

© Л. А. ДЕНИСОВА¹, В. А. ШАПЦЕВ²

¹Омский технический университет

²Тюменский государственный университет

²vashaptsev@ya.ru

УДК 621.4:519.87

**РАЗВИТИЕ САПР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ СРЕДСТВАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ**

**INTELLECTUALIZATION AS A MEANS OF CAD SYSTEM
DEVELOPMENT IN HEAT-AND-POWER ENGINEERING**

Рассмотрены вопросы и обоснованы предложения по совершенствованию ИТ-средств проектирования интеллектуальных систем автоматического управления объектами теплоэнергетики.

The article justifies the necessity to improve IT tools in designing intelligent CAD systems in heat-and-power engineering.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Проектирование САУ, оптимизация, математическая модель, нечеткая логика, генетические алгоритмы, ситуационное моделирование.

KEY WORDS. ACS design, optimization, mathematical model, fuzzy logic, genetic algorithms, simulation modeling.

Введение

Динамика и сложность современных объектов управления требуют ускорения формирования адекватных управляющих воздействий в изменяющихся ситуациях. Это можно обеспечить интеллектуализацией средств ИТ-поддержки управления и апробацией проектов решений (в цепи обратной связи системы управления) на модели объекта управления [1]. Ниже идет речь о конкретном результате, полученном в области управления энергетическими установками. При этом акцент сделан на совершенствование средств поддержки проектирования интеллектуальных [2] систем автоматического управления [САУ].

Статья демонстрирует развитие ИТ-инструментов поддержки создания интеллектуальных САУ, осуществленных в процессе диссертационного исследования одного из соавторов. В результате появились средства поддержки проектирования качественно новых САУ на объектах энергетики [6-10].

Термин «интеллектуальный» отличается от «интеллектуальный» ориентацией на использование только некоторых методов теории искусственного интеллек-

та, а не на полноценную имитацию человеческого разума. Термин «интеллектуальный» был озвучен и обоснован на конференции «Интеллектуальная система управления на железнодорожном транспорте» в г. Москве в ноябре 2013 г. Автором его назван С. Н. Васильев [2].

1. О постановке задачи

Совершенствование предприятий энергетического комплекса страны (АЭС, ТЭС и др.) в направлении повышения эффективности их функционирования в смысле отказоустойчивости в меняющихся условиях и в присутствии дрейфа параметров энергоустановок должно проводиться перевооружением производственных мощностей. Это, в свою очередь, требует модернизации технологий проектирования оборудования и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и конкретно САУ энергоустановками. При этом требуется обеспечить сохраняемость значений показателей качества САУ при возмущающих факторах различной природы, вариациях значений параметров цифрового регулятора и трендах передаточной функции объекта управления, в частности. Проблема стабильности показателей качества САУ может быть решена, в частности, синтезом малочувствительных к параметрическим возмущениям интеллектуальных систем управления на основе нечеткой логики и алгоритмов гибкого адаптивного управления.

Существующий уровень автоматизации отечественных АЭС и ТЭС еще недостаточен для эффективного функционирования этих объектов, несмотря на большое разнообразие российских и зарубежных технических средств соответствующего класса. Одна из причин этого положения — отсутствие совершенной (адекватной потребностям) инструментальной базы в практике проектирования САУ.

2. Краткая ретроспектива вопроса

Исследования по получению математических моделей теплоэнергетических объектов, необходимых для построения систем управления, проводились ведущими в этом направлении организациями: Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ), Московским энергетическим институтом (МЭИ), Институтом комплексной автоматизации (ЦНИИКА), Институтом проблем управления им. В. А. Трапезникова (ИПУ) РАН. Работы, посвященные проектированию производственно-технологических комплексов (ПТК), систем управления с цифровыми контроллерами, методам разработки их алгоритмического и программного обеспечения, включая создание подсистем идентификации и адаптации (ИПУ РАН, ЦНИИКА, МЭИ), заложили основы систем управления при неполной априорной информации о модели объекта.

Применение микропроцессорных средств позволяет не только реализовать традиционные для энергетических объектов алгоритмы управления (напри-

мер, релейно-импульсные регуляторы или системы с широтно-импульсной модуляцией), заменяя аппаратурные средства решениями, выполненными посредством программных методов, но и создавать современные интеллектуальные системы управления. В качестве базиса при создании интеллектуальных систем управления широко применяются методы теории нечетких множеств. Фундаментальные научные результаты в области проектирования интеллектуальных систем управления, в том числе базирующихся на нечетких множествах, отражены в работах отечественных и зарубежных ученых (Р. А. Алиева, В. И. Васильева, В. И. Захарова, Б. Г. Ильясова, В. М. Лохина, И. М. Макарова, К. А. Пупкова, А. А. Ускова, Е. Н. Mamdani, К. Narendra, А. Pegat, G. Saridis, M. Yen J. Sugeno, L. Zadeh и др.). Стратегия управления, использующая нечеткий логический вывод, являясь удобной и продуктивной при создании САУ, позволяет игнорировать неопределенность параметров объекта и внешних возмущающих факторов [например, 3 и 4]. Однако до настоящего времени не разработаны пригодные в практике методы проектирования интеллектуальных систем, в том числе нечетких САУ объектами теплоэнергетики. К нерешенным задачам относится также задача разработки принципов комбинированного использования традиционных алгоритмов управления и алгоритмов, основанных на нечеткой логике. В частности, не разработан инженерный синтез нечетких импульсных систем, пригодный для практического использования.

Из вышеизложенного следует целесообразность разработки методик синтеза систем управления, базирующихся на принципах теории нечетких множеств, исходя из гипотезы о возможности существенного повышения качества управления нестационарными объектами.

Параметрический синтез САУ можно свести к выбору значений параметров, обеспечивающих оптимальное функционирование системы по выбранному показателю качества. При этом следует учитывать тот факт, что показатели качества функционирования САУ, как правило, являются нелинейными, недифференцируемыми функциями с локальными экстремумами. Здесь применимы ускоренные методы оптимизации, в частности, генетические алгоритмы (ГА), предложенные Дж. Холландом [5]. Они позволяют эффективно осуществлять автоматический синтез САУ. Являясь алгоритмами прямого поиска, ГА в отличие от классических алгоритмов оптимизации, не требуют определения градиента функции и производных более высокого порядка. ГА позволяет найти глобальный оптимум в среде с большим количеством параметров без использования специфических знаний о проблеме, которую предстоит решить. Кроме того, по скорости определения оптимума целевой функции ГА значительно превосходят другие алгоритмы случайного поиска. Это обусловило целесообразность разработки методик синтеза и оптимизации САУ с использованием аппарата генетических алгоритмов.

3. Новые решения

К решенным задачам рассматриваемого класса — повышение эффективности управления энергетическими системами — относятся, в частности, следующие [6-10].

1. Предложен метод проектирования систем автоматического регулирования (САР) на основе их математического моделирования и оптимизации генетическим алгоритмом. Метод позволяет осуществлять выбор структуры и значения параметров САР в ограничениях, обусловленных требованиями к качеству технологического процесса (конкретнее о показателе качества). Целевая функция при этом является многоэкстремальной, нелинейной и недифференцируемой функцией.

2. Создан комплекс программных средств в среде MATLAB/ Simulink/ Global Optimization Toolbox, включающий: математическую модель импульсной САР; подсистему расчета обобщенного показателя качества; файл-сценарий, выполняющий многократный вызов модели САР и обработку результатов моделирования; процедуру выбора опций генетического алгоритма и контроля процесса оптимизации.

3. С целью учета стохастического характера технологических процессов предложена технология моделирования, осуществляющая наложение случайных флуктуаций с заданной автокорреляционной функцией на детерминированную модель САУ [7].

Далее рассмотрен результат применения предлагаемого подхода к проектированию и оптимизации пуско-остановочного регулятора уровня в парогенераторе (ПГ) энергоблока АЭС.

4. Разработка САР питания парогенераторов энергоблоков АЭС

4.1. Математическая модель системы питания парогенератора

САР питания парогенераторов (уровня) энергоблоков № 1 и № 2 Кольской АЭС предназначена для поддержания во всех режимах работы энергоблоков расходов питательной воды в парогенераторы в соответствии с расходами генерируемого пара и поддержание заданного уровня воды в ПГ. Необходимость разработки новой САР обусловлена заменой существующего оборудования микропроцессорными локальными регуляторами ВЛР-2 для повышения надежности функционирования. В состав САР ПГ входят основной и аварийный регуляторы для каждого ПГ. САР ПГ формирует управляющие воздействия на электроприводы регулирующих питательных клапанов (РПК). При этом пуско-остановочный регулятор реализует поддержание заданного уровня воды в ПГ с разбросом ± 75 мм в диапазоне нагрузок до $30\% N_{\text{ном}}$ (номинального уровня мощности).

Модель САР ПГ в среде MATLAB/Simulink представлена на рис. 1.

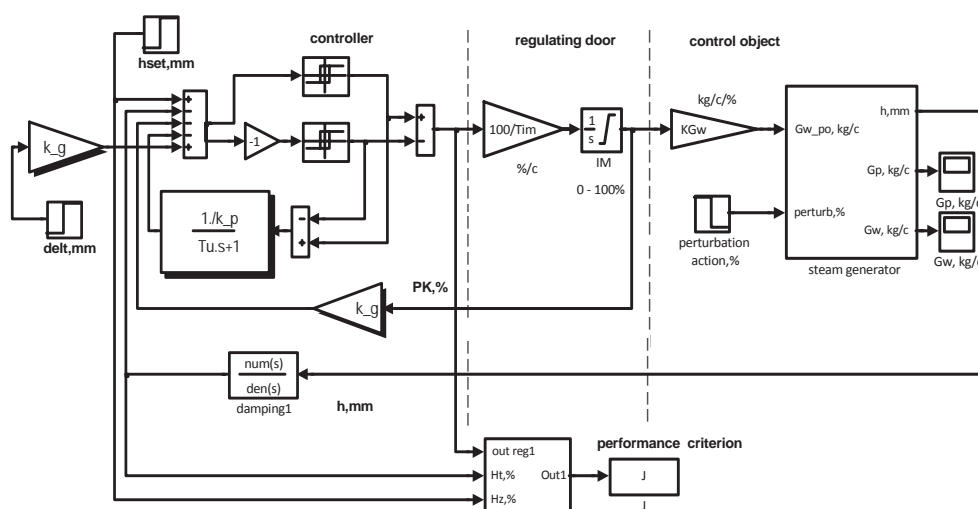


Рис. 1. Модель САР питания ПГ

Пуско-остановочный регулятор САР ПГ реализует одноимпульсную систему регулирования: на вход регулятора подаются сигналы измеренного уровня воды (импульс по уровню), а также сигнал по положению регулирующего клапана для реализации местной обратной связи. Пуско-остановочный регулятор формирует управляющие воздействия на электропривод РПК, через который осуществляется подача воды из напорного коллектора в парогенератор, обогреваемый теплоносителем первого контура энергоблока. Математическая модель САР ПГ в свою очередь содержит модели: пуско-остановочного регулятора (controller), исполнительного механизма (ИМ) с регулирующим питательным клапаном (regulating door) и технологического объекта управления (control object). Сигнал рассогласования на входе в регулятор формируется взвешенным суммированием сигналов заданного текущего значения уровня, а также сигнала обратной связи по положению регулирующего клапана. Кроме того, в связи с тем, что одноимпульсный регулятор с местной обратной связью по положению РПК имеет статическую ошибку, на вход регулятора вводится сигнал, инициирующий ее устранение.

Выходными САР сигналами являются импульсы, формируемые в контроллере и поступающие на ИМ для открытия/закрытия РПК. При этом скважность выходных импульсов связана пропорционально-дифференциальной (ПД) зависимостью с изменением сигнала рассогласования. Регулятор совместно с ИМ постоянной скорости и сигналом по положению РПК приближенно реализует пропорциональный закон регулирования в основном, скользящем режиме работы. Параметрами настройки регулятора являются: коэффициент передачи k_p , постоянная времени интегрирования T_i и коэффициент обратной связи k_g . Содержащие эти параметры звенья на рис. 1 выделены тенью.

Модель технологического объекта управления (control object) — парогенератора представлена на рис. 2. Подсистема steam generator имеет два входа:

расход питательной воды от регулирующего клапана и параметр perturbation для формирования глубоких возмущений изменением расхода пара. Выходными переменными являются уровень воды в ПГ, расходы пара и питательной воды с учетом их взаимного влияния.

Значения параметров данной линейной модели ПГ получены на основе значений конструктивных и технологических параметров оборудования, а также путем аппроксимации динамических характеристик ПГ, рассчитанных по нелинейной модели энергоблока [10]. Уровень воды в парогенераторе является интегралом от материального дисбаланса расходов пара и питательной воды. При моделировании динамических свойств ПГ по уровню воды каждый из каналов воздействий описывается суммой интегрального и апериодического звеньев; причем интегрирующее звено является общим для обоих каналов. Кроме того, в модели ПГ присутствуют апериодические звенья, необходимые для моделирования взаимного влияния возмущающих воздействий по расходам пара и воды. Флуктуации случайных возмущений уровня, расходов пара и питательной воды реализуются формирующим фильтром Shaping Filter на основе экспериментально полученных автокорреляционных функций колебаний сигналов [7], и далее суммируются с соответствующими выходами модели ПГ. Для оптимизации в модели выполняется расчет интегрального показателя качества регулирования (подсистема performance criterion на рис. 1):

$$J = \int_0^T (\varepsilon^2 + \lambda u)^2 dt,$$

где ε — отклонение регулируемого параметра от заданного значения; u — выходной сигнал регулятора на ИМ; λ — весовой коэффициент; t — текущее время; T — верхний предел интегрирования, выбираемый не менее времени переходного процесса. Минимизация принятого показателя качества J позволяет обеспечить быстрое действие, отсутствие перерегулирования и уменьшение числа срабатываний ИМ.

4.2. Оптимизация параметров регулятора САР ПГ

Выбор значений параметров САР ПГ осуществлялся минимизацией целевой функции J . Посредством ГА найдены оптимальные значения параметров регулятора, получены соответствующие им переходные процессы. Для использования ГА в качестве «особи» выступает вектор параметров $X = (k_p, T_d, k_g)$. Рис. 3 иллюстрирует работу ГА на одной из выполненных реализаций. Показаны динамика изменения целевой функции для лучших особей и усредненного ее значения по популяции (алгоритм сходится к решению за десять поколений) (а), средний разброс между особями в ходе оптимизации (б, ниже). Приведены «столбцовые» графики компонент оптимального вектора $X_{\text{опт}} = (k_p, T_d, k_g)$ (г).

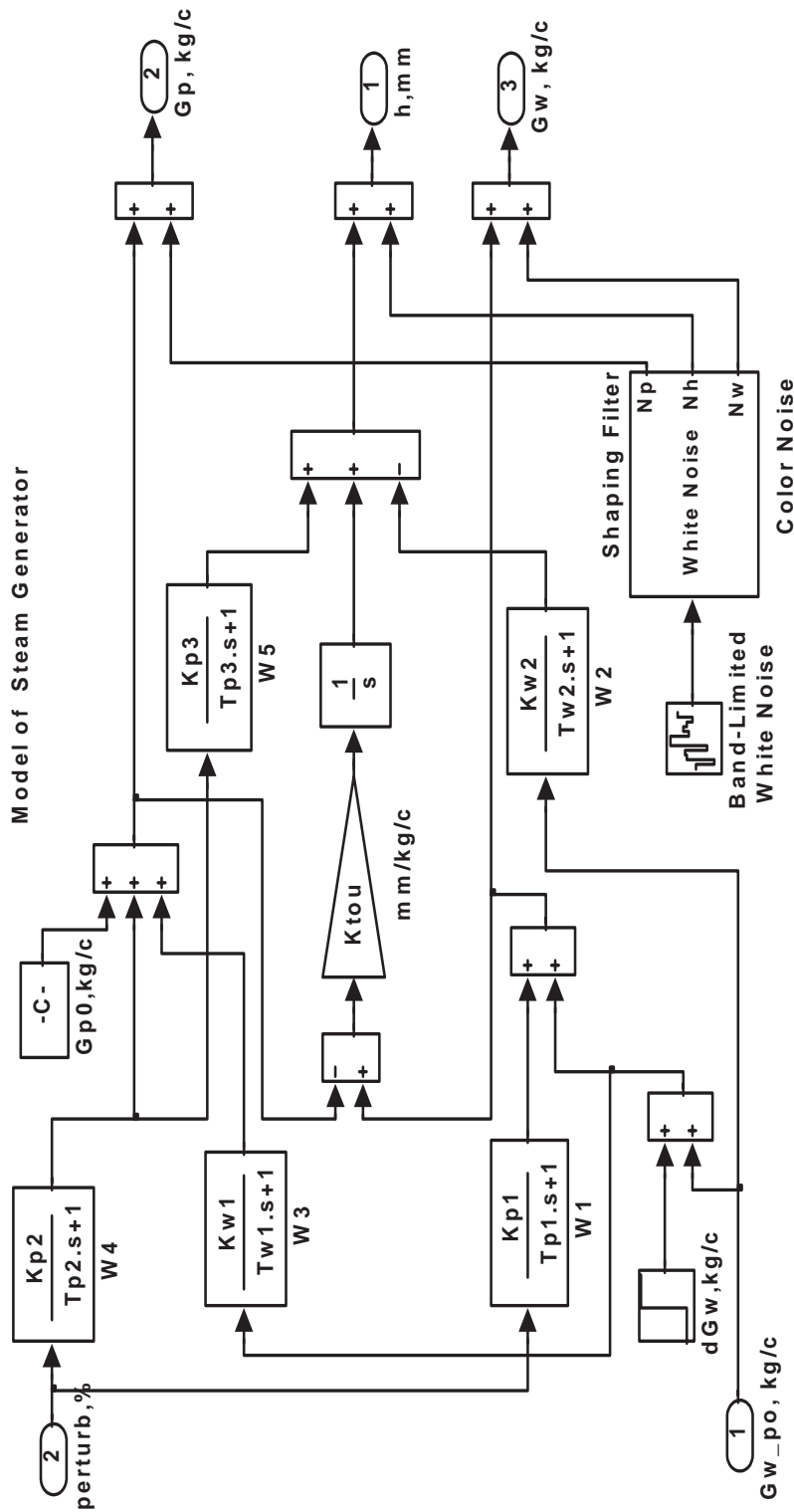


Рис. 2. Модель парогенератора

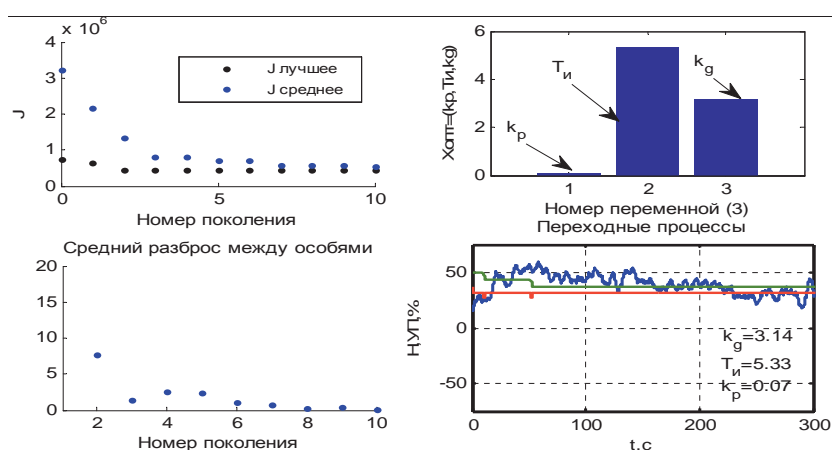


Рис. 3. Оптимизация работы аварийного регулятора САР ПГ с помощью ГА

Представлены также переходные процессы для одной из реализаций — поддержание уровня в ПГ осуществляется с заданной точностью (γ). В связи с тем, что начальная популяция ГА формируется генератором псевдослучайных чисел, осуществлялось несколько вычислительных экспериментов и выбиралось лучшее из полученных решений.

Описанная математическая модель системы питания парогенератора позволила провести исследования в различных режимах работы и определить значения параметров, обеспечивающие минимизацию выбранного показателя качества J функционирования САР.

4.3. Нечеткая компенсация статической ошибки регулирования

В соответствии с принятой структурой пуско-остановочный регулятор получает основной сигнал по уровню в ПГ и сигнал обратной связи от указателя положения (УП) ИМ РПК, осуществляя П-регулирование. При этом в установившемся состоянии каждому значению уровня соответствует определенное открытие регулирующего клапана. Так как сигнал от указателя положения (УП) (в % от открытия РПК) добавляется к рассогласованию, поступающему на регулятор, то регулирование производится со статической ошибкой (неравномерностью). Для компенсации этой ошибки предлагается реализовать адаптивную коррекцию степени воздействия на регулятор, основанную на математическом аппарате нечеткой логики.

Для пояснения принципов работы САР уровня с нечеткой компенсацией статической ошибки (КСО) использована математическая модель этой системы в среде MATLAB / Simulink (рис. 4). Модель САР включает в себя модели: импульсного ПД-преобразователя RPI2, модуля вычисления коэффициента коррекции задания (подсистема COR_SET), а также РПК с ИМ (подсистема control valve) и объект управления (подсистема TOU). САР функционирует следующим образом. Сигналы измеренного H_z и заданного H_z значений уровня поступают как на вход модуля COR_SET для вычисления коэффициента коррекции K_{cor} ,

так и на модуль алгебраического суммирования, формирующего сигнал рас-
согласования в соответствии с выражением:

$$e = H_t - H_z - K_3 L_{cv} + K_{cor} H_z,$$

где K_3 — коэффициент обратной связи по положению РПК; L_{cv} — сигнал от УП РПК. Первые два слагаемых в правой части выражения представляют собой отклонение уровня от заданного значения: $e_1 = H_t - H_z$.

Добавление члена $K_3 L_{cv}$ от обратной связи по положению РПК и является причиной появления статической ошибки.

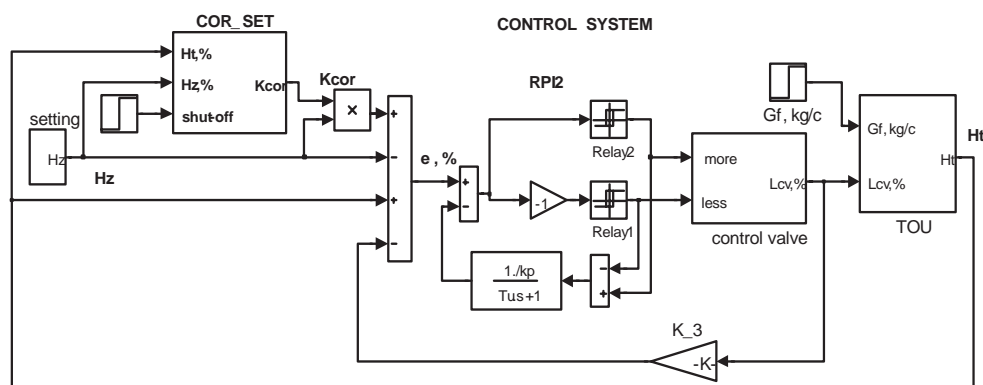


Рис. 4. Модель САР с нечеткой компенсацией статической ошибки

С целью компенсации ошибки регулирования введено слагаемое $K_{cor} H_z$. При этом автоматическая подстройка K_{cor} производится до тех пор, пока отклонение уровня от заданного значения не уменьшится до величины зоны нечувствительности. При коррекции задания совокупность нечетких правил и нечетких переменных используется для осуществления нечеткого логического вывода [8], результатом которого является значение скорости изменения коэффициента коррекции dK_{cor}/dt .

Рис. 4 иллюстрирует то, что применение нечеткой коррекции в системе приводит к устранению статической ошибки (изменение уровня H_t) — линия 2 и поддержанию задания с хорошей точностью (ошибка не более 2%). Коэффициент коррекции K_{cor} устанавливается после автоподстройки на уровне, обеспечивающем компенсацию статической ошибки. Кроме того, как видно из графиков, изменения положения РК в базовой системе (линия 4) и системе с коррекцией (линия 5) отличаются незначительно. То есть, САР с КСО, обладая значительным преимуществом в качестве регулирования, практически не требует дополнительных затрат на управление.

Предложенная компенсация статической ошибки упрощает начальную настройку регуляторов и существенно улучшает качество управления технологическими процессами, особенно, при неизмеримых возмущениях.

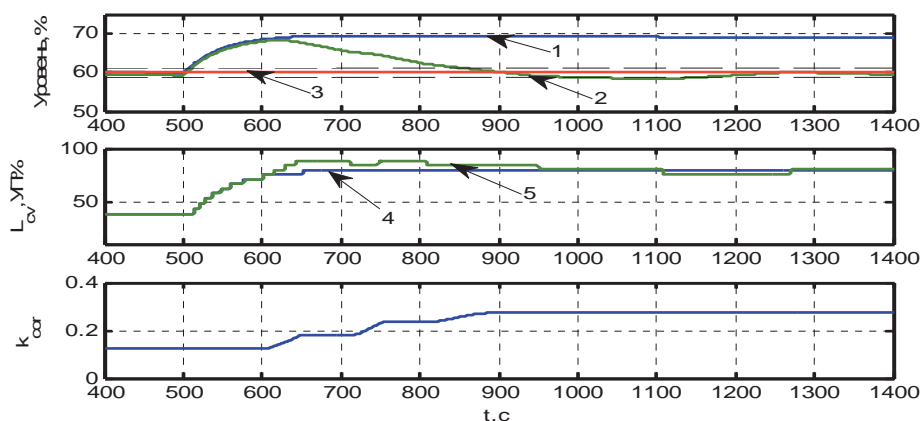


Рис. 5. Графики переходных процессов при моделировании САР с КСО

Заключение

Разработанные описанными инструментами САР с автоматической компенсацией статической ошибки на контроллерах ВЛР-2 [8] введены в промышленную эксплуатацию на Кольской АЭС. Описанные алгоритмы, методики и программное обеспечение стали частью САПР Терго1 [6-10], реализованной на моделирующем стенде для испытаний программно-технических комплексов АСУ ТП в ЗАО «Автоматика-Э» (г. Омск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шапцев В. А. Информация. Информационная технология. Актуальная точка зрения // Вестник ТюмГУ. Естественные науки. Информатика. 2010. № 6. С. 88-99.
2. Васильев С. Н., Черкашин Е. А. Интеллектуальное управление телескопом // Сиб. журн. индустр. матем. 1:2. 1998. С. 81-98.
3. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
4. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: «БИНОМ. Лаборатория знаний», 2013. 802 с.
5. Холланд Дж. Генетические алгоритмы / В мире науки. 1992. № 9. С. 32-40.
6. Денисова Л. А., Мещеряков В. А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием генетического алгоритма / Автоматизация в промышленности. 2012. № 7. С. 34-38.
7. Денисова Л. А. Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 14-19.
8. Денисова Л. А., Надточий П. Н., Раскин Е. М. Реализация системы регулирования с нечеткой компенсацией статической ошибки в среде автоматизированного проектирования Терго1 // Автоматизация в промышленности. 2012. № 8. С. 33-38.
9. Денисова Л. А. Многокритериальная оптимизация на основе генетических алгоритмов при синтезе систем управления. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.
10. Денисова Л. А. Модели и методы проектирования систем управления объектами с переменными параметрами. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 168 с.

REFERENCES

1. Shaptsev, V. A. Informatsija. Informatsionnaja tekhnologija. Aktualnaja tochka zrenija // Vestnik TumGU. Estestvennyye nauki. Informatika. 2010. № 6. Pp. 88-99.
2. Vasiliev, S. N., Cherkashin, E. A. Inellektnoje upravlenie teleskopom // Sib. Zhurn. industr.matem. 1:2 (1998). Pp. 81-98.
3. Vasiliv, V. I., Ilyasov, B. G. Intellektualnye sistemy upravlenija. Teorja i praktika. M.: Radiotekhnika, 2009. 392 p.
4. Pegat, A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie. M.: "BINOM. Laboratorija znaniy", 2013. 802 s.
5. Holland, G. Genetichiskie algoritmy / V mire nauki. 1992. № 9. Pp. 32-40.
6. Denisova, L. A., Mescheryakov, V. A. Avtomatizatsija parametricheskogo sinteza sistemy regulirovanija s ispolzovaniem geneticheskogo algoritma / Avtomatizatsija v promishlennosti. 2012. № 7. Pp. 34-38.
7. Denisova, L. A. Modelirovanie i optimizatsija sistemy regulirovanija pitaniya parogeneratora energobloka AES // Avtomatizatsija v promyshlennosti. 2013. № 7. Pp. 14-19.
8. Denisova, L. A., Nadtochiy, P. N., Raskin, E. M. Realizatsija sistemy regulirovanija s nechetkoj kompensatsiej staticheskoy oshibki v srede avtomatizirovannogo proektirovaniia Teprol // Avtomatizatsija v promishlennosti. 2012. № 8. Pp. 33-38.
9. Denisova, L. A. Mnogokriterialnaja optimizatsija na osnove geneticheskikh algoritmov pri sinteze sistem upravlenija. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2014. 172 p.
10. Denisova, L. A. Modeli i metody proektirovaniia sistem upravlenija objektami s peremennymi parametrami. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2014. 186 p.

Авторы публикации

Денисова Людмила Альбертовна — Омский технический университет, доцент, кандидат технических наук

Шапцев Валерий Алексеевич — профессор Тюменского государственного университета, доктор технических наук

Authors of the publication

Ludmila A. Denisova — Cand. Tech. Sci., Associate Professor, Omsk Tech. University

Valeriy A. Shaptsev — Dr. Tech. Sci., Professor Tyumen State University