

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.311

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

Поляков А.М., Субботин П.В. (НИУ «МЭИ», г. Москва),

Федоровский А.Ю., Ходаковский В.В. (ИТЦП «Прорыв», г. Москва)

e-mail: poliakovam@mpei.ru

Жизненный цикл АЭС состоит из нескольких этапов. На каждом этапе к АЭС предъявляются повышенные требования надежности, безопасности и живучести. На этапе проектирования по мере развития компьютерных технологий все большее применение находят программные и/или программно-технические комплексы для проверки проектных решений [1]. Этап эксплуатации может определять показатели работы АЭС даже в большей мере, чем этап проектирования. Повышению качества и культуры эксплуатации способствуют технологические программные и/или полномасштабные тренажеры, предназначенные для первоначальной подготовки, переподготовки и поддержания квалификации оперативного персонала [2, 3]. Основу указанных программных средств составляют математические модели разных систем АЭС, обеспечивающие расчет нормальных и аварийных режимов в установившихся и переходных процессах.

Наибольшее внимание уделяется безопасности технологического цикла АЭС. Однако в итоге выдача мощности в энергосистему и обеспечение электроэнергией потребителей собственных нужд зависит от электрической части АЭС. Поэтому в интегральную модель энергоблока АЭС должны входить модели электрических систем, позволяющие учитывать влияние процессов в электрической части на технологический цикл.

Основным оборудованием сопряжения технологической и электрической части в интегральных моделях являются вращающиеся электрические машины. В системе собственных нужд АЭС нашел применение электропривод насосов на базе асинхронных двигателей, реализации которого в отечественном программном комплексе ПК-SimInTech посвящена настоящая статья.

Математическая модель электропривода.
Разработанная модель асинхронного нерегулируемо-

го электропривода содержит выключатель с системой управления, комплект токовой релейной защиты и асинхронный двигатель. При проверке проектных решений и в тренажерах необходимо моделировать разные виды отказов электропривода: отказ системы управления, проскальзывание или заклинивание вала, воздействие со стороны питающей сети, обусловленное коротким замыканием, отключением питания и др. При моделировании проскальзывания вала механизма, соединенного с двигателем, решаются два уравнения движения — для отдельного определения частоты вращения двигателя и вала механизма:

$$\begin{aligned}(T_{j\text{дв}} + k_1 T_{j\text{мех}}) d\omega_{\text{дв}}/dt &= M_{\text{дв}} - k_1 M_{\text{мех}}, \\ (k_2 T_{j\text{дв}} + T_{j\text{мех}}) d\omega_{\text{мех}}/dt &= k_2 M_{\text{дв}} - M_{\text{мех}},\end{aligned}$$

где $T_{j\text{дв}}$, $M_{\text{дв}}$, $\omega_{\text{дв}}$ — постоянная времени инерции, электромагнитный момент и частота вращения двигателя соответственно; $T_{j\text{мех}}$, $M_{\text{мех}}$, $\omega_{\text{мех}}$ — постоянная времени инерции, момент сопротивления и частота вращения вала механизма соответственно; $k_1 = (1 - \chi)^{0,5}$, $k_2 = \omega_{\text{дв}} (1 - \chi)^{0,5} / \omega_{\text{мех}}$ — коэффициенты уравнений, определяются жесткостью отказа χ : при жесткости, равной нулю, нет отказа, равной 1, — обрыв вала, промежуточные значения примерно соответствуют частоте вращения вала механизма.

Для имитации отказа «заклинивание» в уравнение движения вводится момент механизма, в 10 раз превышающий номинальный момент. Кавитация имитируется наложением шума с размахом от $-0,25$ до $0,25$ на электромагнитный момент двигателя (в долях номинального момента). Задавая жесткость отказа, можно воздействовать на размах шума. Если необходимо учитывать только электромеханические переходные процессы, то двигатель представляется в виде обычной г-образной схемы замещения, состоящей из активно-индуктивных сопротивлений. Для учета вытеснения тока в обмотке ротора его сопро-

тивление изменяется в зависимости от частоты [4]. Параметры схемы замещения двигателя вычисляются по каталожным данным.

При значительной мощности двигателя и/или высокой инерции часто необходимо учитывать изменение периодической составляющей тока или напряжения, например, в процессе подпитки двигателем тока короткого замыкания, ресинхронизации при переходе на резервное питание или отключения от сети [5]. В этом случае уравнение статора можно записать в комплексной форме для установившегося режима, процесс в роторе будет описываться дифференциальным уравнением [6].

Таким образом, упрощенные уравнения для асинхронного двигателя будут иметь следующий вид:

$$U_{ст} = -r_{ст} I_{дв} - j\chi''_{дв} I_{дв} + E''_{дв};$$

$$-T_{r0} d\Psi_r/dt = \Psi_r + \chi_m I_s,$$

где $U_{ст}$ — напряжение статора; $r_{ст}$ — активное сопротивление статора; $I_{дв}$ — ток статора; $E''_{дв}$, $\chi''_{дв}$ — сверхпереходные электродвижущая сила и сопротивление двигателя соответственно; T_{r0} — постоянная времени ротора при разомкнутом статоре; Ψ_r — потокосцепление ротора; χ_m — сопротивление намагничивания; I_s — ток статора в преобразованных координатах.

В этом случае двигатель представляется схемой замещения, состоящей из управляемой электродвижущей силы, которая рассчитывается по приведенным уравнениям, и активно-индуктивным сопротивлением. Постоянная времени ротора зависит от частоты тока в его обмотке.

Применение математической модели электропривода в составе интегральной модели энергоблока БРЕСТ-ОД-300. Разные физическая природа и темп переходных процессов в теплогидравлической и электрической системах обуславливают расчет соответствующих моделей в отдельных задачах (проектах), использующих разные вычислительные потоки, численные методы и графические средства описания моделей. Синхронизация и обмен данными между задачами осуществляют через базу данных, обеспечивающую пользователю возможность создавать информационные структуры с необходимыми переменными и константами.

Основные механизмы с электроприводом — насосы — моделируются в составе теплогидравлической модели, где рассчитываются расход и момент сопротивления, и представлены источником напора и тепловой мощности [7]. Напор учитывается в уравнении количества движения, тепловая мощность — в уравнении энергии. В качестве исходных данных для насоса задаются напор и коэффициент полезного действия в виде двумерных таблиц от аргументов

«обороты насоса» и «расход через насос». Электропривод моделируется в составе модели электрических систем, где определяются электрические параметры электропривода и частота вращения. Момент сопротивления насоса и частота вращения электропривода являются переменными базы данных.

Модель электроснабжения собственных нужд энергоблока БРЕСТ-ОД-300 состоит из рабочего трансформатора, подключенного к блочному трансформатору, который питает четыре секции напряжением 6 кВ нормальной эксплуатации, секции надежной эксплуатации и аварийного электроснабжения с установленными на них дизель-генераторами. Электроснабжение секций резервного питания, обеспечивается резервным трансформатором собственных нужд, подключенным к распределительному устройству 110 кВ. На секциях 6 кВ подключены все мощные электроприводы, которые оказывают значительное токовое воздействие на сопряженное оборудование (трансформаторы собственных нужд, дизель-генераторы и др.).

В качестве примера на рис. 1 показан фрагмент теплогидравлической модели энергоблока БРЕСТ-ОД-300, включающий питательные насосы первой ступени, на рис. 2 — фрагмент модели системы электроснабжения одного из этих же питательных насосов (LAC12AP001).

Алгоритмы защиты и блокировок, действующих на электродвигатель насоса, содержатся в составе модели системы управления, блок управления выключателем с привязкой к питанию управления и сигнализации — в составе модели исполнительных механизмов.

Испытания модели электрических систем в составе интегральной модели энергоблока проводили на установившихся режимах для определения соответствия расчетных параметров и каталожных данных электрооборудования и обеспечения баланса

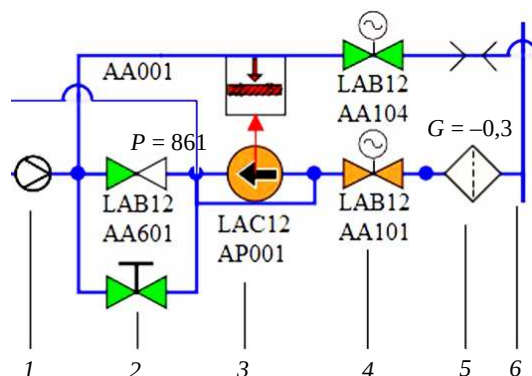
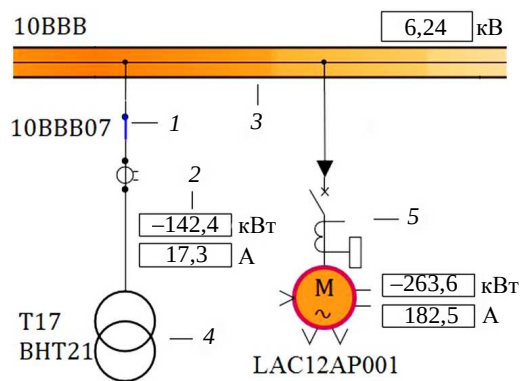


Рис. 1. Фрагмент теплогидравлической модели системы питательных насосов: 1 — расходомерная шайба; 2 — обратный клапан; 3 — насос; 4 — задвижка; 5 — фильтр; 6 — трубопровод



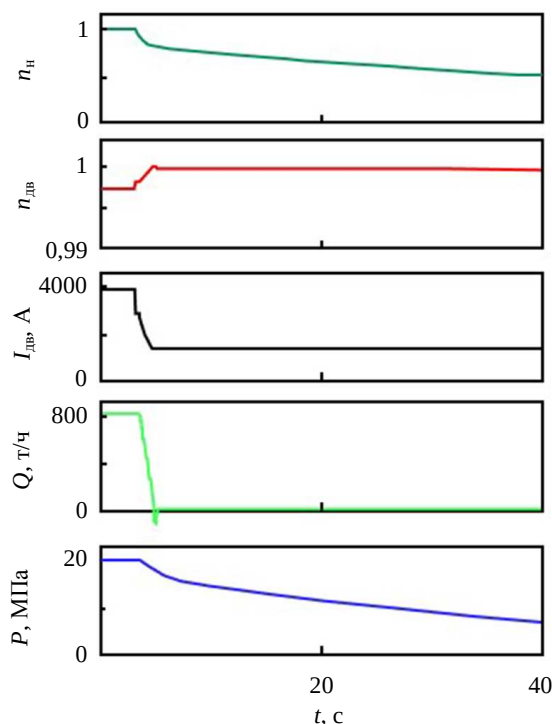
Р и с. 2. Фрагмент электрической модели системы электропитания собственных нужд: 1 — измерительный прибор; 2 — выключатель; 3 — секция собственных нужд; 4 — силовой трансформатор; 5 — электропривод

мощностей в электрической сети. Также определялась устойчивость расчета модели при шаге интегрирования 0,05 с. Переходные процессы при коротком замыкании моделировались для определения соответствия расчетных параметров и проектных токов короткого замыкания, проверки работы алгоритмов релейной защиты и автоматики. При данных режимах отклонение расчетных электрических параметров от проектных не превысило 2—10%. При этом наибольшие отклонения зафиксированы при расчете переходных процессов — изменении токов от электропривода, что обусловлено более точной моделью электропривода.

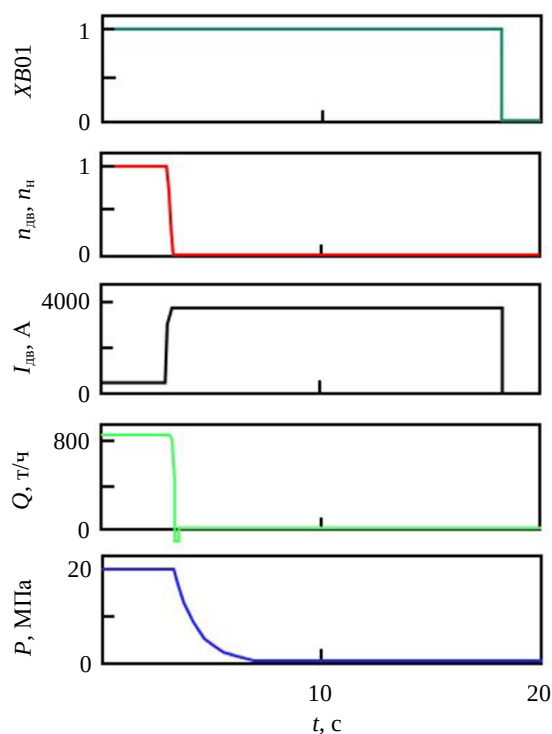
Примеры расчета режимов электропривода при разных видах отказов. В качестве исходного принималось номинальное состояние энергоблока. Отказы вводили на одном из трех работающих параллельно питательных электронасосов LAC12AP001.

Как видно на рис. 3, после ввода отказа на 3-й с относительная частота вращения насоса n_n постепенно уменьшается до 0,5. Относительная частота вращения двигателя $n_{дв}$ стремится к 1. Расход через насос Q снижается до 0 (насос перекачивается двумя оставшимися), потребляемый ток двигателя $I_{дв}$ и давление P на напоре насоса снижаются. Кратковременный отрицательный расход обусловлен конечным временем закрытия обратного клапана на напоре насоса.

На рис. 4 видно, что после ввода отказа на 3-й с относительная частота вращения насоса n_n и двигателя $n_{дв}$, а также расход через насос Q за ~0,2 с снижаются до 0, ток $I_{дв}$ возрастает до пускового (5—6-кратного номинального тока в зависимости от напряжения на секции). Через некоторое время, задаваемое уставкой, после заклинивания насос отключается токовой защитой от перегрузки (состояние выключателя — сигнал XB01 — изменяется с 1 — включен на 0 — отключен).



Р и с. 3. Параметры насоса при отказе «проскальзывание» с жесткостью 0,5



Р и с. 4. Параметры насоса при отказе «заклинивание»

Вывод. Таким образом, уточненная модель электропривода в интегральной модели блока АЭС позволяет обосновать принятые проектные решения в части электротехнического оборудования (защита насосов, токовый режим трансформатора, режим дизель-генераторов при ступенчатом пуске). Математические модели теплогидравлических, элект-

рических систем и систем управления энергоблоков АЭС могут быть реализованы в ПК-SimInTech. Примером такой реализации являются математические модели 2-го контура и электрических систем энергоблока БРЕСТ-ОД-300.

Интегральную математическую модель энергоблока БРЕСТ-ОД-300 можно использовать для проверки проектных решений и расчетного модуля программной части тренажера на этапе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Obraztsov E.P., Belikov A.N., Menshikov N.N., Popkov E.N.** Electrical calculation code RELECS in CSS «VEB» for NPP designs. — In: Intern. Congress on Advances in Nuclear Power Plants ICAPP, 2016, p. 1131—1140.
2. **Магид С.И., Архипова Е.Н., Куличихин В.В.** Актуальные вопросы развития тренажеростроения современной электроэнергетики. — Надежность и безопасность энергетики, 2015, № 4, с. 20—34.

3. **Поляков А.М., Субботин П.В.** Комплекс виртуальных лабораторных работ по дисциплине «эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций». Тезисы докл. 21-й Межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 2015, т. 3 с. 172.
4. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Под ред. Л.Г. Мамиконянца. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
5. **Фельдман М.Л., Черновец А.К.** Особенности электрической части атомных электростанций. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. 172 с.
6. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. ГОУВПО «ИГЭУ», Иваново, 2008. 298 с.
7. **Кавун О.Ю., Куно М.Я., Фейман В.Г.** Программа TRP для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей. — В сб.: Нейтроника-97. Обнинск, 1998, с. 111—118.

Поступило в Редакцию 22.03.18

УДК 539.1

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЭНЕРГИЕЙ 8,5 МэВ

*Рывкин Б.Н. (ООО «РусАтомЭкспертиза», г. Москва), Скачков Е.В.
e-mail: evg-skachkov@yandex.ru*

Для эффективного использования тормозного излучения ускорителей электронов важно знать его пространственно-энергетическое распределение (угловое распределение). Теория удовлетворительно совпадает с экспериментом только при толщине мишени 0,01 радиационной длины, на практике применяют мишени толщиной от 1 до 5 и больше [1]. Поэтому основные результаты получены экспериментально или математическим моделированием. Предложены полуэмпирические выражения путем введения разных поправок в теоретический спектр Шиффа [2]. Угловое распределение тормозного излучения зависит от энергии электронов, их энергетического и углового распределения, размера пучка электронов, материала и толщины мишени, материала и толщины выходного окна ускорителя, конструкции мишенного узла.

Измерение углового распределения является сложной технической задачей: ускорители, как правило, импульсные, длительность импульса составляет не более десятков микросекунд, интенсивность излучения высокая. Прямое измерение под разным углом требует быстродействующих спектрометров. Поэтому

в большинстве исследований измеряют мощность дозы тормозного излучения или активируют вещества с известным сечением активации (активационные детекторы), т.е. в действительности измеряют не угловое распределение, а некоторую функцию от него. В первом случае — это мощность дозы, во втором — выход реакции — интеграл (или сумма по активационным уровням) произведения углового распределения при данном угле на сечение активации. Для восстановления углового распределения необходимо знать зависимость мощности дозы моноэнергетических γ -квантов или зависимость сечения активации и иметь набор активационных детекторов с разной зависимостью сечения от энергии [3, 4]. Эти сведения или неизвестны, или известны с большой погрешностью. Для практического применения тормозного излучения важно знание пространственного распределения мощности дозы (облучение продукции, онкологических больных) или пространственного распределения выхода активации (активационный анализ).

Целью настоящего исследования является получение исходного углового распределения тормозного