

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф., проф. НТУ «ХПИ»;
Е. Н. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, доц., доц. НТУ «ХПИ»;
Д. А. ЛЮТЕНКО, магистрант НТУ «ХПИ»;
Е. Ю. БОБУХ, магистрант НТУ «ХПИ»

ПРОБЛЕМА МАНЕВРЕННОСТИ ЭНЕРГОбЛОКА АЭС И РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ ЕГО СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Проанализирована проблема маневренности энергоблоков АЭС. Приведена модель энергоблока ВВЭР-1000 для анализа переходных процессов. Переходные процессы изменения состояния энергоблока не противоречат возможности его работы в маневренных режимах. Многозонная модель реактора использована для исследования комбинированного метода управления. Отмечены недостатки методов управления энергоблоком для развития его системы управления.

Ключевые слова: энергоблок атомной электростанции, система автоматического управления, методы анализ и синтеза, математические модели, переходные процессы.

Введение. В связи с существенным несоответствием между выработкой и потреблением электрической энергии в энергосистеме Украины в течение суток и из-за малой суммарной доли установок для регулирования суточного графика нагрузки энергосистемы актуальна проблема модернизации действующих энергоблоков к новым специфическим условиям работы путем создания системы автоматического управления (САУ) мощности энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблоки атомных электрических станций (АЭС) в маневренных режимах [1–4].

Целью статьи является обобщение задач усовершенствования моделей системы автоматического управления мощностью энергоблока АЭС, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах суточного цикла для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины.

Анализ проблемы маневренности энергоблоков АЭС. Самые мощные в энергосистеме Украины 13 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 эксплуатируются на четырех АЭС [1]. Сегодня все АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура рассчитано на эксплуатацию в режиме маневрирования мощностью [4, 5]. Это, прежде всего, связано с тем, что в настоящее время маневрирование мощностью реакторной установки осуществляется операторами в ручном режиме по требованию диспетчеров энергосистемы. Выполнение маневра операторами в ручном режиме очень опасно, так как при управлении необходимо одновременно контролировать изменение многих нейтронно-физических и технологических параметров, что приводит к необходимости учитывать влияние человеческого фактора на безопасность АЭС.

Перспективными планами развития энергетики Украины предусмотрено строительство новых энергоблоков повышенной безопасности и модернизация существующих энергоблоков [1]. С увеличением доли АЭС в энергосистеме Украины возникает необходимость их подключения к регулированию нагрузки энергосистемы, поскольку существует несоответствие между производством и потреблением электроэнергии в течение суточного цикла. Это особенно актуально в связи с перспективой интеграции Объединенной электроэнергетической системы Украины в Европейскую энергетическую систему, где требования к качеству электроэнергии существенно выше. При модернизации существующих энергоблоков АЭС и проектировании энергоблоков нового поколения особое внимание необходимо уделять повышению их безопасности и надежности, улучшению маневренных характеристик.

Сложная проблема маневренности энергоблоков АЭС для своего решения требует развития математических моделей энергоблока как объекта управления и создания новых САУ. Решением этой проблемы может стать создание САУ энергоблока, которая позволит эксплуатировать энергоблок в режиме маневрирования мощностью при условии повышения безопасности и надежности эксплуатации энергоблока, а также при сохранении экономической эффективности энергоблока.

Модель энергоблока АЭС. Математическая модель энергоблока АЭС как объекта управления построена на основании развития моделей его основных элементов: ядерного реактора ВВЭР-1000, выходного трубопровода реактора, САУ парогенератором, соединения выходного трубопровода парогенератора, главного циркуляционного насоса и входного трубопровода реактора, САУ паровой турбины [2, 3]. Объединяя модели этих элементов, получим модель энергоблока для основных нормальных режимов эксплуатации:

$$dX_U/dt = A_U X_U + B_U u + B_{UE} v_{Es}, \quad v = C_U X_U, \quad \pi_k = C_{Uk} X_U, \quad (1)$$

где X_U – вектор состояния энергоблока;

$A_U, B_U, B_{UE}, C_U, C_{Uk}$ – матрицы параметров СДУ энергоблока;

u – управляющий сигнал регулятора нейтронной мощности;

v_{Es} – сигнал изменения электрической мощности;

v – нейтронная мощность реактора;

π_k – давление пара в главном паровом коллекторе.

Порядок этой модели $n = 40$. Применим полученную модель энергоблока для построения его систем управления в нормальных режимах эксплуатации «Н» и «Т» [2].

Синтез САУ в режиме «Н». Модель системы управления энергоблоком в режиме «Н», которой соответствует система автоматического поддержания

нейтронной мощности реактора, построена по модели энергоблока (1) с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором мощности:

$$dX_Q/dt = A_Q X_Q + B_Q v_s + B_{QE} v_{Es}, \quad v = C_Q X_Q, \quad \pi_k = C_{Qk} X_Q, \quad (2)$$

$$X_Q = \begin{pmatrix} X_U \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_Q = \begin{pmatrix} A_U - B_U K_P C_U & B_Q \\ -\lambda_I C_U & 0 \end{pmatrix}, \quad B_Q = \begin{pmatrix} K_P B_U \\ \lambda_I \end{pmatrix},$$

$$C_Q = (C_U \ 0), \quad C_{Qk} = (C_{Uk} \ 0),$$

где v_s – уставка мощности;

u_I – переменная интегральной части ПИ регулятора;

K_P и λ_I – параметры ПИ регулятора.

Порядок этой модели $n = 41$. Аналогично построена модель с нечетким ПИ регулятором мощности.

Путем решения задач оптимального синтеза выполнена оптимизация параметров регуляторов мощности и получено желаемое время регулирования $t_e = 100$ с. На рис. 1 для двух ПИ регуляторов мощности – линейного (PI) и нечеткого (FPI), показаны переходные процессы изменения мощности реактора в оптимальных системах, имеющие одинаковое время регулирования $t_c = 100$ с. Самый медленный процесс, который отвечает минимуму

улучшенной интегральной квадратичной оценки (PI), предпочтителен для безопасности энергоблока.

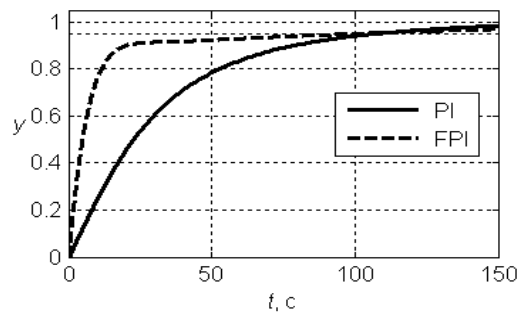


Рис. 1 – Процессы изменения мощности реактора

Синтез САУ в режиме «Т». Модель системы управления режимом «Т», которой соответствует система автоматического поддержания давления пара перед турбиной, построена по модели (2) с ПИ регулятором давления (РД):

$$dX_P/dt = A_P X_P + B_P v_{Es}, \quad \pi_k = C_P X_P,$$

$$X_P = \begin{pmatrix} X_Q \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_P = \begin{pmatrix} A_Q - B_Q K_P C_{Qk} & B_Q \\ -\lambda_I C_{Qk} & 0 \end{pmatrix}, \quad B_P = \begin{pmatrix} B_{QE} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_P = (C_{Qk} \ 0),$$

Аналогично построены модели с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) и нечетким ПИ регуляторами давления. Выполнена оптимизация параметров регуляторов давления. На рис. 2 представлены переходные процессы изменения давления пара в главном паровом коллекторе в оптимальных системах поддержания давления с ПИ (PI), ПИД (PID) и нечетким ПИ (FPI) регуляторами. Эти результаты позволяют сделать вывод, что оптимальный традиционный линейный ПИД регулятор давления обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с небольшими колебаниями.

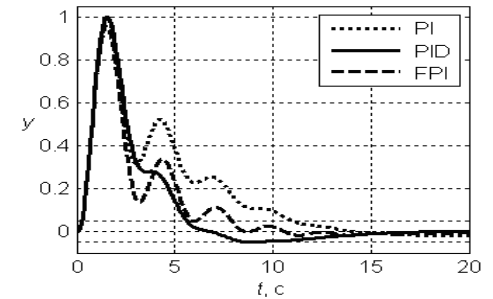


Рис. 2 – Процессы изменения давления пара

Проведенные на основании линейных моделей исследования динамики САУ энергоблока в нормальных режимах эксплуатации «Н» и «Т», показывают, что переходные процессы изменения состояния энергоблока длятся не более 100 с, а это не противоречит возможности работы энергоблока в маневренных режимах. Однако при этом не учтены жесткие требования со стороны безопасности ядерного реактора и функциональные ограничения со стороны теплового оборудования.

Развитие моделей ядерного реактора. Залогом надежной и безопасной эксплуатации энергоблока является устойчивость состояния реактора при возмущениях как во время работы на постоянном уровне нагрузки, так и в маневренном режиме. Количественной мерой устойчивости реактора служит аксиальный офсет (АО) – технологическая характеристика равномерности энерговыделения и количественная мера устойчивости ядерного реактора, поэтому показателем эффективности эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000 является минимизация отклонения АО. Максимальное допустимое отклонение АО составляет 2,59 % и является граничным, превышение его запрещается регламентом и приводит к вынужденной остановке энергоблока.

Для исследования работы реактора ВВЭР-1000 в маневренных режимах необходимо развитие его модели как объекта управления с учетом АО и влияния изменения технологических параметров на устойчивость состояния реактора. Многозонная модель реактора, включающая идентифицированную модель борного регулирования, позволяет вычислить аксиальный офсет и учесть изменения технологических параметров: тепловую мощность, температуру теплоносителя на выходе из активной зоны (АЗ) реактора, температуру твэлов по высоте АЗ реактора [5]. На основании многозонной модели реактора разработана модель энергоблока как объекта управления, которая

позволяет уменьшить погрешности моделирования статических и динамических свойств энергоблока, а также модели систем управления энергоблоком, позволяющие исследовать процессы управления в маневренных режимах энергоблока в течение суточного цикла [5].

Комбинированное управление. Компромиссно-комбинированный метод управления, в котором температура теплоносителя на входе в АЗ реактора поддерживается постоянной из-за перемещения регулирующих клапанов турбины и изменения давления пара, позволяет устранить неконтролируемые возмущения в нижней части активной зоны реактора и стабилизировать нижнюю часть активной зоны реактора. Это обеспечивается путем применения двух новых контуров управления. В первом контуре поддерживается постоянная температура теплоносителя на входе в АЗ реактора за счет управления давлением пара в парогенераторе, во втором контуре аксиальный офсет поддерживается постоянным за счет изменения положения регулирующей группы органов регулирования в системе управления и защиты реактора [5]. Имитационное моделирование САУ с компромиссно-комбинированным методом подтверждает, что на протяжении суточного маневра мощностью энергоблока АО реактора не изменяется. Усовершенствованная САУ позволит обеспечить устойчивость реактора и перевести энергоблок АЭС с ВВЭР-1000 в маневренный режим для поддержания баланса мощности в энергосистеме Украины с минимальным участием эксплуатационного персонала и с учетом требований регламента к надежности и безопасности эксплуатации энергоблока.

Недостатки существующих методов управления. При анализе компромиссно-комбинированного метода управления использована многозонная нелинейная модель реактора, входящая в систему управления энергоблоком, которую желательно представить в векторном виде с относительными безразмерными переменными состояния и соответствующими коэффициентами, как это принято в классической теории автоматического управления, что позволит уменьшить погрешности вычислений при интегрировании системы дифференциальных уравнений, уменьшить объем вычислений и сократить время интегрирования. Для вычисления значений параметров регуляторов в системах управления использован графоаналитический метод [5], хотя более эффективна методика настройки регуляторов на основе методов оптимизации с непосредственным использованием прямых показателей качества систем [2]. Имитационное моделирование процессов управления энергоблоком АЭС выполняется в среде Simulink компьютерной системы MATLAB, что требует времени для разработки схем систем управления и вычислений процессов управления, а широкие возможности самой системы MATLAB для ускорения вычислений не используются. Для сравнительного анализа качества системы управления мощностью энергоблока на основе компромиссно-комбинированного метода исследуется суточный маневр мощностью энергоблока на уровнях мощности 100% и 80%. При этом используются нелинейные модели

систем управления, для которых не выполняется принцип суперпозиции. Целесообразно провести исследования процессов управления и на других уровнях мощности. В усовершенствованной системе управления энергоблоком АЭС со стабилизацией температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора предложено поддерживать постоянную температуру теплоносителя путем перемещения клапанов паровой турбины, которые предназначены для регулирования частоты вращения ротора турбины. Это приведет к изменению частоты, что тоже нужно исследовать.

Выводы. Проанализирована проблема маневренности энергоблоков АЭС. Приведена линейная модель энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. На основании этой модели выполнен синтез систем управления в нормальных режимах эксплуатации. Приведены переходные процессы изменения состояния энергоблока, которые не противоречат возможности его работы в маневренных режимах. Многозонная модель реактора использована в модели энергоблока для исследования компромиссного комбинированного метода управления, обеспечивающего устойчивость реактора. Проанализированы недостатки методов управления энергоблоком с целью усовершенствования его системы управления.

Список литературы: 1. Ястребенецкий М. А. Системы управления и защиты ядерных реакторов / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская [и др.]. – К. : Основа-Принт, 2011. – 768 с. **2.** Северин В. П. Оптимизация прямых показателей качества систем автоматического управления генетическими алгоритмами / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, К. А. Тарасенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 3 (977). – С. 21–26. **3.** Северин В. П. Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Ядерна та радіаційна безпека. – 2013. – Вип. 3 (59). – С. 62–68. **4.** Халимончук В. А. Динамика реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК / В. А. Халимончук. – К. : Основа, 2008. – 228 с. **5.** Пельх С. Н. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 / С. Н. Пельх, М. В. Максимов, Т. А. Цисельская, В. Е. Баскаков // Ядерная и радиационная безопасность. – 2011. – № 1 (49). – С. 27–32.

Bibliography (transliterated): 1. Jastrebenetskij, M. A., Ju. V. Rozen, S. V. Vinogradskaja [и др.]. *Sistemy upravlenija i zashity jadernyh reaktorov*. Kiev: Osнова-Print, 2011. Print. **2.** Severin, V. P., E. N. Nikulina and K. A. Tarasenko. "Optimizacija prjamyh pokazatelej kachestva sistem avtomaticheskogo upravlenija geneticheskimi algoritmami." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 3 (977). 2013. 21–26. Print. **3.** Severin, V. P., E. N. Nikulina "Sintez optimal'nyh sistem avtomaticheskogo upravlenija energobloka AES v normal'nyh rezhimah ekspluatatsii" *Jaderna ta raditsijna bezpeka*. No. 3 (59). 2013. 62–68. Print. **4.** Halimonchuk, V. A. *Dinamika reaktora s raspredelenymy parametrami v issledovanijah perehodnyh rezhimov ekspluatatsii VVER i RBMK*. Kiev: Osнова, 2008. Print. **5.** Pelyh, S. N., M. V. Maksimov, T. A. Tsel'skaja and V. E. Baskakov. "Sposob stabilizatsii aksial'nogoraspredelenija nejtronnogo polja pri manevrirovanii moshnost'ju VVER-1000." *Jadernaja i raditsionnaja bezopasnost'*. No. 1 (549). 2011. 27–32. Print.

Поступила (received) 12.12.2014