент времени, т. е. при отсутствии износа.

Поделив последние уравнения одно на другое, получим

$$q = \frac{x}{x_0} \sqrt{\frac{\bar{c}^2 - x_0^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x_0^2)^2}{\bar{c}^2 - x^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x^2)^2}}.$$

Функции  $P(\varphi, t)$  и  $I(\varphi, t)$  должны удовлетворять условиям  $P(-\varphi_0, t) = P(\varphi_0, t)$ ;  $I(-\varphi_0, t) = I(\varphi_0, t) = I(\varphi, t) = 0$ .

Так как  $\varphi = \varphi_0$ , получим

$$x \cos \varphi_0 = 1 \quad \text{или} \quad x = 1/\cos \varphi_0(t); \quad x = 1/\cos \varphi_0(0). \quad (8.3)$$

Подставив выражение для  $q$  в уравнения для  $\beta$  и  $t$ , получим

$$\beta = \gamma x_0 / \sqrt{\bar{c}^2 - x_0^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x_0^2)^2}; \\ t = \frac{hN}{kR_1 \Delta} \frac{0,64 \cdot 10^{-2} \Phi_0^2}{L \sqrt{R_1 R_c} L_{\text{подш}}^n} \frac{x_0}{\sqrt{\bar{c}^2 - x_0^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x_0^2)^2}},$$

где  $\gamma = 0,64 \cdot 10^{-2} (1+\nu) (1-2\nu) \varepsilon \Phi_0^2 / [(1-\nu) E \Delta R_1 L \sqrt{R_1 R_c} L_{\text{подш}}^n]$

Умножая уравнение (8.1) на  $\cos \varphi$  и интегрируя полученное выражение от  $-\varphi_0$  до  $\varphi_0$ , с учетом уравнения (8.2) получаем

$$\beta_q + \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} I(\varphi, t) \cos \varphi d\varphi = \frac{\varphi_0(t) - \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)}{\cos \varphi_0(t)}. \quad (8.4)$$

Из определения безразмерных переменных следует, что  $q(0) = 1$ . Принимая в последнем уравнении  $t=0$  и учитывая, что  $q(0) = 1$  и  $I(\varphi, 0) = 0$ , получаем

$$\beta = \gamma \frac{x_0}{\sqrt{\bar{c}^2 - x_0^2 + \Theta(\bar{c}^2 - x_0^2)^2}} = \frac{\varphi_0(0) - \sin \varphi_0(0) \cos \varphi_0(0)}{\cos \varphi_0(0)}. \quad (8.5)$$

Подставляя в (8.5) выражение (8.3), получаем

$$\frac{\gamma}{\sqrt{\cos^2 \varphi_0(0) \bar{c}^2 - 1 + (Q/\cos^2 \varphi_0(0)) (\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(0) - 1)^2}} = \frac{\varphi_0(0) - \sin \varphi_0(0) \cos \varphi_0(0)}{\cos \varphi_0(0)}. \quad (8.6)$$

При заданных  $\gamma$  и  $Q$  уравнение (8.6) представляет собой нелинейное алгебраическое уравнение относительно  $\varphi_0(0)$ . Его можно решать графически. Однако в реальных случаях его можно существенно упростить. Значение  $\Theta$ , как правило, очень мало ( $\Theta \approx 10^{-6}$ ). Кроме того,  $\bar{c}^2 \Theta < 1$ , поэтому членом  $\Theta$  в уравнении (8.6) можно пренебречь, тогда получим

$$\frac{\gamma}{\sqrt{\cos^2 \varphi_0(0) \bar{c}^2 - 1}} = \frac{\varphi_0(0) - \sin \varphi_0(0) \cos \varphi_0(0)}{\cos \varphi_0(0)}. \quad (8.7)$$

Если  $\varphi_0(0)$  мало ( $\varphi_0(0) < \pi/6$ ), что имеет место в реальных случаях, то уравнение (8.7) еще упрощается и принимает вид

$$\frac{\gamma}{\bar{c}} = \frac{2}{3} [\varphi_0(0)]^3, \text{ или } \varphi_0(0) = \sqrt[3]{\frac{2}{3} \frac{\gamma}{\bar{c}}}. \quad (8.8)$$

Уравнением (8.8) можно пользоваться при значениях углов до  $\pi/6$ .

Имеем на основании уравнения (8.2)

$$\frac{d}{dt} \int_{-\varphi_0(t)}^{\varphi_0(t)} I \cos \varphi d\varphi = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \frac{dI}{dt} \cos \varphi d\varphi = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} P \cos \varphi d\varphi = q. \quad (8.9)$$

Дифференцируя уравнение (8.4), с учетом (8.9) получаем

$$\begin{aligned} \beta \frac{dq}{dt} + q &= \frac{d}{dt} \left[ \frac{\varphi_0(t) - \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)}{\cos \varphi_0(t)} \right] = \\ &= \frac{\sin \varphi_0(t) [\varphi_0(t) + \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)]}{\cos^2 \varphi_0(t)} \frac{d\varphi_0(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (8.10)$$

Подставляя в (8.10) выражение для  $Q_0$  и пренебрегая членами, имеющими множитель  $\Theta$ , получаем уравнение относительно  $d\varphi_0(t)/dt$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_0(t)}{dt} &= \frac{[\bar{c}^2 \cos^2 \varphi(t) - 1] \sqrt{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi(0) - 1} \times}{[\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(t) - 1]^{3/2} [\varphi_0(t) + \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)] -} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times \operatorname{ctg} \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)}{-\beta \bar{c}^2 \cos^3 \varphi_0(t) \sqrt{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(0) - 1}}. \end{aligned} \quad (8.11)$$

Таким образом, если  $\gamma$  и  $\bar{c}$  известны, то после определения  $\varphi_0(0)$  по (8.6) или (8.8) и вычисления  $\beta$  по (8.5) можно найти функцию  $\varphi_0(t)$  по (8.11). Зависимость  $\varphi_0(t)$ , задаваемую уравнением (8.11), можно получить следующим образом.

Пусть известно значение  $\varphi_0$  при  $t=t_i$ , т. е. известно  $\varphi_0^i = \varphi_0(t_i)$ . Для вычисления  $\varphi_0^{i+1} = \varphi_0(t_{i+1})$  производную в левой части уравнения (8.1) заменим

конечной разностью, т. е. примем  $d\varphi_0(t_i)/dt = (\varphi_0^{i+1} - \varphi_0^i)/(t_{i+1} - t_i)$ , а в правой части уравнения (8.11)  $\varphi_0$  возьмем при  $t = t_{i+1}$ .

Разрешая полученное уравнение относительно  $t_{i+1}$ , найдем

$$t_{i+1} = t_i + (\varphi_0^{i+1} - \varphi_0^i) \left[ \frac{\sqrt{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0^{i+1} - 1} (\varphi_0^{i+1} + \sin \varphi_0^{i+1} \cos \varphi_0^{i+1})}{\sqrt{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(0) - 1} \operatorname{ctg} \varphi_0^{i+1} \cos \varphi_0^{i+1}} - \beta \bar{c}^2 \frac{\cos \varphi_0^{i+1} \sin \varphi_0^{i+1}}{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0^{i+1} - 1} \right]. \quad (8.12)$$

При  $t_0 = 0$  имеем  $\varphi_0^0 = \varphi_0(t_0) = \varphi_0(0)$ . Задавая последовательно  $\varphi_0^i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ,  $\varphi_0^{i+1} > \varphi_0^i$  и вычисляя по (8.12), получаем зависимость  $\varphi_0(t)$ .

В частном случае уравнение (8.12) может быть упрощено и зависимость  $\varphi_0(t)$  можно получить более простыми вычислениями.

Рассмотрим случай, когда  $\bar{c}^2 \beta < 1$ ;  $\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(t) > 1$ . В этом случае уравнение (8.11) примет вид

$$\frac{d\varphi_0(t)}{dt} = \cos \varphi_0(0) \frac{\operatorname{ctg} \varphi_0(t)}{\varphi_0 + \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)}.$$

Перепишем это уравнение в виде

$$[\varphi_0(t) \operatorname{tg} \varphi_0(t) + \sin^2 \varphi_0(t)] d\varphi_0 = \cos \varphi_0(0) dt. \quad (8.13)$$

Интегрируя уравнение (8.13), получаем

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_0(t) - \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t)}{2} - \frac{\varphi_0(0) - \sin \varphi_0(0) \cos \varphi_0(0)}{2} + \\ + \int_{\varphi_0(0)}^{\varphi_0(t)} x \operatorname{tg} x dx = \cos \varphi_0(0) t. \end{aligned} \quad (8.14)$$

Таким образом, при выполнении условий

$$\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(t) > 1; \quad \bar{c}^2 \beta < 1 \quad (8.15)$$

для нахождения зависимости  $\varphi_0(t)$  в (8.15) можно пользоваться формулой (8.14).

Подставляя  $\partial I / \partial t = P$  в уравнение (8.1), получаем

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{I}{\beta} = \frac{1}{\beta} (x \cos \varphi - 1). \quad (8.16)$$

Принимая в (8.16)  $\varphi = 0$ , получаем уравнение относительно максимального износа  $I_{\max}(t) = I(\varphi, t)_{\varphi=0}$

$$\frac{dI_{\max}}{dt} + \frac{1}{\beta} I_{\max} = \frac{1}{\beta} (x - 1). \quad (8.17)$$



Решение уравнения (8.17) при условии  $I_{max}(0) = 0$  имеет вид

$$I_{max} = (1/\beta) \exp(-t/\beta) \int \exp(\tau/\beta) [x(\delta) - 1] d\tau = \\ = \exp(-t/\beta) - 1 + \frac{1}{\beta} \exp(-t/\beta) \int_0^t \exp(\tau/\beta) x(\delta) d\tau; \quad (8.18)$$

$$\frac{1}{\beta} \exp(-t/\beta) \int_0^t \exp(\tau/\beta) x(\delta) d\tau = \exp(-t/\beta) \int_0^t x(\delta) d \exp(\tau/\beta) = \\ = \exp(-t/\beta) [\exp(t/\beta) (x(t) - x(0))] - \\ - \exp(-t/\beta) \int_0^t \exp(\tau/\beta) (dx(\delta)/d\tau) d\delta. \quad (8.19)$$

Подставляя  $x = 1/\cos \varphi_0(t)$ ,  $x_0 = 1/\cos \varphi_0(0)$  и (8.19) в (8.18), получаем

$$I_{max} = \exp(-t/\beta) + 1/\cos \varphi(t) - 1 - [\exp(-t/\beta)]/\cos \varphi_0(0) - \\ - \int_0^t \exp[(\tau-t)/\beta] \frac{\sin \varphi_0(\tau)}{\cos^2 \varphi_0(\delta)} \frac{d\varphi_0(\tau)}{d\tau} d\delta. \quad (8.20)$$

Таким образом, после вычисления функции  $\varphi_0(t)$  можно определить  $I_{max}$  по (8.20), при этом вместо  $d\varphi_0(\tau)/d\tau$  в подынтегральном выражении следует использовать правую часть уравнения (8.11). При  $t/\beta \gg 1$  выражение (8.20) упрощается

$$\int_0^t \exp[(\tau-t)/\beta] \frac{\sin \varphi_0(\delta)}{\cos^2 \varphi_0(\delta)} \frac{d\varphi_0(\delta)}{d\tau} d\delta = \frac{\sin \varphi_0(t)}{\cos^2 \varphi_0(t)} \frac{d\varphi_0(t)}{dt} \int_0^t \exp[(\tau-t)/\beta] d\tau = \\ = \beta \frac{\sin \varphi_0(t)}{\cos^2 \varphi_0(t)} \frac{d\varphi_0(t)}{dt} [1 - \exp(-t/\beta)]. \quad (8.21)$$

Подставляя (8.11) и (8.21) в (8.20), получаем при  $t/\beta \gg 1$

$$I_{max}(t) = \frac{1}{\cos \varphi_0(t)} - 1 - \beta \frac{[\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(t) - 1] \times}{[\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(t) - 1]^{3/2} \times} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\times \sqrt{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(0) - 1}}{\times [\varphi_0(t) + \sin \varphi_0(t) \cos \varphi_0(t) - \beta \bar{c}^2 \cos^3 \varphi_0(t) \sqrt{\bar{c}^2 \cos^2 \varphi_0(0) - 1}]} \quad (8.22)$$

По приведенным формулам можно аналитически определять износ или долговечность подшипниковых узлов.

## 8.9. ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ С ЛИНЕЙНЫМИ ШАГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Комплекс научных исследований по отдельным вопросам разработки исполнительных механизмов СУЗ с ЛШД позволил разработать общую методику расчета таких механизмов.

Исходными данными для расчета являются: диаметр якоря; наружный диаметр ЛШД; рабочий ход РО; шаг перемещения РО; рабочая нагрузка; максимальная скорость и диапазоны скоростей перемещения РО; скорость аварийного срабатывания; режим работы; продолжительность включения; окружающие температурные условия; требования к герметизации; параметры среды внутри двигателя (давление, температура, состав); радиационная обстановка по длине ИМ (потoki нейтронов и  $\gamma$ -квантов).

Расчет обычно начинается с выбора конструктивной схемы ИМ и ЛШД, после чего производится предварительный расчет.

**Предварительный расчет.** Шаг перемещения РО обычно задается исходя из требований физики и регулирования ядерного реактора. Поэтому шаг, отрабатываемый линейным двигателем, не должен превышать заданный, определяемый допустимым значением вводимой реактивности. Шаг, отрабатываемый двигателем, может быть меньше заданного. Основным критерием при выборе значения шага являются оптимальные размеры зубцовой зоны ЛШД. Если не удастся обеспечить при заданном шаге оптимальные размеры зубцовой зоны, то принимается значение шага, близкое к оптимальным значениям зубцовой зоны,  $t = \tau/m = (a + c)/4$ . Параметры  $a$  и  $c$  выбираются по номограммам, приведенным на рис. 8.23.

Рабочий зазор ЛШД выбирается исходя из требований обеспечения максимального статического усилия двигателя с учетом технологических и конструктивных факторов.

Исходя из заданной рабочей нагрузки (масса подвижных частей механизма, усилия, создаваемые потоком жидкости или газа, и т. п.) определяют максимальное статическое усилие шагового электродвигателя  $P_{max}$ . Максимальное статическое усилие при заданном диаметре якоря определяется с помощью номограмм, приведенных на рис. 8.24, где даны численные значения удельных усилий для различных значений рабочих зазоров и параметров зубцовой зоны,

$$P_{max} = 1,6kP_{уд}abz = (4 \div 5) P_H,$$

где 1,6 — коэффициент, учитывающий одновременное включение двух фаз двигателя;  $k$  — число магнитных контуров в фазе;  $b$  — длина зуба;  $z$  — число зубцов в одной фазе двигателя,  $P_H$  — усилие нагрузки.

Рабочая длина двигателя  $L$  определяется как

$$L = \tau z m = (a + c) z m = 4z(a + c).$$

Приведенный расчет позволяет на первой стадии определить усилие двигателя на низких частотах

$$P = P_{max}/2,5.$$

На этой стадии целесообразно произвести оптимизацию размеров магнитной системы ЛШД по методике, приведенной в этой главе.

Таким образом, при предварительном расчете выбирают основные размеры зубцовой зоны двигателя, основные размеры магнитопровода ЛШД, определяют статические характеристики, а также производят оптимизацию магнитной системы и оценивают усилие двигателя на низких частотах.

На втором этапе производят поверочный расчет, заключающийся в уточнении выбранных размеров. Он включает в себя расчет магнитной системы, определение размеров обмоток, определение статических характеристик двигателя при рассогласовании зубцов якоря и статора.

**Поверочный расчет.** Расчет магнитной цепи заключается в определении магнитодвижущей силы, необходимой для создания в рабочем зазоре требуемой индукции. В зависимости от конструктивной схемы магнитной системы она может содержать ряд магнитных контуров (см., например, рис. 8.6). Средняя силовая линия магнитного поля в пределах одного контура показана на рис. 8.6. Эта линия для всех контуров одинакова, поэтому расчет МДС производят для одного контура. По закону полного тока

$$\oint H dl = \sum F,$$

где  $H$  — напряженность поля в направлении  $dl$ ;  $\sum F$  — искомая МДС, пропорциональная полному току в рассматриваемом контуре.

Если магнитную цепь разделить на  $n$  участков, в пределах которых считать напряженность магнитного поля постоянной, то интеграл  $\oint H dl$  можно заменить суммой  $\sum H_x l_x$ , где  $x=1, 2, 3, \dots, n$ , тогда  $\sum F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n$ .

Расчет магнитной цепи производится по известным методикам, приведенным в [24].

При расчете магнитной цепи задаются индукцией в рабочем зазоре при совпадении осей зубцов статора и якоря, а следовательно, и рабочим магнитным потоком  $\Phi$ . По значению потока определяют индукцию на остальных участках магнитной цепи. Затем по кривой намагничивания для электротехнической стали нужной марки находят напряженности каждого участка  $H_n$ . В герметичных линейных шаговых двигателях используются нержавеющей стали марок 08Х17Н и 08Н17Т и электротехнические стали типа Э8. Магнитные свойства нержавеющей магнитомягких сталей значительно хуже свойств обычных электротехнических сталей.

Умножая напряженность  $H_x$  на длину соответствующего участка  $l_x$ , получают магнитное напряжение каждого участка.

МДС рабочего зазора определяется как

$$F_{p.z} = \Phi / \Lambda_{p.z},$$

где  $\Lambda_{p.z} = \mu_0 b z \lambda / 2$  — проводимость рабочего зазора при совпадении осей зубцов статора и якоря;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\lambda$  — удельная магнитная проводимость, после чего определяется МДС магнитного контура  $\sum F = F_1 + F_2 + \dots + F_n + F_{p.z}$ .

Определение числа витков катушки следует вести с учетом ее нагрева, который в исполнительных механизмах СУЗ с ЛШД достигает высокого значения ( $300^{\circ}\text{C}$  и выше).

Ток обмотки управления  $I = U/R_{\max}$ , где  $U$  — напряжение управления;  $R_{\max}$  — сопротивление обмотки управления, нагретой до максимально допустимой температуры  $\Theta$ .

Напряжение следует брать для тормозного режима работы двигателя. При этом

$$R_{\max} = (1/\gamma_{\max}) n L_{\text{ср}} \omega_k / s,$$

где  $1/\gamma_{\max}$  — удельная проводимость при температуре  $\Theta$ ;  $n$  — число катушек в фазе;  $L_{\text{ср}}$  — средняя длина катушки;  $\omega_k$  — число витков катушки;  $s$  — сечение провода.

МДС обмотки управления  $F_k = 2I\omega_k$ .

Решая совместно эти уравнения, получаем  $S = (1/\gamma_{\max}) \times + n L_{\text{ср}} F_k / (2U)$ .

Число витков катушки  $\omega_k = (S_k/s) k_z$ , где  $S_k$  — площадь катушки;  $k_z$  — коэффициент заполнения.

Плотность тока  $\Delta_t = I/s$ .

Если плотность тока превышает допустимое по перегреву значение, то выбранное значение индукции в рабочем зазоре уменьшается и расчет повторяется.

Расчет статических характеристик заключается в определении зависимости статического усилия от рассогласования зубцов якоря и статора.

Для построения статических характеристик используется кривая  $\Phi = f(\Sigma F)$  (рис. 8.34). Из точки на оси абсцисс, соответствующей полной МДС, проводятся лучи под углами наклона  $\alpha_1, \dots, \alpha_x, \dots, \alpha_n$ , соответствующие рассогласованию зубцов, при этом  $\tan \alpha_x = \Lambda_x$ . Пересечение лучей с кривой дает распределение МДС в стали и рабочем зазоре.

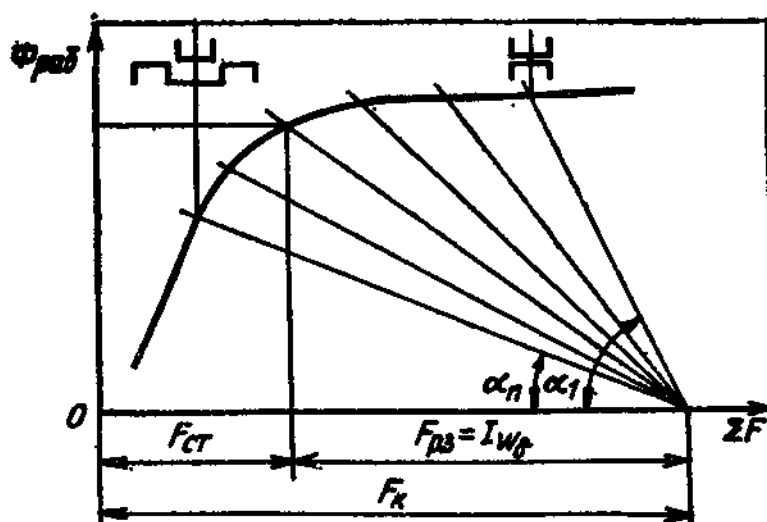


Рис. 8.34. Зависимость магнитного потока от МДС

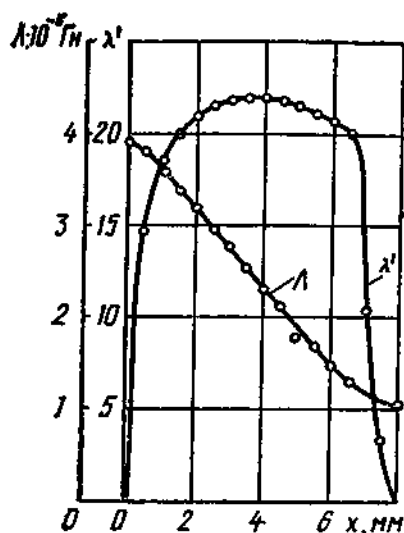


Рис. 8.35. Зависимости  $\lambda = f(x)$  и  $\lambda' = f(x)$

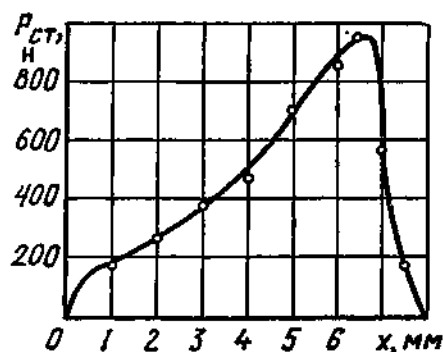


Рис. 8.36. Зависимость статического усилия ЛШД от рассогласования зубцов якоря и статора

Статическое усилие одной фазы определяется как

$$P_{ст} = 5,1 (I\omega)^2 \mu_0 b z d \lambda / dx,$$

где 5,1 — размерный коэффициент;  $I\omega$  — МДС на пару полюсов, приходящиеся на рабочий зазор;  $z$  — число зубцов якоря.

Производная удельной магнитной проводимости определяется по формулам, приведенным в гл. 8.

На рис. 8.35 показаны характерные кривые зависимости удельной магнитной проводимости и ее производной от рассогласования зубцов якоря и статора, вычисленные для одного ЛШД, используемого в исполнительном механизме СУЗ.

Построив семейство кривых типа показанного на рис. 8.36 при различных токах, можно определить максимальные статические усилия при этих токах и построить зависимость  $P_{ст} = f(F_{мдс})$ , показанную на рис. 8.37 и вычисленную для конкретного ЛШД.

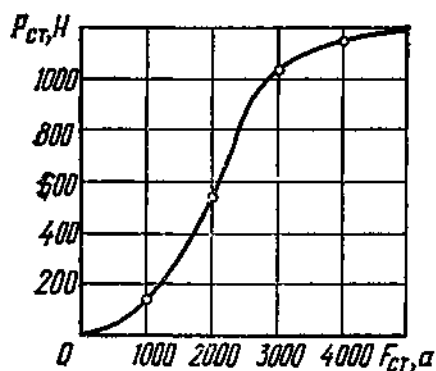


Рис. 8.37. Зависимость максимального статического усилия ЛШД от МДС

Расчет динамических характеристик. По результатам предварительного и поверочного расчетов составляется таблица исходных данных, и по приведенной выше методике и программе с помощью ЭВМ определяются динамические характеристики ИМ СУЗ.

При этих расчетах оценивается качество движения подвижной системы механизма СУЗ при единичном

шаге и при сериях шагов, в том числе и с реверсом, отрабатываемых двигателем на различных частотах. На основе анализа полученных данных делаются выводы о запасе двигателя по усилию и частоте, а также о значениях выбросов перерегулирования при движении подвижной системы механизма и других параметрах движения. На основе полученных при расчете данных делается вывод о соответствии ИМ СУЗ требуемым критериям устойчивости.

Если ИМ СУЗ отвечает требуемым критериям устойчивой работы в динамических режимах, то расчет его динамики на этой стадии заканчивается.

Если возникает необходимость внести коррективы, то обращаются к программе оптимизации основных параметров ЛШД и проводят расчет на ЭВМ по методике, приведенной выше. Результаты расчетов могут показать необходимость изменения некоторых параметров, например увеличения форсировки. В этом случае обращаются снова к программе расчета параметров движения ИМ (см. рис. 7.5) и повторяют расчеты.

Если программа оптимизации требует изменения конструктивных параметров, то расчет повторяют начиная с предварительного расчета. При таких расчетах может потребоваться изменение размеров двигателя, включая параметры зубцовой зоны, или изменение нагрузки, что может потребовать корректировки технического задания.

При наличии возмущающих воздействий на ИМ СУЗ оценку их влияния проводят на ЭВМ по программе, приведенной в гл. 7.

При расчете динамики ИМ СУЗ окончательно определяются значения токов тормозного режима ЛШД и токов форсировки, поэтому после определения динамических характеристик можно проводить расчеты тепловых режимов работы привода на ЭВМ по программе и методике, приведенным ранее.

В случае превышения температур обмоток двигателя заданных пределов изменяются параметры питания двигателя и расчеты повторяются начиная с третьего этапа; при получении на этой стадии неудовлетворительных результатов расчеты проводятся начиная с первого этапа.

На рис. 8.38 приведена схема расчетов механизмов СУЗ с ЛШД по приведенной общей методике. В результате последовательного проведения нескольких серий расчетов можно получить параметры и характеристики ИМ СУЗ, близкие к оптимальным.

Использование этой методики расчета позволяет: производить сравнительную оценку нескольких вариантов механизмов и выбрать конструктивную схему, наиболее полно отвечающую техническим требованиям; оптимизировать выбранную конструкцию ИМ по заданным параметрам; отказаться от макетных проработок и значительно снизить объем экспериментальных работ при конструировании ИМ СУЗ.

Основные блоки разработанных программ могут быть с незначительными изменениями использованы для расчетов ИМ СУЗ,

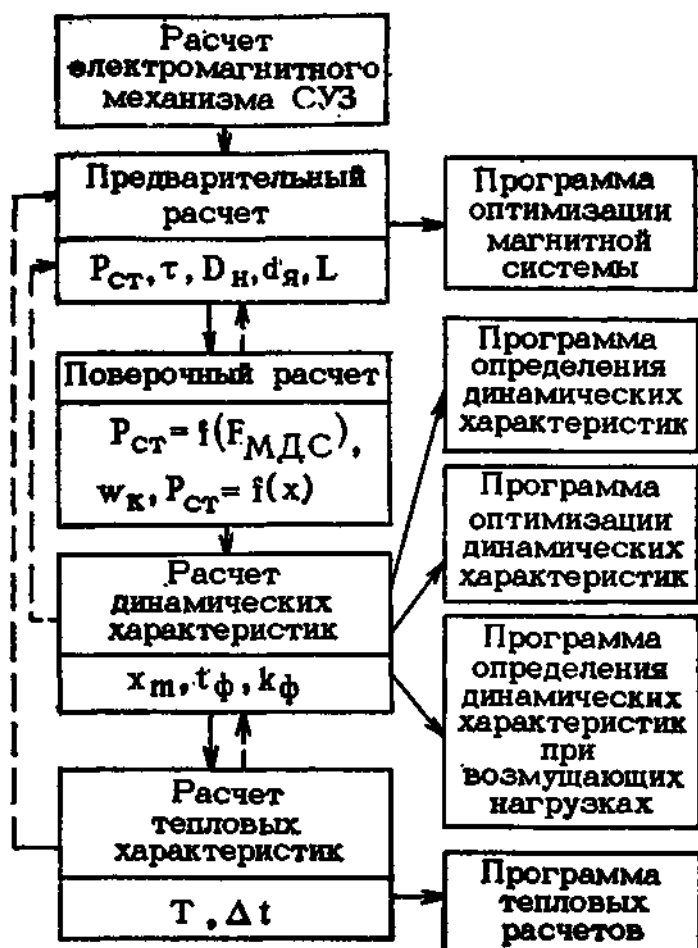


Рис. 8.38. Последовательность расчета электромагнитного механизма СУЗ

работающих и в других режимах, например в условиях воздействия вибрации и т. п.

На основе имеющихся программ для расчета электромагнитных ИМ СУЗ может быть реализована система автоматизированного проектирования таких механизмов.

## Глава девятая

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

Анализ опыта разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации ИМ СУЗ для ядерных энергетических установок позволяет наметить основные направления их дальнейшего совершенствования и развития.

К этим направлениям относятся: создание новых линейных электромагнитных ИМ СУЗ; внедрение автоматизированного про-

ектирования ИМ СУЗ с использованием средств машинной графики; создание специальных материалов и изделий, приспособленных для длительной эксплуатации в условиях ядерных реакторов; совершенствование отдельных элементов конструкции ИМ СУЗ; создание методологии и технических средств диагностики и прогнозирования состояния ИМ СУЗ; создание централизованного испытательного оборудования; унификация ИМ СУЗ для однотипных ядерных установок.

Рассмотрим подробнее указанные направления. Накопленный опыт по разработке электромагнитных линейных ИМ СУЗ позволяет уже в настоящее время производить их расчет с помощью имеющихся программ для ЭВМ, основываясь на апробированных методиках. Эти методики позволяют не только рассчитывать отдельные параметры и характеристики ИМ СУЗ с учетом их специфических условий эксплуатации, но и оптимизировать их по тем или иным критериям.

Однако экономическая эффективность внедрения этих программ является сравнительно невысокой из-за большой трудоемкости ручного кодирования и декодирования, тем более для операций, связанных с графической информацией при вводе в ЭВМ и ее выводе.

Использование машинной графики при автоматизированной обработке информации на ЭВМ открывает широкие перспективы для повышения эффективности проектирования. При этом резко возрастает сфера применения вычислительной техники вследствие автоматизации ввода и вывода графической информации и обеспечения оперативного графического диалога проектировщика с ЭВМ с помощью графических дисплеев.

Простая конструкция получающих все большее распространение линейных электромагнитных ИМ СУЗ и их отдельных элементов значительно упрощает создание алгоритмов и машинных программ для автоматизированного формирования и воспроизведения графических документов. Указанное обстоятельство позволяет значительно сократить сроки проектирования и снизить стоимость работ при создании ИМ СУЗ.

Как известно, используемые в настоящее время в ИМ СУЗ коррозионно-стойкие магнитомягкие стали по своим электромагнитным свойствам значительно уступают стандартным электротехническим сталям и сплавам, используемым в электротехнической промышленности. Это выдвигает задачу разработки специальных электротехнических сталей с повышенными магнитными характеристиками для работы в условиях ядерных реакторов. Важным требованием, предъявляемым к таким сталям, является отсутствие в них элементов, образующих изотопы с большим периодом полураспада. Наметившийся прогресс в области создания сталей с изменяемыми магнитными характеристиками позволяет оценить перспективность этого направления при создании ИМ СУЗ, особенно электромагнитного типа. Использование сталей с изменяемыми магнитными характеристиками дает возможность дальней-



шего упрощения конструкции ИМ СУЗ, а именно: в герметичных конструкциях отказаться от установки в прочный корпус привода специальных полюсных наконечников и других подобных элементов, отказаться от использования сварных магнитных и немагнитных соединений и выполнять такие элементы конструкции из однородного материала, т. е. избежать последствий, связанных с тепловыми расширениями элементов, выполненных из неоднородных материалов. Кроме упрощения конструкции ИМ использование сталей с изменяемыми магнитными характеристиками позволяет значительно повысить технологичность изготовления электротехнических узлов ИМ СУЗ. Так, например, формирование зубцовой зоны на якоре и полюсах ЛШД может производиться без механической обработки. С помощью специального индуктора якорь может нагреваться токами высокой частоты и быстро охлаждаться, при этом на магнитомягкой заготовке формируются немагнитные участки.

Одним из важных вопросов при разработке исполнительных механизмов СУЗ является снижение износа подшипниковых узлов, как правило, расположенных в первом контуре ядерного реактора. Кардинальным решением задачи снижения или даже полного исключения износа подшипников является использование получающей распространение в электромашиностроении системы магнитного и электромагнитного подвеса, в том числе и в электрических машинах большой мощности [1]. Такие системы позволяют значительно снизить износ трущихся элементов или даже полностью исключить его. Использование магнитного подвеса якоря и других подвижных элементов принципиально возможно и в линейных электромагнитных механизмах. Однако практическое решение этой задачи, имеющее важное значение для увеличения ресурса работы линейных электромагнитных механизмов, неотделимо от решения другой задачи, а именно демпфирования колебаний якоря ЛШД при отработке шага в системе с магнитным подвесом. Вместе с тем существующие методы электромагнитного демпфирования позволяют решить и эту задачу, т. е. исключить износ подшипниковых узлов при воздействии боковых сил притяжения якоря, создаваемых электромагнитным полем двигателя при обеспечении устойчивой работы привода в шаговом режиме. Решение этой задачи важно еще и потому, что подшипниковые узлы являются практически единственными элементами линейного электромагнитного привода, подверженными износу и определяющими в основном ресурс работы всего исполнительного механизма.

Существующие в настоящее время системы охлаждения ИМ СУЗ высокотемпературных ядерных реакторов рассчитаны на отвод тепла в основном от прочноплотного корпуса привода СУЗ, связанного с первым контуром реактора. В то же время отвод тепла, генерируемого непосредственно электродвигателем привода, является малоэффективным. При значительных толщинах прочного корпуса и перемешивании теплоносителя при перемещении подвижных частей ИМ в прочном корпусе могут возникать

градиенты температур и термопульсации, которые могут явиться причиной появления трещин в корпусе, а следовательно, и снижения ресурса работы ИМ. Решение этой проблемы возможно двумя путями, первым из которых является повышение класса нагревостойкости изоляции проводов и изоляционных материалов в магнитных системах привода. Однако такое решение задачи, с одной стороны, связано с разработкой новых обмоточных проводов, пропиточных и заливочных составов, а с другой — влечет за собой значительный расход меди и как следствие уменьшение быстродействия привода из-за возрастания электромагнитной постоянной времени. Кроме того, следует учитывать, что повышение температуры магнитной системы, как правило, приводит к снижению магнитных характеристик сталей, используемых в магнитопроводе. Вторым путем решения этой задачи является обеспечение эффективного охлаждения обмоток ЛШД, в том числе и внутрипроводниковым охлаждением, что позволяет также значительно снизить поперечные габаритные размеры двигателя. Реализация второго направления связана с разработкой обмоточных проводов поллой формы небольшого сечения ( $3 \times 4$  мм), которые в настоящее время не выпускаются промышленностью. Использование таких проводов дает возможность применить изоляционные материалы и технологические процессы, традиционно используемые в электротехнической промышленности. В качестве охлаждающих сред может использоваться конденсат турбогенераторов АЭС.

Развитие ядерной энергетики и проблемы экологии требуют повышения надежности и ядерной безопасности ядерных реакторов, и в первую очередь систем их управления и защиты и важнейших элементов этих систем — исполнительных механизмов СУЗ.

Накопленный опыт по испытаниям, конструктивной доработке и эксплуатации ИМ СУЗ показал, что в процессе указанных этапов выявляются различного вида неисправности и неполадки в функционировании ИМ СУЗ. Проведенный анализ этих неисправностей на основании отечественных и зарубежных данных [8] позволил установить основные виды неисправностей в периоды предпусковых, пусковых испытаний и в период эксплуатации. Основными причинами технических неисправностей в ИМ СУЗ являются износ подвижных элементов, потеря изоляции из-за попадания влаги в электротехнические узлы, короткое замыкание в электрических соединителях, трещины на силовых элементах. И хотя процент этих неисправностей в период эксплуатации уменьшается, их устранение часто требует доработки конструкции и остановки ядерного реактора. Не останавливаясь подробно на всех видах неисправностей и их возможных причинах, отметим только, что в период эксплуатации растет число неизвестных причин неисправностей. Эти неизвестные причины составляют от 18 до 22 % всех неисправностей в ИМ СУЗ. Выявление таких неисправностей требует осмотра активированного оборудования, а в процессе эксплуатации такой осмотр зачастую невозможен. Следует также от-

метить, что само по себе выявление неисправностей требует зачастую замены ИМ СУЗ, что связано с остановкой реактора. В связи с этим особое значение приобретает вопрос диагностики состояния ИМ СУЗ в эксплуатационных или предельно близких к ним условиях работы. Диагностика должна позволить выявить не экстремальные нарушения в функционировании тех или иных элементов конструкции, а проследить за характером происходящих в них процессов деградации в течение определенного времени и в конечном счете создать научную методику прогнозирования состояния ИМ СУЗ за определенный промежуток его эксплуатации.

В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом в реакторостроении разработаны способы диагностики некоторых видов реакторного оборудования (корпуса реактора, трубопроводов первого контура, нейтронных датчиков и др.). Однако вопросы диагностики состояния ИМ СУЗ не получили еще должного развития.

Специфической особенностью современных ИМ СУЗ является большая насыщенность электрооборудования как в самом ИМ СУЗ (обмотки управления, магнитопроводы, электроизоляционные материалы, электрические датчики положения регулирующего органа и т. п.), так и в системе управления ИМ (силовые тиристорные преобразователи, системы логики, системы индикации положения РО и исправности электрических цепей управления и т. п.).

Режим работы ИМ СУЗ определяется свойствами системы: нагрузка — привод — схема управления. При этом для создания оптимального регулятора ядерного реактора должны быть оптимизированы все указанные составляющие системы. Рассмотрим более подробно составляющие этой системы.

К нагрузке относятся элементы конструкции линейного ИМ СУЗ, расположенные, как правило, в первом контуре реактора, к которым относятся: подвижные элементы ИМ СУЗ, подшипниковые узлы, детали ИМ СУЗ, расположенные в тракте СУЗ, такие, как тяги, узел сцепления, РО. Эти элементы подвержены воздействию агрессивной среды первого контура и ионизирующих излучений. Диагностика их состояния на реакторной установке представляет значительные трудности, вместе с тем выход из строя указанных элементов часто связан с остановками реактора.

Привод СУЗ представляет собой в основном электрооборудование (электродвигатель или его отдельные элементы, датчики положения РО и т. п.), установленное, как правило, за прочным корпусом исполнительного механизма и не подверженное воздействию среды первого контура реактора. В случае выхода из строя оно может быть заменено на работающем реакторе.

Третьим элементом является электрическая система управления, доступная для ремонта и осмотра, в которой используются принципы дублирования и резервирования.

Несмотря на различные возможности устранения неисправностей в составляющих системы, неисправность в любой составляющей может привести к выходу из строя ИМ СУЗ. Поэтому важ-

ной особенностью диагностики состояния ИМ СУЗ является проведение комплексной диагностики всех элементов указанной системы. Разработка программ и специальных технических средств диагностики состояния ИМ СУЗ является задачей специальных исследований и не входит в настоящую книгу. Однако обобщение опыта разработки, испытаний и эксплуатации ИМ СУЗ позволяет выработать методологический подход к решению этой задачи.

Решение проблемы диагностики и прогнозирования можно разбить на следующие основные этапы: составление методик диагностики на основе анализа статистических данных неисправностей в элементах системы нагрузка — привод СУЗ — схема управления; выбор способа диагностики; выбор и создание аппаратуры для проведения диагностики; создание автоматизированного технологического комплекса (АТК) для проведения диагностики, включающего автоматизированные системы управления (АСУ), обеспечивающие работу системы в различных режимах и сбор информации о текущих параметрах системы; отработка способов и методик диагностики на АТК.

После проведения указанных этапов необходимо внести в конструкторскую документацию ИМ СУЗ соответствующие коррективы, позволяющие проводить их диагностику в процессе отработки на автоматизированном технологическом комплексе (установка датчиков, изменение конструкции) в составе стендового оборудования предприятия-разработчика или изготовителя.

В процессе диагностики состояния ИМ СУЗ и штатной системы управления на автоматизированном технологическом комплексе могут быть выявлены основные неисправности в процессе их развития и проанализированы их причины. Таким образом, важнейшим этапом диагностики является устранение неисправностей в системе привода СУЗ уже на стадии разработки и отработки конструкции.

По завершении этого этапа в конструкторскую документацию должны быть внесены окончательные коррективы, предусматривающие установку датчиков и аппаратуры для диагностики на стадии пусконаладочных работ на реакторной установке и в процессе эксплуатации, причем на стадии эксплуатации диагностические данные должны обобщаться и использоваться разработчиками для прогнозирования состояния системы на определенный период времени, а в случае необходимости на основании данных прогнозирования элементы конструкции должны дорабатываться в целях повышения их ресурса. При таком подходе к совершенствованию оборудования его доработка уже не будет связана с непредвиденными остановками ядерного реактора.

Задача организации АТК связана с централизацией использования такого комплекса, представляющего собой сложное стендовое оборудование, оснащенное большим количеством технических средств, включая вычислительную технику.

Целесообразно использовать АТК централизованно среди однотипных предприятий, выпускающих оборудование СУЗ, или да-

же в рамках отрасли и на международном уровне. Различные мнения по использованию оборудования требуют строго количественной проверки, что предполагает разработку соответствующего математического аппарата, позволяющего максимально исключить субъективный подход к решению этого вопроса [3].

## Глава десятая

### ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СУЗ

#### 10.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрим расчет основных элементов исполнительных механизмов СУЗ на двух примерах: для электромеханического механизма СУЗ с преобразованием вращательного движения электродвигателя в поступательное перемещение РО и для дискретного линейного электромагнитного механизма.

В этих примерах приводятся только расчеты, являющиеся специфическими для ИМ СУЗ, проводимые при выборе конструктивной схемы и определении основных размеров и характеристик элементов механизмов. Более детальные расчеты дальнейших стадий конструирования (расчеты на прочность элементов передач, корпусных и крепежных деталей, поверочные расчеты, проводимые для уточнения выбранных размеров и параметров) здесь не рассматриваются; при необходимости приводятся ссылки на соответствующую литературу.

В рассматриваемых примерах использованы типовые схемы, конструктивные решения, а также конфигурация, размеры и материалы узлов и деталей, принятые в отечественной практике разработки ИМ СУЗ для ядерных реакторов.

#### 10.2. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА СУЗ

Рассмотрим основные расчеты электромеханического ИМ СУЗ на примере исполнительного механизма КС—АЗ исследовательского ядерного реактора МИР (см. рис. 3.33). Кинематическая схема механизма и его конструкция показаны на рис. 3.34—3.36.

*Исходными данными для расчета являются:*

Масса РО, кг . . . . .	4,6
Масса подвижных частей с РО $G$ , кг . . . . .	15
Максимальное перемещение РО $H$ , мм . . . . .	1100
Рабочая скорость перемещения РО $v$ , мм/с . . . . .	11
Время сброса РО с полной высоты по аварийному сигналу, с . . . . .	1
Диаметр привода, мм (не более) . . . . .	125

Перемещение РО осуществляется электродвигателем. В целях унификации с механизмом АР в механизме КС — АЗ используется электродвигатель постоянного тока с номинальной частотой вращения  $n_{дв} = 4000$  об/мин.

Общее передаточное число привода ИМ можно определить, если принять по условию прочности модуль шестерни, сцепленной с рейкой,  $m_{ш} = 1,5$  мм и число ее зубьев  $z_{ш} = 20$ :

$$i_{общ} = \pi z_{ш} m_{ш} n_{дв} / (60 \cdot v) = \pi \cdot 20 \cdot 1,5 \cdot 4000 / (60 \cdot 11) = 570,9.$$

Принимая КПД каждой червячной пары 0,5, КПД винтовой передачи 0,3 и КПД пары шестерен 0,98, получает КПД привода  $\eta \approx 0,06$ , тогда мощность электродвигателя

$$N_{дв} = Gv / (102\eta) = 15 \cdot 0,011 / (102 \cdot 0,06) = 0,027 \text{ кВт}.$$

Одним из основных элементов кинематики ИМ является фрикционная электромагнитная муфта (рис. 10.1). Муфта обеспечивает передачу крутящего момента при перемещении РО, его сброс по аварийному сигналу и торможение в конце пути падения в активную зону реактора.

Усилие тормозной пружины при ее сжатии на величину  $x$ , соответствующую зоне торможения регулирующего органа  $h_T$ , изменяется от значения предварительного поджатия  $P_1 = cx_0$  до значения  $P_2 = c(x_0 + x)$ . Тогда среднее усилие пружины за время торможения

$$P_{ср} = (P_1 + P_2) / 2 = c(x_0 + x/2).$$

С учетом заданного диаметра привода по конструктивным соображениям выбираем наружный и внутренний радиусы фрикционных дисков:  $z_1 = 65$  мм;  $z_2 = 45$  мм. Примем также  $x = x_0 = 10$  мм.

По условиям прочности зубьев реечной шестерни зону торможения примем  $h_T = 100$  мм. В этом случае усилие на зубья шестерни при торможении будет

$$P_{ш} = \frac{9,80665GH}{h_T} = \frac{9,80665 \cdot 15 \cdot 1,1}{0,1} = 1618,1 \text{ Н}.$$

Коэффициент трения фрикционных дисков  $\mu_f = 0,4$ . Число трущихся поверхностей  $z = 2$ . С учетом этого определим жесткость тормозной пружины фрикционного тормоза из соотношения

$$\begin{aligned} c &= \frac{9,80665GH}{(4/3) \mu_f (x_0 + x/2) z [(z_1^3 - z_2^3) / (z_1^2 - z_2^2)] [h_T / (\pi z_{ш} m)] i} = \\ &= \frac{9,80665 \cdot 15 \cdot 1100}{1,333 \cdot 0,4 (10 + 10/2) \cdot 2 [(65^3 - 45^3) / (65^2 - 45^2)] [100 / (3,14 \cdot 20 \cdot 1,5)] \cdot 4,7} = \\ &= 24,34 \text{ Н/мм}. \end{aligned}$$

Усилие пружины в конце торможения

$$P_{max} = c(x_0 + x) = 24,34 (10 + 10) = 486,8 \text{ Н}.$$

Выберем передаточное число между реечной шестерней и тормозными дисками  $i = 4,7$ , тогда винт, по которому перемещается нажимная гайка тормоза, в зоне торможения сделает

$$n_T = \frac{n_T}{\pi z_{ш} m} i = \frac{100 \cdot 4,7}{3,14 \cdot 20 \cdot 1,5} = 4,99 \text{ оборота}.$$

Рис. 10.1. Электромагнитное удерживающее и тормозное устройство с многодисковым тормозом

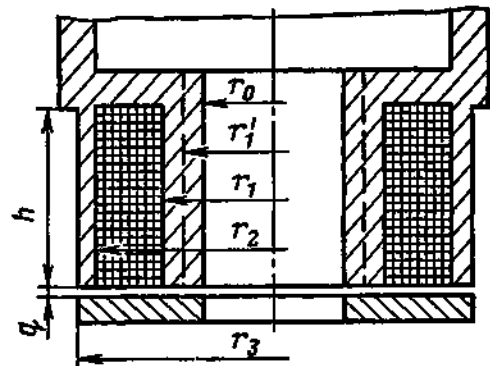
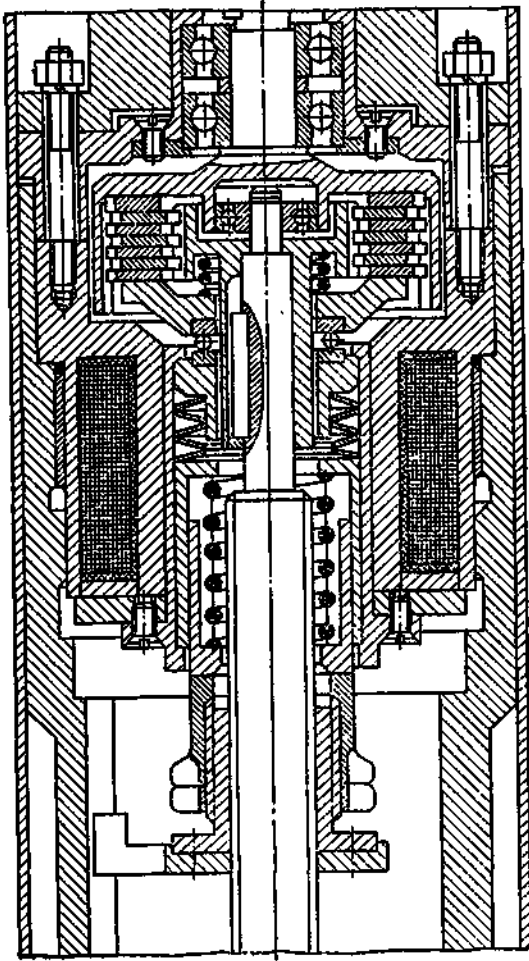


Рис. 10.2. Схема электромагнита

Выбрав по условиям прочности (бронзовая гайка со стальным винтом) шаг резьбы  $t=2$  мм, проверим ход гайки за время торможения

$$x_T = n_T t = 4,99 \cdot 2 = 9,98 \text{ мм.}$$

Учитывая, что  $x_T \approx x$ , коррективы в расчет можно не вводить. По полученной расчетной жесткости пружины можно выбрать окончательные размеры пружины с помощью нормалей:  $D_H=28$  мм;  $d=4$  мм;  $t=7,5$  мм;  $H=60$  мм.

Нетрудно показать, что принятые размеры пружины удовлетворяют значениям  $s$ ,  $P_{max}$ ,  $x_0$  и  $x$ .

Напряжение пружины

$$\tau_{max} = \frac{8PD_{cp}}{\pi d^3} = \frac{8 \cdot 497 \cdot 24}{\pi \cdot 4^3} = 474,8 \text{ МПа.}$$

Условие прочности пружины  $\tau_{max} < [\tau]$ , где  $[\tau] = 500 \div 700$  МПа — допустимое напряжение.

Сцепление фрикционных дисков при работе механизма в режиме компенсации реактивности должно осуществляться электромагнитом через пружину, имеющую значительно большую жесткость, нежели тормозная пружина.

Примем усилие этой пружины при срабатывании электромагнита (см. рис. 10.1)  $P=1800$  Н и определим основные размеры электромагнита (рис. 10.2).

*Исходные данные для расчета электромагнита:*

Ход якоря $g$ , см . . . . .	0,06
Сила тяги $F$ , Н . . . . .	1800
Напряжение $E$ , В . . . . .	6
Перегрев, °С . . . . .	70
Внутренний диаметр электромагнита $r_0$ , см . . . . .	2,1

Перегрев измеряется методом сопротивления при температуре окружающей среды 20 °С, а внутренний диаметр электромагнита выбран по конструктивным соображениям.

*Основные уравнения для расчета электромагнита*

Уравнение силы тяги

$$F = 2 \cdot 125,13 B_q^2 (z'_1)^2.$$

Уравнение магнитной цепи

$$NI = 2 \cdot 10 B_q g / \mu + \Sigma H_i l_i.$$

Уравнение нагрева

$$\Theta_f = \frac{q \rho}{2 k_0 f (r_2 - r_1)} \left( \frac{NI}{h} \right)^2.$$

Уравнение электрической цепи

$$E = 4 \rho (r_2 + r_1) NI / d^2.$$

В этих уравнениях:  $B_q$  — индукция в воздушном зазоре, Тл;  $\mu$  — магнитная проницаемость воздуха,  $\mu = 0,001256$ ;  $\Theta_f$  — температура установившегося перегрева катушки,  $\Theta_f = 70$  °С;  $q$  — относительная продолжительность включения, в рассматриваемом случае  $q = 1$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление медной проволоки,  $\rho = 2,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·см;  $k_0$  — коэффициент теплоотдачи,  $k_0 = 0,00118$  Вт/(см<sup>2</sup>·°С);  $f$  — коэффициент заполнения катушки,  $f = 0,5$ ;  $g$ ,  $r_1$  и  $r_2$  — в см;  $d$  — диаметр провода катушки без изоляции, см.

Для конструктивного фактора

$$\sqrt{F}/g = \frac{\sqrt{1800/9,80665}}{0,06} = 225,8$$

по кривой, приведенной в [60], находим  $B_q = 1,1$  Тл.

Тогда из уравнения силы тяги найдем

$$r_1 = \sqrt{\frac{F}{2 \cdot 125,13 B_q^2}} = \sqrt{\frac{1800}{2 \cdot 125,13 \cdot 1,1^2}} = 2,44 \text{ см.}$$

Этот радиус соответствует магниту без центрального отверстия. Найдем радиус  $r_1$ , эквивалентный по площади радиусу  $r'_1$ :

$$r_1 = \sqrt{(r'_1)^2 + r_0^2} = \sqrt{2,44^2 + 2,1^2} = 3,22 \text{ см;}$$

$$NI = \frac{2 \cdot 10 \cdot 1,1 \cdot 0,06}{0,001256} + 79 \cdot 3,22 = 1305 \text{ А.}$$



Для электромагнитов с плоским якорем  $h/(r_2 - r_1) = 4$ . Тогда из уравнения нагрева определим высоту паза  $h$  под катушку

$$h = \sqrt[3]{\frac{2q\rho (NI)^2}{k_0 f \Theta_f}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 1,2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1305^2}{0,00118 \cdot 0,5 \cdot 70}} = 5,66 \text{ см};$$

$$r_2 - r_1 = h/4 = 1,42 \text{ см};$$

$$r_2 = 1,42 + 3,22 = 4,64 \text{ см}.$$

Остальные размеры магнитопровода могут быть определены, если принять, что сечение стали на всех участках должно быть равно сечению сердечника  $S_c = \pi(r_2^2 - r_1^2) = \pi(3,22^2 - 1,42^2) = 18,71 \text{ см}^2$ .

Из уравнения электрической цепи определим диаметр провода

$$d = \sqrt{\frac{4\rho (r_2 - r_1) NI}{E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} (4,64 + 3,22) \cdot 1305}{6}} = 0,12 \text{ см}.$$

На этой стадии заканчивается предварительный расчет электромагнита. На дальнейших стадиях расчета выбирается стандартный размер провода, округляются в соответствии с нормальным рядом размеры магнитопровода и производится поверочный расчет, который может быть выполнен по методике, приведенной в [24].

### 10.3. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕХАНИЗМА СУЗ ДЛЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА АЭС

Линейный электромагнитный механизм СУЗ для ядерного реактора АЭС ВВЭР-1000 показан на рис. 3.14 и 3.15.

*Исходные данные для расчета:*

Масса подвижных частей (включая массу РО) $P_n$ , кг . . . . .	60
Рабочий ход РО, мм . . . . .	3500
Время сброса РО по сигналу аварийной защиты с полной высоты, с . . . . .	3—4
Максимальный диаметр механизма, мм . . . . .	230
Отверстие в патрубке СУЗ на крышке ядерного реактора, мм . . . . .	80
Продолжительность включения, % . . . . .	25
Максимальная продолжительность непрерывного перемещения, с . . . . .	360
Рабочая температура воды первого контура реактора в прочном корпусе механизма, °С . . . . .	220
Давление воды первого контура, МПа . . . . .	16
Эффективность полностью погруженного РО . . . . .	$0,8 \beta_{эф}$
Шаг РО $t_{ш}$ , мм . . . . .	4
Число фаз ЛШД . . . . .	4

По условиям обеспечения ядерной безопасности скорость введения положительной реактивности не должна превышать  $0,07 \beta_{эф}/с$ . С учетом этого линейная скорость перемещения РО не должна превышать значение

$$v_{max} = 0,07 \beta_{эф} H / (\alpha k_{ст}),$$

где  $H$  — ход РО,  $H = 3,5$  м;  $k_{ст}$  — эффективность РО,  $k_{ст} = 0,8 \beta_{эф}$ ;  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий эффективность РО в точке с максимальным изменением реактивности по сравнению со средним значением,  $\alpha \approx 4$ .

$$v_{max} = \frac{0,07 \beta_{эф} \cdot 3,5}{4 \cdot 0,8 \beta_{эф}} = 0,077 \text{ м/с}.$$

Примем  $v=0,05$  м/с. Этой скорости будет соответствовать перемещение РО шагами по 4 мм с частотой 12,5 Гц.

Определим зубцовое деление  $\tau$  ЛШД

$$\tau = mt_{\text{ш}} = 4 \cdot 4 = 16.$$

На основании номограмм (см. рис. 8.23) для рабочего зазора  $\delta=0,5$  мм (выбран по технологическим соображениям) размеры зуба  $a$  и впадины  $c$ , близкие к оптимальным, будут  $a=6,5$  мм и  $c=9,5$  мм.

Исходя из размера отверстия патрубка СУЗ на крышке реактора выбираем диаметр якоря  $D_{\text{я}}=70$  мм и толщину якоря 5 мм по условию прочности. Максимальное статическое усилие  $P_{\text{ст max}}$  (при одновременном включении двух фаз ЛШД) будет  $P_{\text{ст max}} \approx 5P_{\text{я}} = 5 \cdot 60 \cdot 9,80665 = 2942$  Н.

Длина зуба (см. рис. 10.3)

$$b = (\pi D_{\text{я min}} - kd)/k = (\pi \cdot 6 - 4 \cdot 1,1)/4 = 3,61 \text{ см};$$

здесь  $d=1,1$  — ширина немагнитной проставки;  $k$  — число магнитных контуров,  $k=4$ .

На основании формулы

$$P_{\text{ст max}} = 2 \cdot 1,6 k P_{\text{уд abz}} / (B_{\text{ж}}/B_{\text{ст}})^2,$$

где  $B_{\text{ж}}=1,8$  Тл — индукция в электротехнической стали и  $B_{\text{ст}} \approx 1,34$  Тл — индукция в магнитомягкой нержавеющей стали, из которой выполнены якорь и полюсные наконечники статора,  $P_{\text{ст max}}$  увеличится примерно в 2 раза при прохождении магнитным потоком не двух, а четырех рабочих зазоров и уменьшится на число, пропорциональное  $(B_{\text{ж}}/B_{\text{ст}})^2$ , что и учтено в формуле.

Число зубцов фазы статора

$$z = \frac{(B_{\text{ж}}/B_{\text{ст}})^2 P_{\text{ст max}}}{2 \cdot 1,6 \cdot k P_{\text{уд ab}}} = \frac{(1,8/1,34)^2 \cdot 2942}{2 \cdot 1,6 \cdot 4 \cdot 23 \cdot 0,65 \cdot 3,61} = 7,67.$$

Принимаем  $z=8$ , тогда длина зубцовой зоны одной фазы статора

$$l = (z-1)\tau + a = (8-1) \cdot 16 + 6,5 = 118,5 \text{ мм}.$$

Расчет магнитной цепи. Основные размеры магнитной системы, необходимые для расчета, показаны на рис. 10.3, 10.4. На этих рисунках показана средняя силовая линия поля в пределах одного магнитного контура. Эта линия одинаковая для всех контуров ЛШД. Магнитный контур разбит на девять участков (1—9). Определим индукцию и напряженность магнитного поля для каждого участка. Индукция

$$B_1 = \frac{\sigma \Phi_{\text{раб}}}{2S_1} = \frac{1,25 \Phi_{\text{раб}}}{2(1 \cdot 14 - 2 \cdot 0,5 \cdot 1,5) \cdot 10^{-4}} = \frac{1,25 \Phi_{\text{раб}}}{25 \cdot 10^{-4}},$$

где  $\sigma$  — коэффициент рассеяния;  $S_1$  — площадь сечения участка.

МДС на первом участке

$$F_1 = H_1 L_1 = H_1 \cdot 17,3 \cdot 10^{-2} = 0,173 H_1,$$

где  $H_1$  — напряженность для стали магнитопровода (находится по кривой намагничивания стали), А/см;  $L_1$  — длина магнитной силовой линии первого участка, см.

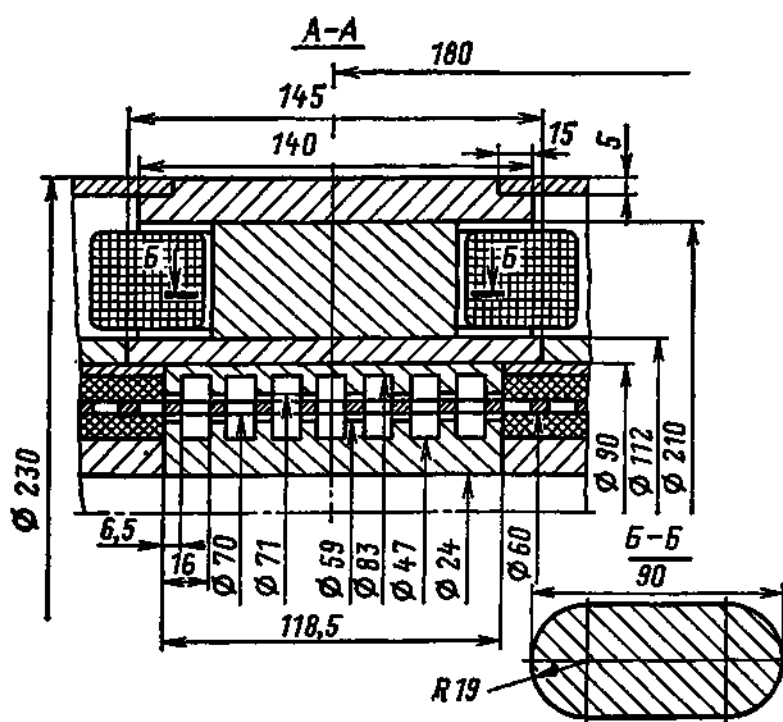


Рис. 10.3. Общий вид одной секции ЛШД

Аналогично определим  $B$  и  $F$  для остальных участков:

$$B_2 = \frac{\sigma \Phi_{\text{раб}}}{S_2} = \frac{1,25 \Phi_{\text{раб}}}{3,8 \cdot 5,2 + \pi \cdot 1,9^2 \cdot 10^{-4}} = \frac{1,25 \Phi_{\text{раб}}}{31 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_2 + 2H_2L_2 = 2H_2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-2} = 0,098H_2;$$

$$B_3 = \frac{\sigma \Phi_{\text{раб}}}{S_3} = \frac{1,25 \Phi_{\text{раб}}}{31 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_3 = 4H_3\delta_3 = 4(0,8B_3)\delta_3 = 4(0,8B_3 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,015 = 0,048B_3;$$

$$B_4 = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{S_4} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{80 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_4 = 2L_4H_4 = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}H_4 = 0,032H_4;$$

$$B_5 = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{S_5} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{(\pi \cdot 9 \cdot 70,6/360) \cdot 11,85 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{66 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_5 = 2H_5\delta_5 = 2(0,8B_5)\delta_5 = 2 \cdot 0,8B_5 \cdot 0,004 \cdot 10^{-2} = 6,4 \cdot 10^{-5}B_5;$$

$$B_6 = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{S_6} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{(\pi \cdot 7,5 \cdot 70,6/360) \cdot 8 \cdot 0,65 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{24 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_6 = 2L_6H_6 = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-2}H_6 = 0,012H_6;$$

$$B_7 = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{S_7} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{(\pi \cdot 6,75 \cdot 70,6/360) \cdot 8 \cdot 0,65 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{\text{раб}}}{21,6 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_7 = 2L_7H_7 = 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2}H_7 = 0,005H_7.$$

Рассмотрим распределение магнитного потока по параллельным участкам магнитной цепи (рис. 10.5). Магнитный поток  $\Phi_{\text{раб}}$  разделяется на два потока:

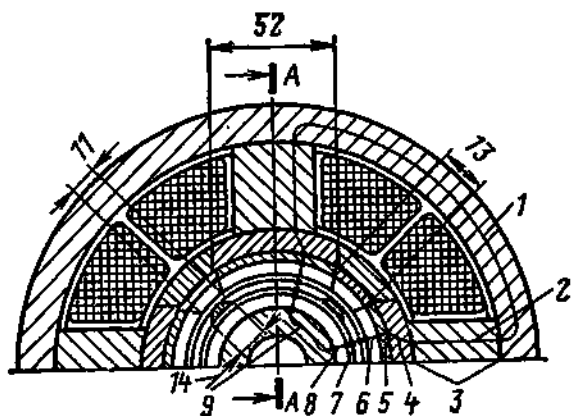


Рис. 10.4. Поперечный разрез секции ЛШД

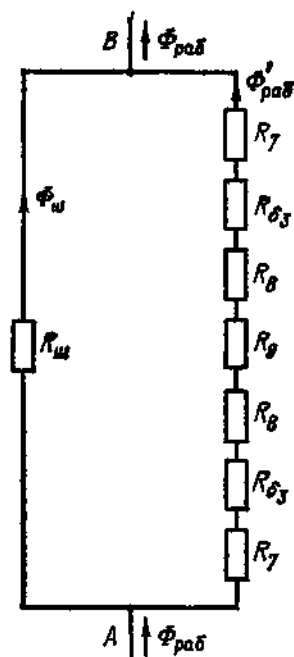


Рис. 10.5. Схема замещения для электромагнитного расчета

шунтирующий поток по якорю  $\Phi_{\text{ш}}$  и рабочий поток  $\Phi'_{\text{раб}}$ ;

$$B_{\text{ш}} = \frac{\Phi_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}} = \frac{\Phi_{\text{ш}}}{0,65 \cdot 0,5 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{\text{ш}}}{2,59 \cdot 10^{-4}} ;$$

$$F_{\text{ш}} = L_{\text{ш}} H_{\text{ш}} = \frac{\pi \cdot 6,5 \cdot 90 \cdot 10^{-2}}{360} = 0,051 H_{\text{ш}}.$$

Таблица 10.1. Параметры магнитного поля для шунтирующего потока

$\Phi_{\text{ш}} \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}$	1	1,5	2	2,5	3
$B_{\text{ш}} = \frac{\Phi_{\text{ш}}}{2,59 \cdot 10^{-4}}, \text{ Тл}$	0,386	0,579	0,772	0,965	1,158
$H_{\text{ш}}, \text{ А/м}$	355	514	780	1355	2190
$F_{\text{ш}}=0,05 H_{\text{ш}}, \text{ А}$	18,11	26,21	39,78	68,08	111,69

$\Phi_{\text{ш}} \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}$	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$B_{\text{ш}} = \frac{\Phi_{\text{ш}}}{2,59 \cdot 10^{-4}}, \text{ Тл}$	1,351	1,544	1,737	1,930	2,124	2,317
$H_{\text{ш}}, \text{ А/м}$	5800	13 550	22 000	30 300	38 400	47 700
$F_{\text{ш}}=0,05 H_{\text{ш}}, \text{ А}$	295,80	691,05	1122	1545,30	1958,40	2432,70

В табл. 10.1 даны параметры магнитного поля для шунтирующего потока при значении магнитной индукции  $\Phi_{ш} = (1 \div 6) \cdot 10^{-4}$  Вб.

Участок 7':

$$B_7' = \frac{\Phi_{раб}'}{S_7'} = \frac{\Phi_{раб}'}{3,85 \cdot 0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{раб}'}{20 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_7' = 2L_7'H_7' = 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} H_7' = 0,005 H_7';$$

Участок 8:

$$B_8 = \frac{\Phi_{раб}'}{S_8} = \frac{\Phi_{раб}'}{[(3,14 \cdot 5,1 \cdot 70,6)/360] \cdot 0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{раб}'}{33,4 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_8 = 2L_8 H_8 = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-2} H_8 = 0,012 H_8;$$

Участок 9:

$$B_9 = \frac{\Phi_{раб}'}{2S_9} = \frac{\Phi_{раб}'}{2 \cdot 1,15 \cdot 11,85 + 0,6 \cdot 0,65 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = \frac{\Phi_{раб}'}{33,4 \cdot 10^{-4}};$$

$$F_9 = L_9 H_9 = 3 \cdot 10^{-2} H_9 = 0,03 H_9.$$

Рассмотрим рабочий зазор. Удельная магнитная проводимость одного рабочего зазора при  $x=0$  по формулам гл. 8 будет

$$\begin{aligned} \lambda_{x=0} &= \frac{a}{\delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \left( 1 + \frac{\alpha c}{\delta} \right) = \\ &= \frac{6,5}{0,5} + \frac{2,3}{1,125} \lg \left( 1 + \frac{1,125 \cdot 9,5}{0,5} \right) = 15,75, \end{aligned}$$

$$\text{где } \alpha = \frac{\alpha_d + \alpha_q}{2} = \frac{1,22 + 1,03}{2} = 1,125.$$

Магнитная проводимость зазора

$$\Lambda_{x=0} = \mu_0 z b \lambda_{x=0} = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 8 (\pi \cdot 5,9 \cdot 70,6 \cdot 10^{-2} / 360) \cdot 15,75 = 5,73 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Суммарная МДС для участков второй параллельной цепи

$$F_{AB} = F_7' + F_8 + F_9 + 2\Phi_{раб}' / \Lambda_{x=0}.$$

Данные расчета для этой цепи приведены в табл. 10.2.

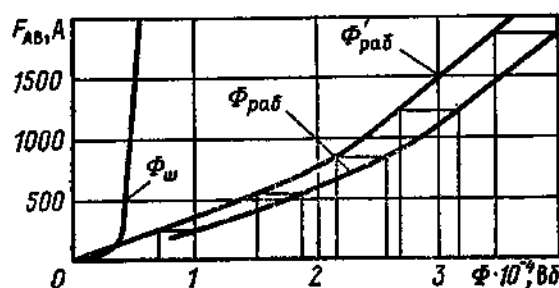


Рис. 10.6. Зависимости  $\Phi_{ш} = f(F_{AB})$ ,  $\Phi_{раб}' = f(F_{AB})$  и  $\Phi_{раб} = f(F_{AB})$

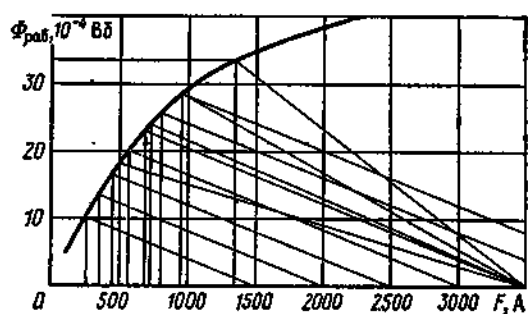


Рис. 10.7. Зависимость  $\Phi = f(F)$

Т а б л и ц а 10.2. Параметры магнитного поля для параллельной цепи

$\Phi'_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}$	1	5	10	15	20	25	30	35	40
$B_7 = \frac{\Phi'_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}}{20 \cdot 10^{-4}}, \text{ Тл}$	0,05	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
$H_7', \text{ А/м}$	80	247	446	756	1450	2920	12 300	22 600	33 500
$F_7' = 0,005 H_7', \text{ А}$	0,4	1,23	2,23	3,78	7,25	14,6	61,5	113	167,5
$B_8 = \frac{\Phi'_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}}{16,3 \cdot 10^{-4}}, \text{ Тл}$	0,06	0,307	0,613	0,92	1,23	1,54	1,84	2,15	2,46
$H_8, \text{ А/м}$	81	302	556	1155	2670	13 250	26 150	39 250	54 250
$F_8 = 0,012 H_8, \text{ А}$	0,96	3,62	6,67	13,86	32,04	159	313,8	471	651
$B_9 = \frac{\Phi'_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}}{33,4 \cdot 10^{-4}}, \text{ Тл}$	0,03	0,149	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20
$H_9, \text{ А/м}$	55	159	298	380	542	756	1115	1610	2450
$F_9 = 0,03 H_9, \text{ А}$	1,65	4,77	8,94	11,4	16,26	22,68	33,45	48,3	73,5
$2 \frac{\Phi'_{\text{раб}}}{\Lambda_{x=0}}, \text{ А}$	34,9	174,5	349	523,6	698,1	872,6	1047,1	1221,6	1396,2
$F_{\text{AB}}, \text{ А}$	37,92	183,83	366,8	552,6	753,6	1068,8	1455,8	1853,9	2288,2

Таблица 10.3. Определение МДС контура

№ участка	$\Phi_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}$	10	20	22	25	28	30	32	35	40
1	$B_1 = 1,25 \Phi_{\text{раб}} / 25, \text{ Тл}$ $H_1, \text{ А/м}$ $F_1 = 0,173 H_1, \text{ А}$	0,50 155 26,8	0,81 300 51,9	1,10 350 60,6	1,25 400 69,2	1,40 450 77,9	1,50 500 86,5	1,60 550 95,2	1,75 750 129,8	2,00 18,0 311,4
2	$B_2 = 1,25 \Phi_{\text{раб}} / 31, \text{ Тл}$ $H_2, \text{ А/м}$ $F_2 = 0,098 H_2, \text{ А}$	0,40 160 15,7	0,81 320 31,4	0,89 344 33,7	1,01 380 37,2	1,13 421 41,3	1,21 462 45,3	1,29 555 54,4	1,41 798 78,2	1,61 1940 190,1
3	$B_3 = 1,25 \Phi_{\text{раб}} / 31, \text{ Тл}$ $F_3 = 0,048 B_3 \cdot 10^{-4}, \text{ А}$	0,40 192,0	0,81 388,8	0,89 427,2	1,01 484,8	1,13 542,4	1,21 580,8	1,29 619,2	1,41 676,8	1,61 772,8
4	$B_4 = \Phi_{\text{раб}} / 80, \text{ Тл}$ $H_4, \text{ А/м}$ $F_4 = 0,032 H_4, \text{ А}$	0,13 137 4,4	0,25 247 7,9	0,28 271 8,7	0,31 306 9,8	0,35 326 10,4	0,38 346 11,1	0,40 370 11,8	0,44 378 12,1	0,50 446 14,3
5	$B_5 = \Phi_{\text{раб}} / 66, \text{ Тл}$ $F_5 = 0,0064 B_5 \cdot 10^4, \text{ А}$	0,15 9,7	0,30 19,4	0,33 21,3	0,38 24,3	0,42 27,1	0,46 29,1	0,49 31,0	0,53 33,9	0,61 38,8
6	$B_6 = \Phi_{\text{раб}} / 24, \text{ Тл}$ $H_6, \text{ А/м}$ $F_6 = 0,012 H_6, \text{ А}$	0,42 373 4,5	0,83 941 11,3	0,92 1160 13,9	1,04 1570 18,8	1,17 2230 26,8	1,25 2920 35,0	1,33 5180 62,2	1,46 10 100 121,0	1,67 17 500 210,0
7	$B_7 = \Phi_{\text{раб}} / 21,6, \text{ Тл}$ $H_7, \text{ А/м}$ $F_7 = 0,005 H_7, \text{ А}$	0,46 398 2,0	0,93 1172 5,9	1,02 1510 7,6	1,16 2190 11,0	1,30 3620 18,1	1,39 7350 36,8	1,48 11 000 55,0	1,62 16 700 83,5	1,85 26 650 133,3

Продолжение табл. 10.3

№ участка	$\Phi_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}, \text{Вб}$	10	20	22	25	28	30	32	35	40
7	$\Phi'_{\text{раб}} \cdot 10^{-4}, \text{Вб}$	6,7	16,1	17,9	20,9	23,6	25,5	27,3	30,1	34,6
7'	$B'_7 = \Phi'_{\text{раб}} / 20, \text{Тл}$	0,34	0,81	0,90	1,05	1,18	1,28	1,37	1,51	1,73
	$H'_7, \text{А/м}$	319	865	1100	1590	2270	3180	6150	12 250	21 500
	$F'_7 = 0,005 H'_7, \text{А}$	1,6	4,3	5,5	8,0	11,4	15,9	30,8	61,3	107,5
8	$B_8 = \Phi'_{\text{раб}} / 16,3, \text{Тл}$	0,41	1,00	1,10	1,28	1,45	1,56	1 67	1,85	2,12
	$H_8, \text{А/м}$	372	1395	1860	3230	9900	14 150	19 100	26 650	38 150
	$F_8 = 0,012 H_8, \text{А}$	4,5	16,7	22,3	38,8	118,8	169,8	229,2	319,8	457,8
9	$B_9 = \Phi'_{\text{раб}} / 33,4 \text{Тл}$	0,20	0,48	0,54	0,63	0,71	0,76	0,82	0,90	1,04
	$H_9, \text{А/м}$	207	425	475	570	687	768	892	1115	1570
	$F_9 = 0,03 H_9, \text{А}$	6,2	12,8	14,3	17,1	20,6	23,1	26,8	33,5	47,1
	$\Sigma F, \text{А}$	267,4	550,4	615,1	719,0	894,8	1033,4	1215,6	1549,9	2283,1



На основании данных табл. 10.1, 10.2 построим зависимости  $\Phi_{\text{ш}} = f(F_{\text{AB}})$ ,  $\Phi'_{\text{раб}} = f(F_{\text{AB}})$  и  $\Phi_{\text{раб}} = f(F_{\text{AB}})$ , показанные на рис. 10.6.

На основании полученных данных (табл. 10.3) с учетом зависимостей, приведенных на рис. 10.6, определим суммарную МДС магнитной цепи и построим зависимость  $\Phi = f(F)$ , показанную на рис. 10.7.

**Выбор магнитных нагрузок.** Рабочая точка в соответствии с рекомендациями [24] должна лежать на колене перегиба зависимости  $\Phi = f(F)$ . Выбираем в случае совпадения зубцов статора и якоря ( $x=0$ ) индукцию в рабочем зазоре  $B_{\delta 1} = 1,5$  Тл, тогда рабочий поток

$$\Phi_{\text{раб}} = B_{\delta 1} S_{\delta 1} = 1,5 \cdot 22,4 \cdot 10^{-4} = 33,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Рабочий поток во втором рабочем зазоре определяем по кривой (рис. 10.6)

$$\Phi'_{\text{раб}} = 28,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Определим проводимость рабочего зазора до разветвления магнитной цепи

$$\Lambda'_{x=0} = \mu_0 z b \lambda'_{x=0} = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 4,3 \cdot 10^{-2} \cdot 15,75 = 6,77 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Определение числа витков катушки. МДС в стали при потоке  $\Phi_{\text{раб}} = 33,6 \cdot 10^{-4}$  Вб находим по кривой (рис. 10.7)  $HI_{\text{ст}} = 1400$  А.

МДС в первом рабочем зазоре при потоке  $\Phi = 33,6 \cdot 10^{-4}$  Вб

$$HI_{\delta 1} = \frac{2\Phi_{\text{раб}}}{\Lambda'_{x=0}} = \frac{2 \cdot 33,6 \cdot 10^{-4}}{6,77 \cdot 10^{-6}} = 993 \text{ А.}$$

МДС во втором рабочем зазоре при потоке  $\Phi'_{\text{раб}} = 28,8 \cdot 10^{-4}$  Вб будет

$$HI_{\delta 2} = \frac{2\Phi'_{\text{раб}}}{\Lambda'_{x=0}} = \frac{2 \cdot 28,8 \cdot 10^{-4}}{5,73 \cdot 10^{-6}} = 1005 \text{ А.}$$

**Суммарная МДС**

$$F = HI_{\text{ст}} + HI_{\delta 1} + HI_{\delta 2} = 1400 + 993 + 1005 = 3398 \text{ А.}$$

Оптимальное сечение обмоточного провода определим из соотношения  $s = 2L_{\text{ср}}F/(\gamma_{\Theta} U)$ .

Удельная проводимость при температуре  $\Theta = 300^\circ\text{C}$ , соответствующей допустимой температуре нагрева провода (марки ПОЖ),

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma_{\Theta}} &= \frac{1}{\gamma_{20}} [1 + \alpha (\Theta - 20)] = \frac{1}{5600} [1 + 0,004 (300 - 20)] = \\ &= \frac{1}{2640} \text{ см}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2), \end{aligned}$$

где  $1/\gamma_{20} = 1/5600$  см/(Ом·мм<sup>2</sup>), — удельная проводимость при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент для меди;  $L_{\text{ср}} = 2 \cdot 5,2 + 2\pi \cdot 4,6/2 = 39,3$  см — средняя длина витка обмотки (см. рис. 10.3, 10.4);  $U = 30$  В — напряжение питания катушки.

С учетом этого  $s = 2 \cdot 39,3 \cdot 3398 / 2640 \cdot 30 = 3,37$  мм<sup>2</sup>.

Ближайшее сечение провода  $s = 3,46$  мм<sup>2</sup>;  $d/d_{\text{из}} = 2,1/2,48$  мм.

Действительная площадь катушки 1600 мм<sup>2</sup>.

Таблица 10.4. Определение  $P_{ст}=f(x)$

$x, \text{ мм}$	$\Lambda_x, \text{ Гн}$	$\lambda'$	$i\omega=3500 \text{ А}$	
			$I\omega_\delta, \text{ А}$	$P_{ст}, \text{ Н}$
0	1,560	0	2100	0
0,5	1,525	10,55	2120	510,1
1,0	1,465	13,74	2150	684,7
1,5	1,389	15,25	2200	791,7
2,0	1,305	16,08	2260	882,9
2,5	1,230	16,58	2310	951,6
3,0	1,150	16,87	2410	1054,6
3,5	1,063	17,00	2450	1098,7
4,0	0,983	17,00	2530	1167,4
4,5	0,915	16,85	2580	1216,4
5,0	0,815	16,56	2680	1278,2
5,5	0,732	16,20	2750	1319,4
6,0	0,656	15,76	2830	1353,8
6,5	0,580	14,41	2900	1299,8
7,0	0,530	8,76	2950	821,1
7,5	0,497	3,79	2990	363,9
8,0	0,480	0	3000	0

Требуемая площадь катушки

$$S_T = \frac{\omega_k \pi d_{из}^2}{4k_z} = \frac{260 \pi \cdot 2,48^2}{4 \cdot 0,8} = 1570 \text{ мм}^2,$$

где  $\omega_k=260$  — число витков катушки;  $k_z=0,8$  — коэффициент заполнения.

Ток управления (предварительно)

$$I = F/(2\omega_k) = 3398/(2 \cdot 260) = 6,53 \text{ А}.$$

Сопротивление катушек

$$r_{ср} = \frac{1}{\gamma_\Theta} \frac{4L_{ср}\omega_k}{s} = \frac{1}{2640} \frac{4 \cdot 39,3 \cdot 260}{3,46} = 4,47 \text{ Ом}.$$

Ток управления (окончательно)

$$I = U/r_{ср} = 30/4,47 = 6,71 \text{ А}.$$

Плотность тока

$$\Delta_i = I/s = 6,71/3,46 = 1,94 \text{ А/мм}^2.$$

Тогда МДС обмотки

$$F = 2\omega_k I = 2 \cdot 260 \cdot 6,71 = 3489,2 \approx 3500 \text{ А}.$$

Расчет статических характеристик. Статическое усилие одной секции ЛШД

$$P_{ст} = 5,1nm (I\omega_\delta/4) z (b/2) \mu_0 \lambda',$$

где  $n=4$  — число рабочих зазоров;  $m=4$  — число магнитных контуров.

Для построения статических характеристик используем кривую  $\Phi_{раб}=f(F)$  (см. рис. 10.6). Из точки на оси абсцисс, соответствующей полной МДС, проводим лучи под углом наклона  $\beta_i$  для каждого рассогласования зубцов  $\text{tg } \beta_i =$

Таблица 10.5. Определение  $P_{ст}=f(I\omega_8)$

$I\omega$ , А	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
$I\omega_8$ , А	820	1230	1640	2050	2450	2830	3190	3530
$P_{ст}$ , Н	113,8	256,0	455,2	712,2	1015,3	1353,8	1716,8	2109,2

$=\Lambda_x$ . Пересечение лучей с кривой дает распределение МДС в стали и рабочем зазоре;  $\Lambda$  и  $d\Lambda/dx$  определяются по формулам, приведенным в гл. 8.

Результаты вычислений приведены в табл. 10.4. По данным табл. 10.4 можно построить кривые  $\Lambda_x=f(x)$ ,  $d\Lambda/dx$  и  $P_{ст}=f(x)$ , аналогичные кривым, приведенным на рис. 8.35, 8.36.

Задаваясь значениями  $I\omega$  по кривой, показанной на рис. 10.6, находим  $I\omega_8$ . Результаты расчета приведены в табл. 10.5. По данным табл. 10.5 можно построить кривую, аналогичную кривой, приведенной на рис. 8.37.

В рассмотренном расчете магнитной системы часть магнитного потока шунтируется по якорю, что уменьшает усилие двигателя. Можно вварить в якорь продольные немагнитные вставки (см. рис. 8.35) и повторить расчет для этого варианта по приведенной методике. Усилие ЛШД возрастает в этом случае примерно на 25 %.

После исследований динамических и тепловых режимов ИМ СУЗ (см. гл. 7 и 8) в случае изменения параметров ИМ в приведенный выше расчет могут быть внесены коррективы, а при изменении геометрических размеров двигателя он должен быть выполнен повторно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Видеман Е., Келленбергер В. Конструкция электрических машин: Пер. с нем. Л.: Энергия, 1972. 520 с.
2. Воскобойников В. В., Кузнецов Г. В., Сігов Б. О. До розрахунку зубцевої зони крокових двигунів//Автоматика. 1968. № 4. С. 79—88.
3. Воскобойников В. В. Централизованное использование испытательного оборудования. М.: Машиностроение, 1979. 100 с.
4. Гидрогенераторы/И. А. Глебов, В. В. Домбровский, А. А. Дукштау и др. М.: Энергоиздат, 1982. 366 с.
5. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
6. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Масленок Б. А. Основы проектирования механизмов управления ядерных реакторов/Под ред. И. Я. Емельянова. М.: Атомиздат. 1978. 272 с.
7. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Линева А. Ф. Электромагнитные линейные приводы регулирующих стержней ядерных реакторов//Атомная техника за рубежом. 1975. № 5. С. 3—14.
8. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Линева А. Ф. Анализ надежности систем и механизмов управления ядерных реакторов//Атомная техника за рубежом. 1976. № 7. С. 3—15.
9. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Перфильев В. П. Автоматизация ядерных энергетических установок и дискретные приводы//Атомная энергия, 1972. Т. 33. Вып. 3. С. 735—739.
10. Емельянов И. Я., Гаврилов П. А., Селиверстов Б. Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. М.: Атомиздат, 1975. 280 с.
11. Емельянов И. Я., Ефанов А. И., Константинов Л. В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.
12. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Пушкин С. Н. Механизмы управления регулирующих стержней газоохлаждаемых реакторов с шаровыми твэлами//Атомная техника за рубежом. 1984. № 9. С. 3—11.
13. Ионайтис Р. Р., Стобецкий В. Н. Гидравлика СУЗ ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1972. 187 с.
14. Исполнительные механизмы органов управления и защиты для натриевых реакторов на быстрых нейтронах/Ф. М. Митенков, И. И. Жучков, Б. И. Зайцев, И. А. Подтележников/Под ред. Ф. М. Митенкова. М.: Атомиздат, 1980. 176 с.
15. Исполнительные механизмы и элементы автоматики сервоприводов ядерных реакторов/А. М. Бамдас, А. И. Леонтьев, Е. Г. Титов, А. И. Юрченко. М.: Атомиздат, 1971. 237 с.
16. Конструирование ядерных реакторов/И. Я. Емельянов, В. И. Михан, В. И. Солонин, Р. С. Демешев, Н. Ф. Рекшня. Под общ. ред. акад. Н. А. Доллежала. М.: Энергоиздат. 1982. 398 с.
17. Котов Ю. В., Кротов В. В., Филиппов Г. А. Оборудование атомных электростанций. М.: Машиностроение, 1982. 375 с.
18. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Высшая школа, 1980. 535 с.
19. Масленок Б. А., Воскобойников В. В. Типовые конструкции механизмов управления для энергетических реакторов с водой под давлением//Атомная техника за рубежом. 1973. № 12. С. 14—22.
20. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М.: Metallurgy, 1973. 321 с.

21. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М.: Металлургия, 1973. 102 с.

22. Правила ядерной безопасности атомных электростанций ПБЯ-04-74. М.: Атомиздат, 1976. 25 с.

23. Работа привода в нестационарных условиях/В. В. Воскобойников, И. Я. Емельянов, Н. С. Мироманова, Е. А. Старостин//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1979. Вып. 2 (6). С. 31—35.

24. Ротерс. Электромагнитные механизмы: Пер. с англ. М.—Л.: Гос. энерг. изд-во, 1949. 523 с.

25. Сигов Б. А. Цифровое программное управление. Киев: Гос. изд-во. техн. лит. УССР, 1962. 52 с.

26. Системы контроля эффективности регулирующих органов ядерных реакторов/И. Я. Емельянов, В. В. Воскобойников, В. В. Дельнов, А. Ф. Линева//Атомная техника за рубежом. 1979. № 3. С. 3—13.

27. Тозони О. В. Математические модели для расчета электрических и магнитных полей. Киев: Наукова думка, 1964. 272 с.

28. Трение, изнашивание и смазка. Кн. 2: Под ред. И. В. Крагельского. М.: Машиностроение, 1978. 358 с.

29. Усов П. П., Дроздов Ю. Н., Николашев Ю. В. Теоретическое исследование напряженного состояния пары вал—втулка с учетом износа//Машиноведение. 1979. № 2. С. 80—87.

30. Шуйский В. П. Расчет электрических машин: Пер. с англ. Л.: Энергия, 1968. 731 с.

31. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов/Ф. Я. Овчинников, Л. И. Голубев, В. Д. Добрынин и др. М.: Атомиздат, 1979. 288 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию . . . . .	3
<b>Глава первая. Физические основы регулирования ядерных реакторов</b>	<b>5</b>
1.1. Общие положения . . . . .	5
1.2. Цепная реакция деления ядер . . . . .	6
1.3. Структура систем управления и защиты активных зон ядерных реакторов . . . . .	11
<b>Глава вторая. Основные требования, предъявляемые к исполнительным механизмам СУЗ :</b>	<b>19</b>
2.1. Общие положения . . . . .	19
2.2. Эксплуатационные требования . . . . .	19
<b>Глава третья. Конструкции исполнительных механизмов СУЗ</b>	<b>26</b>
3.1. Общие положения . . . . .	26
3.2. Исполнительные механизмы СУЗ для энергетических реакторов	26
3.3. Исполнительные механизмы СУЗ для исследовательских реакторов . . . . .	59
3.4. Исполнительные механизмы СУЗ судовых ядерных реакторов .	73
3.5. Основные структурные элементы исполнительных механизмов СУЗ . . . . .	78
<b>Глава четвертая. Электродвигатели исполнительных механизмов СУЗ</b>	<b>80</b>
4.1. Общие положения . . . . .	80
4.2. Выбор электродвигателей общепромышленного назначения .	81
4.3. Специальные электродвигатели . . . . .	84
4.4. Параметры и характеристики шаговых электродвигателей . .	93
4.5. Определение магнитной проводимости рабочего зазора шагового двигателя и ее производной . . . . .	95
4.6. Управление шаговыми электродвигателями . . . . .	97
<b>Глава пятая. Средства измерения положения регулирующих органов</b>	<b>100</b>
5.1. Общие положения . . . . .	100
5.2. Системы индикации с датчиками угловых перемещений . .	101
5.3. Системы индикации с датчиками линейных перемещений . .	103
<b>Глава шестая. Удерживающие, ускоряющие устройства и преобразователи движения</b>	<b>107</b>
6.1. Ускоряющие устройства . . . . .	107
6.2. Удерживающие устройства . . . . .	108
6.3. Тормозные устройства . . . . .	112
6.4. Преобразователи движения типа винт—гайка . . . . .	116
<b>Глава седьмая. Динамика исполнительных механизмов СУЗ</b>	<b>122</b>
7.1. Общие положения . . . . .	122
7.2. Общее уравнение движения исполнительного механизма СУЗ .	123
7.3. Интегрирование общего уравнения движения . . . . .	127
7.4. Движение подвижной части привода при аварийном срабатывании . . . . .	128
	<b>229</b>

7.5. Учет ударных нагрузок . . . . .	132
7.6. Динамические нагрузки в исполнительных механизмах СУЗ при колебаниях . . . . .	134
7.7. Система уравнений неустойчившегося движения регулирующего органа и жидкости в контуре . . . . .	135
7.8. Динамические режимы работы исполнительных механизмов СУЗ с линейными шаговыми электродвигателями . . . . .	138
<b>Глава восьмая. Расчет и конструирование линейных электромагнитных исполнительных механизмов СУЗ . . . . .</b>	<b>152</b>
8.1. Технические предпосылки создания нового класса исполнительных механизмов СУЗ с линейным электромагнитным приводом . . . . .	152
8.2. Конструкция линейного дискретного электромагнитного механизма СУЗ . . . . .	155
8.3. Магнитные системы линейных электромагнитных исполнительных механизмов СУЗ . . . . .	157
8.4. Расчет магнитных полей и основных параметров линейного шагового электродвигателя . . . . .	165
8.5. Оптимизация геометрии зубцовой зоны и расчет статических характеристик ЛШД . . . . .	179
8.6. Некоторые вопросы оптимизации магнитной системы . . . . .	182
8.7. Тепловые режимы исполнительных механизмов СУЗ . . . . .	184
8.8. Подшипниковые узлы исполнительных механизмов СУЗ . . . . .	193
8.9. Общая методика расчета исполнительных механизмов СУЗ с линейными шаговыми электродвигателями . . . . .	200
<b>Глава девятая. Современные тенденции в развитии и совершенствовании исполнительных механизмов СУЗ . . . . .</b>	<b>206</b>
<b>Глава десятая. Примеры расчета исполнительных механизмов СУЗ . . . . .</b>	<b>212</b>
10.1. Общие положения . . . . .	212
10.2. Расчет электромеханического исполнительного механизма СУЗ . . . . .	212
10.3. Расчет линейного электромагнитного механизма СУЗ для ядерного реактора АЭС . . . . .	216
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>227</b>

**ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ**

*Иван Яковлевич Емельянов*

*Вячеслав Васильевич Воскобойников*

*Борис Аркадьевич Масленок*

**Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов**

Редактор *А. Ф. Линева*

Редактор издательства *Л. Д. Никулина*

Переплет художника *С. А. Киреева*

Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*

Технический редактор *О. Д. Кузнецова*

Корректор *Л. С. Тимохова*

**ИБ № 959**

Сдано в набор 28.07.86 Подписано в печать 20.01.87 Т-03540 Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная № 1 Гарнитура литературная Печать высокая. Усл. печ. л. 14,5 Усл. кр.-отт. 14,5 Уч.-изд. л. 15,56 Тираж 1700 экз. Заказ 1555. Цена 1 р. 10 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.



**СКАН И ОБРАБОТКУ ВЫПОЛНИЛ OLEG-1955**