

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Прогресс в развитии ядерных энергетических установок и повышение их экономичности связаны с увеличением единичной мощности, что обеспечивается повышением энергонапряженности активных зон ядерных реакторов и приближает параметры эксплуатации элементов тепловыделяющих сборок (ТВС) к предельным значениям [1-3]. При этом увеличиваются размеры активных зон, что требует выравнивания энерговыделения или плотности нейтронного потока по всему их объему. Значительно возрастает интенсивность ионизирующих излучений и повышаются параметры теплоносителя — температура, расход, давление, что приводит к работе элементов первого контура энергоблока АЭС в близких к экстремальным условиям. Характерной особенностью динамики реакторных установок является неустойчивость распределения энерговыделения в активной зоне [1]. В зависимости от конкретных физических, термодинамических и геометрических характеристик реактора форма и время развития неустойчивости распределения энерговыделения могут меняться в широких пределах. 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. Это требует нового подхода к формированию и построению систем управления и защиты (СУЗ) ядерных реакторов, которые могли бы эффективно решать задачи оптимизации энерговыделения в активных зонах для повышения экономичности и обеспечения безопасной эксплуатации реакторных установок. Важнейшим элементом СУЗ реактора является автоматизированный электропривод регулирующих органов (РО) [2, 3].

Целью данной статьи является рассмотрение автоматизированного электропривода СУЗ ядерных реакторов ВВЭР-1000 и проблем его математического моделирования на основе анализа особенностей привода СУЗ и существующих конструктивных решений для последующей оптимизации показателей качества электропривода.

Важнейшими особенностями СУЗ реактора являются большое число контролируемых технологических параметров и параметров, контролируемых датчиками плотности потока нейтронов системы контроля энергораспределения 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, проектирование которых тесно связано с проектированием реакторной установки.

Исполнительные механизмы (ИМ) ядерных реакторов должны удовлетворять специфическим требованиям эксплуатации, а также конструктивно-технологическим и экономическим требованиям [1-3]. К эксплуатационным требованиям относятся качество выполнения основных функций в СУЗ реактора, обеспечение ядерной безопасности реактора, надежность, простота обслуживания, ремонтпригодность, габаритные размеры и масса. В процессе эксплуатации ИМ должен надежно обеспечивать требуемую скорость перемещения РО или диапазон скоростей, управление положением РО, контроль положения РО и аварийное срабатывание РО.

Создание ИМ для реакторных установок потребовало обеспечения выполнения следующих требований: универсальности ИМ, выполняющих в системе управления реактором функции автоматического регулирования, компенсации реактивности, аварийной защиты, а при необходимости и функции локальных регуляторов плотности нейтронного потока по высоте активной зоны; высокого быстродействия; 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; 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; устойчивой работы и аварийного срабатывания при воздействии возмущающих нагрузок; высокой надежности. Выполнение этих требований обусловило проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по апробации различных конструктивных решений, в результате которых создан дискретный ИМ с герметичным линейным двигателем для реактора ВВЭР-1000, что позволило создать дискретные системы управления и блоки управления силовыми шаговыми электродвигателями [2, 3]. 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.

Большинство ядерных реакторов регулируется путем перемещения в активной зоне регулирующих органов СУЗ различной конфигурации, совершающих возвратно-поступательное движение [3]. Эти регулирующие органы СУЗ, как правило, находятся в среде теплоносителя при высоких температуре и давлении. С учетом этих условий целесообразно создание приводов для перемещения регулирующих органов с использованием сил электромагнитного поля. Такие приводы могут быть созданы на основе линейных электрических машин. Они имеют значительные преимущества перед другими видами приводов: 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.

При реализации этого направления создан линейный электромагнитный дискретный ИМ СУЗ на основе линейного шагового электродвигателя (ЛШД), который представляет собой четырехфазную электрическую машину с пассивным якорем трубчатой формы [2]. Магнитный поток замыкается через внутренний сердечник и наружный магнитопровод двигателя. В режиме фиксированного удержания РО 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.

Схема управления ЛШД включает формирователь импульсов, распределитель и усилитель [2]. При коммутации в определенной последовательности от тиристорного преобразователя обмоток 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, укрепленного 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. 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 дискретного перемещения РО шагами 4 мм. Рабочий ход якоря определяется высотой активной зоны реактора и составляет 3,5 м. По сигналу аварийной защиты (АЗ) питание двигателя отключается и РО под действием силы тяжести вводится в активную зону реактора. Время сброса РО по сигналу АЗ с полной высоты — 3-4 с.

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, относительная простота схемы управления, электрическое (частотное) регулирование скорости перемещения РО, возможность синхронного перемещения ряда РО или их групп без дополнительных устройств синхронизации, отсутствие в приводе механических передач, поскольку связь якоря со статором осуществляется только силами электромагнитного поля, создаваемого обмотками управления. 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 с обесточиванием обмоток двигателя, что подтверждено эксплуатацией таких механизмов на V блоке Нововоронежской АЭС.

Особую сложность представляет математическое моделирование динамические режимов работы исполнительных механизмов СУЗ с ЛШД. Приводы СУЗ ядерных энергетических установок размещаются на патрубках каналов СУЗ 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 кг, 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. Сброс 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.

Схема управления ЛШД на тиристорах с форсированными режимами коммутации обеспечивает выполнение двух основных режимов. При тормозном режиме сигнал магнитного усилителя с постоянным подмагничивани-

ем обеспечивает заданный угол насыщения. При форсированном режиме с подачей очередного импульса управления поступает сигнал постоянного тока от элемента выдержки времени и обеспечивается полное открытие тиристоров.

При моделировании ЛШД приняты следующие допущения. Действием вторичных паразитных контуров можно пренебречь в силу монолитности статора. Фазные обмотки не действуют друг на друга, в потокосцеплении учитываются только индуктивность обмотки, которая складывается из постоянной и переменной составляющих, обусловленных изменением магнитного потока статор-якорь. Электромагнитные процессы в стали происходят линейно без насыщения.

Каждый шаг, обрабатываемый 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. 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 [2]. Создать точную математическую модель сложной электромеханической системы, которой является привод с ЛШД без определенных допущений весьма трудно. Поэтому за основу приближенной математической модели приняты уравнения равновесия в электромагнитных и механических звеньях.

В процессе математического моделирования ЛШД получены следующие результаты [2]. 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 проведены исследования влияния амплитуды и длительности форсирующих импульсов на характер перемещения подвижной системы.

Математическая модель ЛШД также позволяет исследовать динамические режимы работы исполнительного механизма СУЗ с ЛШД при воздействии возмущающих нагрузок [2]. 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, обрабатываемых ЛШД. Влияние этих внешних воздействий должно учитываться в основном при разработке исполнительных механизмов СУЗ для реакторов, эксплуатируемых в сейсмически опасных зонах. 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. 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.

Ядерные реакторы АЭС типа ВВЭР-1000, оснащенные механизмами СУЗ с ЛШД, эксплуатируются в сейсмически опасных зонах, поэтому возникает задача проверки их работоспособности при воздействии возмущающих сейсмических нагрузок [2-3]. 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, что соответствует расчетной сейсмичности 9 баллов по шкале Рихтера. В связи с этим целесообразно 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 сейсмических нагрузок (переход от динамического режима работы к статическому). Результаты расчета привода в режиме статики показывают, что привод выдерживает внешние нагрузки до 5g с периодом до 0,5 с. Смещение при этом незначительное. В динамике смещение якоря зависит от направления удара. При положительном направлении смещение якоря незначительное, при отрицательном направлении удара 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.

Математическая модель ЛШД также позволяет проводить оптимизацию динамических режимов исполнительного механизма СУЗ с линейным шаговым электродвигателем [2]. 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, при которых целевая функция при определенных ограничениях имеет оптимальное значение. Для решения этой задачи разработана программа для ЭВМ, рассчитывающая параметры привода, наиболее точно отвечающие поставленной задаче. Задача оптимизации функции многих переменных обычно сводится к решению систем уравнений в некоторых областях [4-10]. При этом предполагается, что функция унимодальна, т. е. дифференцируемая во внутренней точке области по всем переменным. Тогда оптимум этой функции будет соответствовать точке, где частные производные по всем переменным равны нулю.

Метод конфигураций был выбран для решения задачи определения оптимума целевой функции при расчетах динамических характеристик ИМ с линейным шаговым электродвигателем как наиболее быстрый [4]. Поскольку процесс перехода якоря с одного установившегося положения на другое сопровождается переходным процессом, был использован разработанный в теории автоматического регулирования метод интегральной оценки [11]. Оптимизация велась только по следующим параметрам: максимальное статическое усилие двигателя, постоянные времени катушек, амплитуда и время форсировки. Остальные параметры, которые по технологии И.М. Гельфанда являются «несущественными», приняты постоянными.

Сравнение оптимизации по пяти параметрам с шаговой оптимизацией по одному показало, что оптимизационные расчеты следует вести последовательно, внося улучшающие изменения по одному [2]. Для проверки этой гипотезы были проведены соответствующие расчеты. Результат оптимизации по каждому параметру вносился в массив исходных параметров оптимизации, и дальнейшая оптимизация по нему запрещалась.

Дальнейшее развитие математического моделирования и оптимизации ЛШД целесообразно проводить в направлении развития показателей качества привода и применении их векторной оптимизации [11-14] с использованием математической системы MATLAB [15].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Рассмотрен автоматизированный электропривод СУЗ ядерных реакторов ВВЭР-1000. На основе анализа особенностей привода СУЗ и существующих конструктивных решений проведен анализ проблем математического моделирования электропривода. Рассмотрены преимущества исполнительных механизмов СУЗ, построенных на базе четырехфазных ЛШД. Представлены обобщенные результаты математического моделирования ЛШД. Указаны перспективы развития математического моделирования и оптимизации ЛШД.

Список литературы

1. Емельянов И. Я., Ефанов А. И., Константинов Л. В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. М.: Энергониздат, 1981. 360 с.
2. Емельянов И. Я., Воскобойников В. В., Масленок Б. А. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 232 с.
3. Приводы СУЗ реакторов ВВЭР для атомных электростанций / В. П. Никитюк, А. Г. Казахмедов, А. С. Ваулин и др. М.: ИКЦ Академкнига, 2004. 325 с.
4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.
5. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. Кн. 1. М.: Мир, 1986. 352 с.
6. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988. 128 с.
7. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 512 с.
8. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, ГРФМЛ, 1990. 488 с.
9. Пантелеев А. В., Летова Т. А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2002. 544 с.
10. Струченков В. И. Методы оптимизации. Основы теории, задачи, обучающие программы: Учебное пособие. М.: Экзамен, 2005. 256 с.
11. Северин В. П. Векторная оптимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 2. С. 52-61.
12. Северин В. П. Векторная оптимизация динамических показателей качества электрогидравлического следящего привода // Вестник НТУ «ХПИ» «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков: НТУ «ХПИ». 2002. № 12. Т. 2. С. 451-454.
13. Северин В. П., Черная В. Ф., Никулина Е. Н. Методика вычисления времени установления процесса регулирования в динамических системах высокого порядка // Вестник НТУ «ХПИ» «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков: НТУ «ХПИ». 2003. № 10. Т. 2. С. 388-391.
14. Северин В. П. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 / НТУ «ХПИ». Харків, 2007. 35 с.
15. Дьяконов В. MATLAB 6: учебный курс. СПб.: Питер, 2001. 592 с.