

УДК 517.977.56

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Д.Ю. Муромцев, И.В.Тюрин, Р.В. Гребенников**

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных  
и микропроцессорных систем», ГОУ ВПО «ТГТУ»;  
tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** гелиосистемы; дополнительный источник тепловой энергии; модульные котельные; оптимальное управление; солнечные водонагревательные установки; энергосберегающий регулятор; энергосбережение.

**Аннотация:** Освещены проблемы энергосберегающего управления тепловыми аппаратами в малой энергетике и основные пути их решения. Рассмотрены методы конструирования энергосберегающих регуляторов для повышения энергоэффективности объектов малой энергетики.

---

### **Введение**

Объекты энергетики принято разделять на крупные и маломощные генерирующие объекты, работающие на традиционных и нетрадиционных источниках энергии. Следует заметить, что в настоящее время нет четкой границы разделения энергетических объектов, однако, можно ориентироваться на «Концепцию развития и использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики в энергетическом балансе России», разработанную Министерством топлива и энергетики РФ в 1993 г., в соответствии с которой к установкам малой энергетики отнесены электростанции мощностью до 30 МВт с агрегатами до 10 МВт, котельные и котлы общей теплопроизводительностью до 20 Гкал/ч, нетрадиционные энергоустановки, использующие солнечную, ветровую, геотермальную энергии, энергию биомассы, низкопотенциальное тепло, а также микрогэс с единичной мощностью агрегатов до 100 кВт и атомные станции с электрической мощностью энергоблоков до 150 МВт или тепловой мощностью до 500 МВт. В качестве объектов малой энергетики будем рассмотрим мини-ТЭЦ (модульные котельные) и солнечные водонагревательные установки.

Существует несколько областей применения объектов малой энергетики. Во-первых, это отдаленные от крупных энергопередающих центров населенные пункты. Во-вторых, во многих городах рост потребности в электроэнергии опережает рост потребностей в тепловой энергии. Один из вариантов развития – это создание небольших ТЭЦ (мини-ТЭЦ) для покрытия потребностей в тепле и, частично, в электрической энергии. В настоящее время в России действует множество

мини-ТЭЦ, в основном для обеспечения промышленных производств. Значительно вырос интерес к использованию мини-ТЭЦ в коммунальной энергетике, во многих региональных программах развития энергетики предусматривается строительство таких объектов. В-третьих, в последнее время для отопления и горячего водоснабжения отдельных объектов ЖКХ (преимущественно на юге России) стали внедряться солнечные водонагревательные установки, однако, последние исследования, например [1, 2], показывают, что в средних широтах можно и нужно применять гелиосистемы.

В современных модульных котельных применяются средства автоматизации и управления процессом нагрева теплоносителя, а также встроенные средства контроля и диагностики оборудования на базе современных микроконтроллеров и промышленных компьютеров, позволяющих:

- снизить затраты энергии за счет использования современных теплоизоляционных материалов и менее энергоемкого оборудования;
- повысить надежность систем путем широкого внедрения средств диагностики и контроля состояния оборудования;
- обеспечить дистанционное управление и мониторинг объектов в реальном времени.

Однако в данных системах автоматизации не используется энергосберегающее управление динамическими режимами тепловых аппаратов, хотя теоретические исследования показывают, что для отдельных объектов при оптимальном управлении уменьшение затрат энергии или расхода топлива составляет до 15–20 % в зависимости от специфики функционирования объекта, определяемой, в первую очередь, долей динамических режимов в общем времени его работы (при условии, что используются алгоритмы оперативного синтеза оптимального управления, реализуемые на базе относительно простых и недорогих микроконтроллеров). Оптимальное управление характеризуется плавным протеканием тепловых процессов, а это ведет к повышению долговечности оборудования [3].

Среди всех нетрадиционных возобновляемых источников энергии наибольшее распространение получили системы, использующие для выработки тепла энергию солнечного излучения (гелиосистемы). К настоящему времени проведен анализ эффективности использования гелиосистем в различных климатических поясах Земли, доказана целесообразность применения гелиосистем в условиях средних широт и даже районах Севера, а также созданы и внедрены одноконтурные и двухконтурные гибридные солнечные водонагревательные установки для отопления и горячего водоснабжения на ряде объектов ЖКХ в южных регионах и средней полосе России (в основном для индивидуальных коттеджей и малоквартирных домов).

Следует заметить, что в условиях климата средней полосы России для круглогодичного использования наиболее пригодны двухконтурные установки, первый контур которых образуют солнечный коллектор и теплообменник с насосом и расширительным баком, а второй контур – бак-аккумулятор, теплообменник и дополнительный источник энергии (ДИЭ), представляющий собой электрический или газовый котел и предназначенный для доведения температуры горячей воды до требуемого значения, когда необходимая для нагрева воды солнечная энергия отсутствует (ночные часы), ее недостаточно (осенне-зимний период или холодная пасмурная погода), а также в случае необходимости быстрого нагрева воды до заданной температуры и в других ситуациях.

Несмотря на все положительные аспекты, связанные с внедрением гелиосистем, вопросам повышения энергоэффективности ДИЭ до настоящего времени не уделялось достаточного внимания, хотя доля работы ДИЭ в общем времени работы

солнечной водонагревательной установки существенна, а сам ДИЭ представляет собой, по сути, весьма энергоемкий объект. Поэтому использование энергосберегающего управления ДИЭ позволит снизить затраты традиционных видов энергоносителей и сократить срок окупаемости двухконтурных солнечных водонагревательных установок.

Как для модульных котельных, так и для двухконтурных гелиосистем эффект энергосбережения достигается за счет оптимального управления динамическими режимами при нагреве, достижения требуемой температуры точно в назначенное время (что исключает потери «заблаговременного» нагрева), устранения отклонений регулируемой величины от заданного значения с минимумом затрат энергии и использования резервов своевременного отключения энергоносителей (например, за счет остаточного тепла разогретого электронагревателя).

Применяемые в настоящее время оптимальные регуляторы обычно минимизируют квадратичный функционал или время переходного процесса [4]. Достоинством этих регуляторов является быстрое уменьшение ошибки рассогласования. Однако с точки зрения энергоэффективности реализуемые переходные процессы не являются оптимальными, поэтому значительный интерес представляют вопросы проектирования энергосберегающих регуляторов, позволяющих решать задачи минимизации затрат энергии при ограничениях на изменение фазовых координат, лимит электрической энергии (топлива), запас ресурсов, скорость изменения управления и другие параметры, характерные для сложных динамических объектов. Заметим, что использование существующих на мировом рынке программных продуктов для автоматизированного проектирования алгоритмического обеспечения систем управления при решении подобных задач малоэффективно, так как они не позволяют учитывать указанные выше ограничения.

## 1. Задачи анализа энергосберегающего управления энергоемкими объектами

Разработка систем управления, синтезирующих энергосберегающие управляющие воздействия в режиме реального времени при изменении состояний функционирования в процессе работы энергоемкого объекта, связана с разработкой математического аппарата, обеспечивающего вычислительное пространство решения задач оптимального управления (ЗОУ), созданием алгоритмического и программного обеспечения, реализующего математический аппарат оперативного синтеза оптимального управления (ОУ), и использованием относительно недорогих малогабаритных управляющих устройств, способных обеспечить синтез ОУ при эксплуатации объекта.

При разработке энергосберегающего управления тепловыми объектами, в отличие от задач аналитического конструирования оптимального регулятора (АКОР), вместо классического квадратичного функционала минимизируются затраты энергии

$$J_3 = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^n u^2(t) dt \quad (1)$$

или расход топлива

$$J_T = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^n |u(t)| dt, \quad (2)$$

где  $u$  – скалярное управляющее воздействие;  $t_0$ ,  $t_k$  – начало и конец временного интервала управления;  $n$  – число каналов управления.

Однако в большинстве случаев на практике решение ЗОУ с функционалом (2) является вырожденным или нереализуемым. В этом случае возможно использовать управляющие воздействия, полученные для функционала (1).

Оптимальный регулятор с функционалом (1) будем называть энергосберегающим. Этот регулятор должен обеспечивать решение ЗОУ в реальном времени с ограничением на управление, закрепленными концами траектории изменения вектора фазовых координат  $z$  и фиксированным временным интервалом, например:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az(t) + Bu(t - \tau_1) + Cw(t - \tau_2), \quad t \in [t_0, t_k]; \\ \forall t \in [t_0, t_k]: u(t) &\in [u_n, u_b], \quad z(t_0) = z^0, \quad z(t_k) = z^k, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A, B, C$  – матрицы параметров модели объекта соответствующих размерностей;  $w$  – возмущение;  $\tau_1, \tau_2$  – запаздывание по каналу управления и возмущения;  $u_n, u_b$  – нижняя и верхняя границы изменения управления;  $z^0, z^k$  – начальное и конечное значения вектора  $z$ .

Для численного решения ЗОУ (3) задается массив реквизитов

$$R_0 = (A, B, C, w_{\min}, w_{\max}, \tau_1, \tau_2, u_n, u_b, z^0, z^k, t_0, t_k). \quad (4)$$

В задаче (3) вместо фиксированного конечного времени  $t_k$  может задаваться граничное время  $t_{гр}$ . В этом случае при решении ЗОУ дополнительно определяется значение  $t_k \leq t_{гр}$ , при котором функционал  $J_3$  минимален.

Задача конструирования энергосберегающего регулятора с учетом ограничения на управление заключается в определении синтезирующей функции  $S$ , обеспечивающей расчет в каждый момент времени  $t$  оптимальных по критерию  $J_3$  управляющих воздействий  $u^*$  в зависимости от текущего значения  $z(t)$ , остаточного времени  $t_{ост} = t_k - t$  при исходных данных  $R_0$ , то есть

$$u^*(t) = S(z(t), t_{ост}; R_0). \quad (5)$$

На первый взгляд функционал (1) представляется частным случаем классического квадратичного функционала и потому определение синтезирующей функции не представляет сложностей. Однако задача (3) осложняется тем, что функция (5) может иметь несколько видов. Для оперативного определения  $S(z(t), t_{ост}; R_0)$  требуется предварительно получить все возможные виды функции (5) для исследуемого объекта, найти границы областей существования видов функций и решить другие задачи анализа. Неправильное определение вида синтезирующей функции может приводить к срыву процесса управления при выполнении задачи (3), так как вид и параметры синтезирующей функции зависят также от  $u_n, u_b, z^0, z^k$  и  $(t_k - t_0)$ .

При необходимости ОУ должно учитывать ограничения:

– на максимальные значения компонентов вектора  $z$ , например ограничение на ускорение изменения температуры при нагреве тел, то есть

$$\forall t \in [t_0, t_k]: |\ddot{z}_2(t)| \leq \gamma; \quad (6)$$

– на скорость изменения управляющего воздействия

$$\forall t \in [t_0, t_k]: |\dot{u}(t)| \leq g; \quad (7)$$

– на выделенный лимит энергии

$$\int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \leq J_3, \quad (8)$$

где  $\gamma, g, J_3$  – допустимые значения  $\dot{z}_2, \dot{u}$  и затраты энергии (функционала) соответственно.

Ограничения на управление и значение вектора фазовых координат в задаче (3) будем называть основными, а ограничения (6) – (8) дополнительными, с учетом которых размерность массива реквизитов (4) увеличивается, то есть

$$R_0 = (A, B, C, w_{\min}, w_{\max}, \tau_1, \tau_2, u_H, u_B, z^0, z^K, t_0, t_K; \gamma, g, J_{\text{л}}). \quad (9)$$

По степени значимости для процесса управления ограничения в ЗОУ будем называть сильными (общего характера), если нарушить их физически невозможно или они представляют собой основную цель управления, и слабыми (частными), если в исключительных случаях для достижения главной цели управления допускается их невыполнение. Выделение этих двух видов ограничений зависит от особенностей конкретного объекта и условий его реальной работы. Ограничение на величину управляющего воздействия в задаче (3) всегда сильное, а к частным ограничениям в различных режимах работы сложного объекта можно отнести ограничения на ускорение или скорость изменения фазовых координат, скорость изменения управления, лимит используемой энергии  $J_{\text{л}}$  и величину временного интервала управления  $(t_0, t_K)$ .

В целях повышения надежности функционирования энергосберегающего регулятора потребуем, чтобы при нарушении обратной связи по  $z$  регулятор выработывал ОУ в соответствии с программной стратегией, а при отсутствии решения ЗОУ (3) находил управление, обеспечивающее наименьшее снижение эффективности системы управления, например, путем увеличения времени  $t_K$ , ослабления отдельных дополнительных ограничений на вектор фазовых координат  $z$  и скалярное управляющее воздействие  $u$ .

Одной из трудностей использования синтезирующей функции  $S$  является то, что управление  $u^*(t_K)$  не соответствует значению, необходимому для установившегося состояния системы. Данный недостаток может быть устранен, если регулятор при незначительных ошибках регулирования  $\varepsilon$  переключается с работы по энергосберегающему алгоритму на алгоритм обычного регулятора. Например,

$$u(t) = \begin{cases} S(z(t), t_{\text{ост}}; R_0) & \text{при } |\varepsilon(t)| > \varepsilon_{\text{п}}; \\ K_{\text{р}}(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int_{t_{\text{п}}}^t \varepsilon(\theta) d\theta) & \text{при } |\varepsilon(t)| \leq \varepsilon_{\text{п}}, \end{cases}$$

где  $\varepsilon_{\text{п}}$  – пороговое значение ошибки регулирования;  $t_{\text{п}}$  – время переключения, то есть  $\varepsilon(t_{\text{п}}) = \varepsilon_{\text{п}}$ ;  $K_{\text{р}}$  и  $T_{\text{и}}$  – параметры настройки ПИ-регулятора.

Другая сложность применения энергосберегающего регулятора связана с заданием  $t_K$  или  $t_{\text{гр}}$ . Очевидно, что время  $t_K$  зависит от величины начальной ошибки  $\varepsilon(t_0) = \varepsilon_0$ . Один из способов автоматического определения  $t_K$  при больших рассогласованиях  $\varepsilon_0$  заключается в получении на этапе анализа зависимости  $(t_K - t_0) = f(\Delta t_{\text{б}})$ , где  $\Delta t_{\text{б}}$  – время максимального быстрогодействия при устранении ошибки.

## 2. Методика полного анализа энергосберегающих регуляторов

Полный анализ ЗОУ базируется на использовании принципа максимума и методе синтезирующих переменных [5]. Результаты полного анализа ЗОУ позволяют для задаваемого массива исходных данных оперативно рассчитывать вид и параметры функции ОУ. Применительно к модели ЗОУ  $\langle M, F, S, C \rangle$ , где  $M$  – модель объекта (Model),  $F$  – минимизируемый функционал (Functional),  $S$  – стратегия реализации ОУ (Strategy),  $C$  – ограничения (Conditions), полный анализ ОУ выполнялся неоднократно. Однако во всех работах, посвященных полному анализу, не учитывались возмущения, действующие на объект, изменение фазовых координат по объему объекта и запаздывание по каналам управления и возмущения, что является особенно актуальным при расчете ОУ для многомерных тепловых аппаратов [6].

Основными задачами полного анализа энергосберегающих регуляторов являются:

- 1) получение общей модели ЗОУ для всего объекта;
- 2) декомпозиция общей модели на ряд частных моделей ЗОУ;
- 3) определение комплекса частных моделей ЗОУ;
- 4) отыскание всех возможных видов функций ОУ;
- 5) нахождение областей существования видов функций ОУ и соотношений для расчета их параметров;
- 6) определение условий устойчивости замкнутой системы оптимального управления;
- 7) получение соотношений (для границ областей), выполнение которых обеспечивает соблюдение наложенных ограничений на вектор фазовых координат  $z$  и скалярное управляющее воздействие  $u$ ;
- 8) исследование влияния режимных параметров регулирования и, прежде всего, временного интервала квантования на показатели эффективности системы управления.

При полном анализе частной ЗОУ определяются условия существования решения задачи, возможные виды функций ОУ (синтезирующих функций), соотношения для расчета параметров ОУ и соотношения для границ областей различных видов ОУ. Для каждого вида функции ОУ  $u^*(t)$  определяются соотношения для расчета ее параметров.

Методика полного анализа частных ЗОУ предполагает выполнение следующих этапов:

- переход от исходной частной ЗОУ к базовой;
- введение синтезирующих переменных, учитывающих возмущающие воздействия и запаздывание;
- определение возможных видов функций ОУ;
- установление границ области существования решения ЗОУ;
- нахождение соотношений для границ областей существования видов функций ОУ;
- определение соотношений для расчета параметров ОУ;
- отыскание соотношений для выделения границ областей, в которых выполняются ограничения на фазовые координаты;
- получение формул расчета траекторий изменения фазовых координат и значений функционала для возможных видов функций ОУ;
- определение соотношений для решения обратных задач управления, то есть задач коррекции компонентов массива исходных данных, при которых достигаются желаемые значения синтезирующих переменных, а, следовательно, и результаты решения прямой задачи, например уменьшение значения функционала.

Результатом полного анализа ЗОУ является получение информационного пространства, составляющего основу базы знаний автоматизированного рабочего места разработчика алгоритмического и программного обеспечений систем оптимального управления сложными энергоемкими объектами.

Для определения возможных видов синтезирующих функций в соответствии с принципом максимума находятся виды функций ОУ для задачи (3). В дальнейшем будем полагать, что собственные числа матрицы  $A$  вещественные и разные. Следовательно нетрудно показать, что всегда найдется такое значение массива (9), при котором базовая функция программного ОУ имеет вид

$$\bar{u}(t) = d_0 + d_1 e^{-\lambda_1 t} + d_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + d_n e^{-\lambda_n t}, \quad (10)$$

где  $d_i$  – параметры функции управления;  $\lambda_i$  – собственные числа матрицы  $A$ .

Считается, что функции ОУ при программной стратегии относятся к одному виду, если их параметры находятся решением одних и тех же уравнений, виды функции  $u_i^*(t)$  и  $u_j^*(t)$  различаются, если их параметры находятся решением разных систем уравнений. Известно, что если решение ЗОУ (3) существует, то конкретному значению массива  $R_0$  соответствует единственный вид функции ОУ.

Конкретное значение массива  $R_0$  можно представить точкой в некотором векторном пространстве  $R$  соответствующей размерности. Область значений данных  $R_0$  из  $R$ , в которой решение ЗОУ (3) существует, назовем областью существования и обозначим  $R_c$ , а часть области  $R_c$ , для которой имеет место ОУ  $j$ -го вида, обозначим  $R_j$ . Следовательно,

$$R_c = \bigcup_{j=1}^v R_j, \quad (11)$$

где  $v$  – множество видов функций ОУ.

В случае программного ОУ, то есть  $R_0 \in R_j$  и  $u_j^*(\bullet) = (u_{i\text{пр}}^*(t), t \in [t_0, t_k])$ , задавшись допустимым отклонением  $\delta u$ , всегда можно найти такой временной шаг квантования  $\delta t$  и синтезирующую функцию  $S_j(x, \tau, R_0)$ , что при отсутствии возмущений значения ОУ  $\forall t \in [t_0, t_k]$  при программной  $(u_{j\text{пр}}^*(t))$  и позиционной  $(u_{j\text{пз}}^*(t))$  стратегиях не будут различаться на величину больше  $\delta u$ .

При монотонном характере изменения зависимости (10) возможны пять видов синтезирующих функций:

$$S_j(x, \tau, R_{0j}) = \sum_{i=0}^n d_{ij}(R_{kj}), \quad j = 1, 2, 3; \quad R_{kj} \in R_{0j};$$

$$S_4(x, \tau, R_{04}) = u_{\text{в}}, \quad S_5(x, \tau, R_{05}) = u_{\text{н}},$$

при этом области существования  $R_j$ ,  $j = 1, 2, 3$  совпадают с областями для программного ОУ, область для  $S_4$  равна объединению  $R_4$  и  $R_6$ , а область для  $S_5$  – объединению  $R_5$  и  $R_7$ .

Аналитическое выражение синтезирующей функции можно получить, если найти зависимость параметров программного ОУ от скорректированного массива  $R$ .

Вид синтезирующей функции можно определить с помощью соотношений для границ областей  $R_j$  программного ОУ. Однако значительная размерность мас-

сива  $R$  не позволяет представить области  $R_c$  и  $R_j$  графически. Для снижения размерности  $R$  используем метод синтезирующих переменных [5, 7]. Размерность вектора синтезирующих переменных  $L$  равна  $l = n + \alpha$ , где  $\alpha$  – число параметров, содержащихся в матрице  $A$ . По аналогии с (11)

$$L_c = \bigcup_{j=1}^v L_j = \bigcup_{j=1}^5 L'_j.$$

Часть области  $L_c$ , в которой выполняются все ограничения конкретной ЗОУ, в том числе и частные, будем называть допустимой и обозначать  $L_{\text{доп}}$ . Если вектор  $L_0$ , рассчитанный по значению массива  $R_0$ , принадлежит области  $L_{\text{доп}}$ , то можно выбрать такое время квантования, что при отсутствии возмущений в процессе регулирования для всех моментов времени на интервале  $[t_0, t_k]$  ограничения (6) – (7) выполняются и выделенный лимит энергии не будет перерасходован.

### 3. Синтез энергосберегающих регуляторов

Основной задачей при синтезе энергосберегающих управляющих воздействий является определение вида и параметров синтезирующей функции по текущим значениям отклонений фазовых координат от требуемых значений. Алгоритм синтеза на каждом временном шаге содержит следующие операции:

- расчет значений синтезирующих переменных;
- определение вида синтезирующей функции;
- расчет параметров функции и управляющего воздействия.

Решение задач синтеза покажем на примере объекта второго порядка. Пусть динамика объекта описывается моделью:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t), \quad x = (x_1, x_2);$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,1 & -1,1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad u \in [-1; 1].$$

Для  $t_0 = 0$ ,  $t_k = 2$  при отклонениях  $x_1(0) = -0,6$ ,  $x_2(0) = -0,2$  синтезирующая функция имеет первый вид и управляющее воздействие после преобразования равно

$$u(j) = \Delta t_j \frac{\left[ \left( e^{2\Delta t_j} - 1 \right) L_{1j} + 10 \left( e^{0,2\Delta t_j} - 1 \right) L_{2j} - 1,82 \left( e^{1,1\Delta t_j} - 1 \right) \left( L_{2j} + L_{1j} \right) \right]}{10 \left( e^{2\Delta t_j} - 1 \right) \left( e^{0,2\Delta t_j} - 1 \right) - 3,31 \left( e^{1,1\Delta t_j} - 1 \right)^2},$$

где

$$L_{1j} = \frac{2e^{\alpha\Delta t_j}}{\Delta t_j(\beta - \alpha)} \left( \frac{\Delta t_j}{2} \beta \bar{l}_{1j} + \bar{l}_{2j} \right); \quad L_{2j} = \frac{2e^{\beta\Delta t_j}}{\Delta t_j(\beta - \alpha)} \left( \frac{\Delta t_j}{2} \alpha \bar{l}_{1j} + \bar{l}_{2j} \right);$$

$$\bar{l}_{1j} = \frac{4}{b\Delta u \Delta t_j} \left( -x_1(j) \left( (a_2 + \beta)e^{-\beta\Delta t_j} - (a_2 + \alpha)e^{-\alpha\Delta t_j} \right) - x_2(j) \left( e^{-\alpha\Delta t_j} - e^{-\beta\Delta t_j} \right) \right);$$

$$\bar{l}_{2j} = \frac{2}{b\Delta u} \left( -x_1(j)a_1 \left( e^{-\alpha\Delta t_j} - e^{-\beta\Delta t_j} \right) - x_2(j) \left( \beta e^{-\beta\Delta t_j} - \alpha e^{-\alpha\Delta t_j} \right) \right);$$

$$\alpha = -\frac{a_2}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{a_2^2 + 4a_1} = -1; \quad \beta = -\frac{a_2}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{a_2^2 + 4a_1} = -0,1.$$

В отсутствии возмущений при  $t \in [0; 2]$   $J_0 = 0,285$ , что в два раза меньше затрат энергии при максимальном быстродействии.

При решении задач анализа и синтеза ОУ использовалась многофункциональная информационно-инструментальная среда проектировщика энергосберегающих систем управления [8, 9], информационное обеспечение которой составляет гибридная экспертная система энергосберегающего управления, а программное обеспечение представлено пакетом программных модулей, в том числе для решения комплексов задач идентификации модели объекта управления, анализа и синтеза оптимального управления.

### Заключение

Для повышения экономической эффективности объектов малой энергетики необходимо использовать энергосберегающее управление энергоемкими тепловыми аппаратами на множестве состояний функционирования. Внедрение энергосберегающего управления позволит снизить затраты традиционных видов энергоносителей и сократить срок окупаемости объектов малой энергетики.

*Исследования выполнялись на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и государственного контракта № П292 «Разработка научно-технических основ создания интеллектуальных информационно-управляющих систем энергосберегающего управления распределением и потреблением энергии объектами малой энергетики».*

### Список литературы

1. Попель, О.С. Эффективность применения солнечных водонагревателей в климатических условиях средней полосы России / О.С. Попель // Энергосбережение. – 2001. – № 1. – С. 8–12.
2. Попель, О.С. Солнечная Россия / О.С. Попель, И.П. Прошкина // В мире науки. – 2006. – № 1. – С. 15–18.
3. Альтгаузен, А.П. Применение электронагрева и повышение его эффективности / А.П. Альтгаузен. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
4. Красовский, А.А. Справочник по теории автоматического управления / А.А. Красовский. – М. : Наука, 1987. – 712 с.
5. Муромцев, Ю.Л. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, Е.В. Сатина // Изв. вузов. Приборостроение. – 1993. – № 11–12. – С. 19–25.
6. Тюрин, И.В. Оптимальное управление ММО-объектами в пространстве состояний функционирования / И.В. Тюрин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – № 1. – С. 8–16.
7. Ляпин, Л.Н. Оптимальный по минимуму затрат энергии регулятор объекта двойного интегрирования / Л.Н. Ляпин, Ю.Л. Муромцев, О.В. Попова // Изв. РАН. Техн. кибернетика. – 1992. – № 2. – С. 39–46.
8. Муромцев, Ю.Л. Информационно-инструментальная среда разработки алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления промышленными объектами / Ю.Л. Муромцев, И.В. Тюрин // Проблемы упр. – 2007. – № 5. – С. 69–75.
9. Информационная среда проектирования систем ресурсосберегающего управления промышленным оборудованием / Д.Ю. Муромцев [и др.] // Програм. продукты и системы. – 2009. – № 4. – С. 99–104.

## Designing of Energy-Saving Regulators for Objects of Small Power Engineering

D.Yu. Muromtsev, I.V. Tyrin, R.V. Grebennikov

*Department «Designing of Radio Electronic and Microprocessor Systems», TSTU;  
tyrinilja@crems.jesby.tstu.ru*

**Key words and phrases:** additional source of thermal energy; energy saving; energy saving regulator; helio systems; modular boiler-houses; optimum control; solar water-heating installations.

**Abstract:** The paper deals with the problems of energy-saving management of thermal apparatuses in small power engineering and the basic ways of their solution. The methods of designing energy saving regulators aimed at the improvement of energy efficiency installations for small power engineering are observed.

---

### Entwicklung der energiesparenden Regulatoren für die Objekte der kleinen Energiewirtschaft

**Zusammenfassung:** Es werden die Probleme der energiesparenden Steuerung von den Wärmeapparaten in der kleinen Energiewirtschaft und die Wege ihrer Lösungen beschrieben. Es werden die Methoden der Entwicklung der energiesparenden Regulatoren für die Erhöhung der Energieeffektivität der Objekte der kleinen Energiewirtschaft betrachtet.

---

### Construction des régulateurs économes pour les objets de la petite énergétique

**Résumé:** Sont éclairés les problèmes de la commande des appareils thermiques dans la petite énergétique et les voies essentielles de leur résolution. Sont examinées les méthodes de la construction des régulateurs économes pour l'augmentation de l'efficacité énergétique des objets de la petite énergétique.

---

**Авторы:** *Муromцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Турин Илья Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Гребенников Роман Васильевич* – ассистент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ГОУ ВПО «ТГТУ».