

УДК 621:518.5

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

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРИИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ OPTLAB

Рассмотрена лаборатория методов оптимизации, которая построена на принципах модульности, простоты и надежности. Выполнен синтез оптимальных систем управления для ядерного реактора, парогенератора и паровой турбины, а также систем автоматического поддержания нейтронной мощности и давления пара перед турбиной для нормальных режимов эксплуатации энергоблока.

Ключевые слова: энергоблок, системы автоматического управления, многокритериальный синтез, векторная оптимизация.

Введение

Существенное несоответствие между производством и потреблением электроэнергии в энергосистеме Украины в течение суток и малая суммарная доля установок для регулирования суточного графика нагрузки энергосистемы ставят проблему модернизации действующих энергоблоков атомных электрических станций (АЭС) путем создания систем автоматического управления (САУ) энергоблоков, позволяющих их эксплуатировать в маневренных режимах [1–5].

Для теоретического решения этой проблемы использована компьютерная лаборатория методов оптимизации *OPTLAB*, содержащая множество методов и дополненная моделями и методами векторной оптимизации САУ энергоблока по прямым показателям качества (ППК) [2, 3].

Целью статьи является представление результатов многокритериального параметрического синтеза систем автоматического управления энергоблока АЭС с использованием лаборатории методов оптимизации *OPTLAB*.

Схема энергоблока с реактором ВВЭР-1000

Схема производства электроэнергии энергоблоком с реактором ВВЭР-1000 представлена на рис. 1. В ядерном реакторе (ЯР) ВВЭР-1000 энергия распада ядер урана передается теплоносителю, который нагнетается главным циркуляционным насосом (ГЦН). Питательная вода подается в парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 через подогреватель высокого давления (ПВД) питательным турбонасосом (ПТН), вращаемым приводной паровой турбиной (ППТ). В ПГ питательная вода превращается в пар, который через главный паровой коллектор (ГПК) подается в цилиндр высокого давления (ЦВД) паровой турбины (ПТ) К-1000-1500/60. Из ЦВД пар поступает в сепаратор-пароперегреватель (С), а из него – в цилиндры среднего и низкого давления (ЦСД и ЦНД) турбины и в ППТ. Турбина вращает ротор электрического генератора (ЭГ), вырабатывающий электроэнергию. Отработанный пар в конденсаторе (К) охлаждается водой из водохранилища-охладителя (ВО), подаваемой циркуляционным насосом (ЦН), и вода конденсатным насосом (КН) через подогреватель низкого давления (ПНД) подается в деаэратор (ДА), из которого поступает в ПТН. Для выполнения своих технологических задач энергоблок оснащен САУ.

© В.П. Северин, Е.Н. Никулина, Д.А. Лютенко, Е.Ю. Бобух, 2015

Эта САУ объединяет локальные системы управления отдельными технологическими процессами: САУ мощностью ядерного реактора (САУМ ЯР), САУ уровнем воды в парогенераторе (САУУ ПГ), САУ частотой вращения ПТ (САУЧ ПТ) и другие.

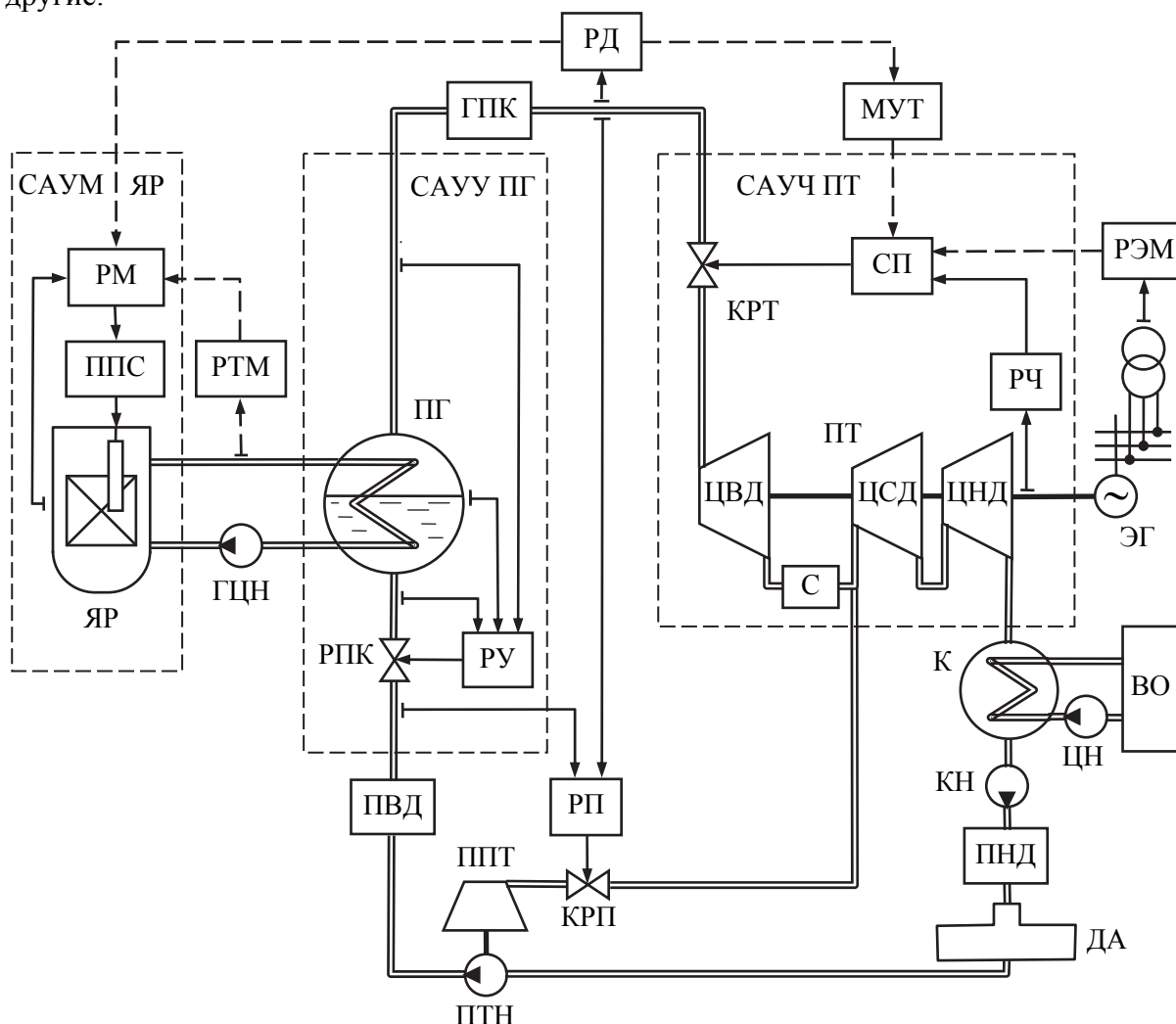


Рис. 1 – Технологическая схема энергоблока с реактором ВВЭР-1000

В настоящее время все 13 энергоблоков АЭС ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности, хотя оборудование рассчитано на эксплуатацию в режиме маневрирования мощностью [4, 5]. Маневрирование мощностью энергоблоков осуществляется операторами в ручном режиме по требованию диспетчеров энергосистемы. Выполнение маневра операторами в ручном режиме очень опасно, так как необходимо одновременно контролировать изменение многих нейтронно-физических и технологических параметров. Поэтому актуальна проблема оптимизации критериев качества переходных процессов, протекающих в САУ энергоблоков.

Компьютерная лаборатория оптимизации *OPTLAB*

Компьютерная лаборатория *OPTLAB* предназначена для эффективного программирования, изучения, исследования, развития и применения численных методов оптимизации [2, 3]. При этом под эффективностью подразумеваются минимальные затраты времени на программирование методов и задач оптимизации при максимально возможной простоте и наглядности представления программ и

результатов решения различных задач оптимизации. Лаборатория *OPTLAB* представляет собой комплекс программ, написанных на языке программирования системы *MATLAB* с широким использованием математических и графических возможностей этой системы – средств векторных и матричных вычислений, решения систем линейных алгебраических уравнений, программ двумерной и трехмерной графики. Лаборатория построена по модульному принципу, при котором каждый модуль выполняет определенные связанные между собой функции для решения задач оптимизации. При разработке модулей также применены принципы максимальной простоты и надежности, а также исключения дублирования программного кода.

Для уменьшения количества формальных параметров подпрограмм, повышения надежности и упрощения согласования работы комплекса программ применены глобальные структуры данных *OPTIONS* и *STATE*, которые согласуют взаимодействие всех подпрограмм с минимальным объемом программного кода и определяют структуру самой лаборатории. Структура *OPTIONS* содержит постоянные параметры задачи оптимизации, метода ее решения, параметры табличного и графического отображения результатов. Структура *STATE* отображает текущее состояние процесса оптимизации. Созданы программы методов одномерного поиска, которые используются и для многомерной оптимизации. Разработаны программы известных методов безусловной и условной оптимизации, векторной оптимизации, глобального поиска. Созданы базы данных (БД) многих типов задач и методов оптимизации. Работа методов иллюстрируется таблицами и графиками.

Важной особенностью лаборатории является то, что исходные функции задач оптимизации вызываются с помощью различных вспомогательных подпрограмм, которые реализуют связь подпрограмм методов оптимизации с конкретной оптимизационной задачей, вычисляют значения целевой функции, устанавливают счетчик числа вычислений функции, вызывают подпрограммы проверки критериев выхода. Проверка критериев выхода выполняется при каждом вычислении целевой функции, что позволяет определить эффективность методов оптимизации. Предусмотрена возможность сохранения данных процесса оптимизации с последующей возможностью представлять эти данные в табличном и графическом видах, а также для дальнейшего продолжения процесса оптимизации, ранее прерванного из-за ограниченности времени счета. Реализованы функции для графического представления переходных процессов в динамических системах.

Методика векторной оптимизации систем управления

Задачи синтеза оптимальных САУ энергоблока АЭС могут быть представлены как задачи условной оптимизации, в которых ограничения для переменных параметров представляются в виде неравенств. Устанавливается определенный порядок ограничений: сначала идут двусторонние ограничения переменных, затем ограничения устойчивости систем, ограничения ППК – максимального отклонения управляемой переменной в переходном процессе и размаха колебаний процесса. Чем больше номер ограничения, тем сложнее вычисляется соответствующая ему штрафная функция (ШФ). Целевой функцией (ЦФ) является время установления переходного процесса.

В стандартном подходе условной оптимизации набору ограничений и ЦФ соответствуют различные функции многих переменных, с которыми работает метод условной оптимизации. Необходимость учета множества функций усложняет программы методов условной оптимизации по сравнению с программами методов безусловной оптимизации. Предлагаемый пошаговый подход учета ограничений использует один математический объект – двумерную векторную ЦФ (ВЦФ)

$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}))$, что позволяет применять методы безусловной оптимизации. Здесь $F_1(\mathbf{x})$ – количество выполненных ограничений, $F_2(\mathbf{x})$ – ШФ первого нарушенного ограничения. Функция $F_1(\mathbf{x})$ максимизируется, а $F_2(\mathbf{x})$ – минимизируется. При выполнении всех ограничений $F_1(\mathbf{x})$ равна количеству всех ограничений, а $F_2(\mathbf{x})$ – ЦФ. Критерии качества САУ определяются по их моделям в виде систем дифференциальных уравнений. Цели технической реализуемости, ограничения максимального отклонения управляемой величины, ограничения показателя колебаний и обеспечения максимального быстродействия САУ учтены ВЦФ.

Программирование ВЦФ заключается в том, что по очереди проверяются ограничения задачи синтеза и при невыполнении какого-то из них программа возвращает соответствующее значение ВЦФ в виде двумерного числового вектора. При этом функции последующих ограничений и ЦФ не вычисляются. Методы безусловной оптимизации используют операции сравнения значений ВЦФ. Для этого в программной реализации *OPTLAB* вводится класс ВЦФ со своим конструктором, логическими и арифметическими операциями, которые переопределяют соответствующие стандартные операции для скалярных величин. Все это ускоряет работу методов.

Синтез локальных систем управления энергоблока

Получены математические модели в пространстве состояний с различными регуляторами для локальных САУ реактором ВВЭР-1000, парогенератором ПГВ-1000 и паровой турбиной К-1000-60/1500. Векторными методами оптимизации выполнен параметрический синтез локальных САУ энергоблока с традиционными пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) и нечеткими регуляторами.

САУМ ЯР ВВЭР-1000 на рис. 1 включает ядерный реактор, датчик плотности потока нейтронов, регулятор мощности (РМ) и привод поглощающих стержней (ППС). Разработаны математические модели ядерного реактора ВВЭР-1000 и его САУ, БД задач оптимизации САУМ, сценарии оптимизации параметров регуляторов САУМ и построения переходных процессов. Для разных ПИ регуляторов, линейной, нелинейной и нечеткой моделей САУМ найдены оптимальные значения параметров регуляторов, соответствующие плавному монотонному изменению мощности.

САУУ ПГ на рис. 1 включает ПГ, датчики уровня, расходов питательной воды и пара, регулятор уровня (РУ) и регулирующий питательный клапан (РПК). Разработаны математические модели различной сложности для парогенератора и его САУУ, БД задач идентификации и оптимизации, сценарии идентификации, оптимизации параметров парогенератора и построения переходных процессов. Параметры модели системы управления уровнем воды в парогенераторе идентифицированы по экспериментальным данным. Найдены оптимальные значения параметров регуляторов, соответствующие минимальному отклонению уровня без колебаний. На рис. 2 представлены процессы изменения уровня ξ_c ПГ. Колебательный процесс Р10 отвечает экспериментальному процессу. Оптимальные процессы с ПИ (PI) и нечетким ПИ (FPI) регуляторами практически совпадают.

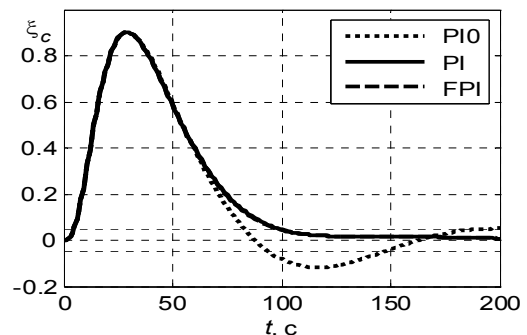


Рис. 2 – Изменение уровня

Рис. 3 отображает все точки процесса оптимизации параметров ПИ РУ на

графиках ВЦФ модифицированным генетическим алгоритмом. Лучшие точки поиска соединены, начальная точка отмечена кругом, конечная – ромбом.

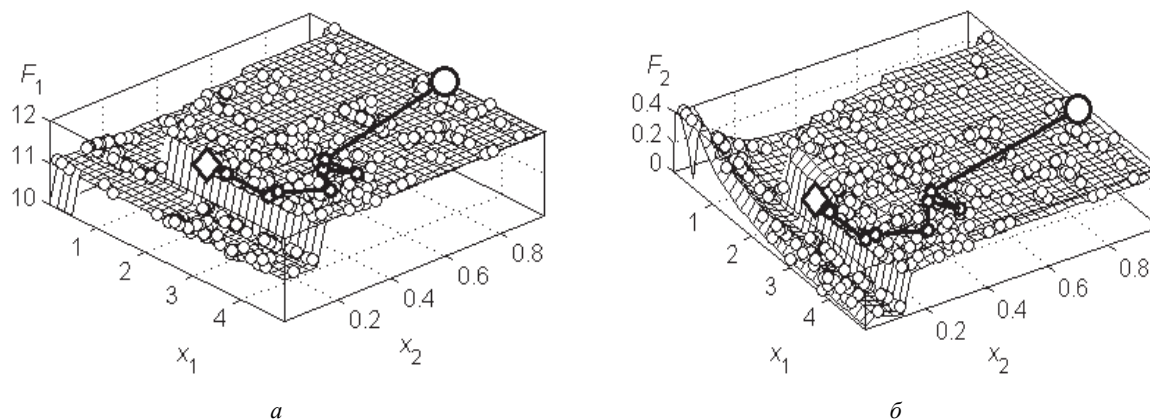


Рис. 3 – Оптимизация параметров ПИ регулятора уровня САУУ: а – $F_1(x)$; б – $F_2(x)$

САУЧ ПТ на рис. 1 включает ПТ, датчик частоты, регулятор частоты (РЧ), следящий привод (СП) и клапан регулирования турбины (КРТ). Разработаны подпрограммы для математических моделей паровой турбины и ее САУ, БД задач оптимизации, сценарии оптимизации параметров регуляторов САУ и построения переходных процессов. Наиболее эффективен оптимальный нечеткий ПИ регулятор, обеспечивающий наиболее быстрый процесс с наименьшим отклонением частоты.

Синтез систем управления энергоблока в нормальных режимах

Модели САУ энергоблоком в режиме «Н», которой соответствует система автоматического поддержания нейтронной мощности реактора, построены по модели энергоблока с различными регуляторами мощности. В этой модели входные воздействия – уставка мощности и сигнал изменения электрической мощности, выходные переменные – нейтронная мощность реактора и давление пара в ГПК. Выполнена оптимизация параметров регуляторов мощности и получено желаемое время регулирования 100 с. На рис. 4 показаны переходные процессы изменения мощности реактора в оптимальных системах с ПИ (PI) и нечетким ПИ (FPI) регуляторами.

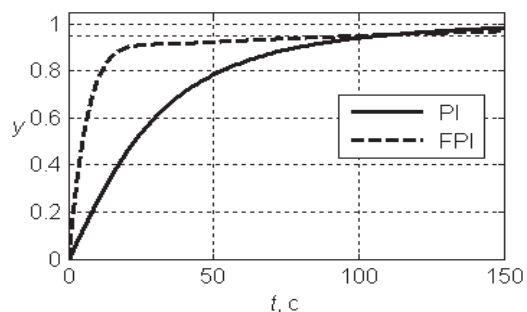


Рис. 4 – Процессы изменения мощности реактора

Медленный процесс с ПИ регулятором предпочтителен для безопасности энергоблока.

Модели систем управления режимом «Т», которой соответствует система автоматического поддержания давления пара перед турбиной, построены по модели САУ в режиме «Н» с ПИ регулятором и различными регуляторами давления (РД). Выполнена оптимизация параметров регуляторов давления. На рис. 5 представлены переходные процессы изменения давления пара в ГПК в оптимальных системах поддержания давления с ПИ (PI), ПИД (PID) и нечетким ПИ (FPI) регуляторами. Входное возмущающее воздействие – сигнал изменения электрической мощности, выходная переменная – давление пара в ГПК. Оптимальный ПИД регулятор давления обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с небольшими колебаниями.

Выводы

Рассмотрена лаборатория методов анализа и синтеза САУ на основе методов оптимизации, которая построена в виде пакета программ на принципах модульности, простоты, надежности и исключения дублирования программного кода. Лаборатория включает базы данных методов и задач, подпрограммы методов одномерной, многомерной, безусловной, условной, глобальной и многокритериальной оптимизации, утилиты методов, средства табличного и графического представления процесса оптимизации, а также его сохранения. Выполнен синтез оптимальных систем автоматического управления с ПИД и нечеткими ПИ регуляторами для ядерного реактора, парогенератора и паровой турбины, что позволяет сравнить нечеткие регуляторы с ПИД регуляторами. Построены математические модели энергоблока АЭС, включающие взаимодействующие в нормальных режимах эксплуатации реактор, парогенератор, паровую турбину и их системы управления, что позволяет проводить синтез систем и исследовать различные законы управления энергоблоком. На основании моделей систем автоматического управления энергоблока выполнен синтез регуляторов для нормальных режимов эксплуатации – автоматического поддержания нейтронной мощности (режим «Н») и давления пара перед турбиной (режим «Т»). Полученные результаты анализа и синтеза САУ энергоблока позволят обосновать технические проекты по усовершенствованию САУ для повышения маневренности энергоблоков.

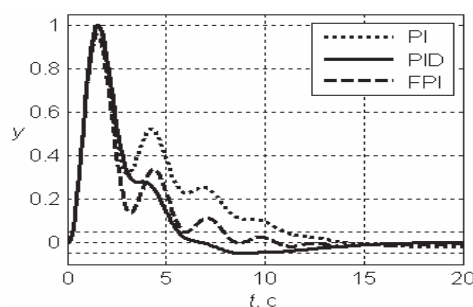


Рис. 5 – Процеси изменения давления пара

Список литературы: 1. Ястребенецкий, М. А. Системы управления и защиты ядерных реакторов [Текст] / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен, С. В. Виноградская [и др.]. – Киев: Основа-Принт, 2011. – 768 с. – ISBN 798-966-2044-52-2. 2. Северин, В. П. Оптимизация прямых показателей качества систем автоматического управления генетическими алгоритмами [Текст] / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, К. А. Тарасенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 3(977). – С. 21–26. – ISSN 2079-0023. 3. Северин, В. П. Синтез оптимальных систем автоматического управления энергоблока АЭС в нормальных режимах эксплуатации [Текст] / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Ядерна та радіаційна безпека. – 2013. – Вип. 3 (59). – С. 62–68. – ISSN 2073-6237. 4. Халимончук, В. А. Динамика реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК [Текст] / В. А. Халимончук. – Киев : Основа, 2008. – 228 с. – ISBN 978-5-9926-0193-0. 5. Пельх, С. Н. Способ стабилизации аксиального распределения нейтронного поля при маневрировании мощностью ВВЭР-1000 [Текст] / С. Н. Пельх, М. В. Максимов, Т. А. Цисельская, В. Е. Баскаков // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – № 1 (49). – С. 27–32. – ISSN 2073-6231.

Bibliography (transliterated): 1. Jastrebenetskij, M. A., Ju. V. Rozen, S. V. Vinogradskaja, et al. *Sistemy upravlenija i zashity jadernyh reaktorov*. Kiev : Osnova-Print, 2011. ISBN 798-966-2044-52-2. Print. 2. Severin, V. P., E. N. Nikulina and K. A. Tarasenko. "Optimizacija prjamyh pokazatelej kachestva system avtomaticheskogo upravlenija geneticheskimi algoritmami." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 3 (977). 2013. 21–26. ISSN 2079-0023. 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. ISSN 2073-6237. Print. 4. Halimonchuk, V. A. *Dinamika reaktora s raspredelennymi parametrami v issledovanijah perehodnyh rezhimov ekspluatatsii VVER i RBMK*. Kiev: Osnova, 2008. ISBN 978-5-9926-0193-0. 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." *Jaderna ta raditsijna bezpeka*. No. 1 (49). 2011. 27–32. ISSN 2073-6231. Print.

Поступила (received) 12.02.2015