

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО  
КОМПЛЕКСА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ\*

Д. Ю. Муромцев<sup>1</sup>, А. Н. Грибков<sup>1</sup>, А. А. Чуриков<sup>2</sup>, И. И. Пасечников<sup>3</sup>

*Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных  
и микропроцессорных систем» (1); crems@crems.jesby.tstu.ru;  
«Мехатроника и технологические измерения» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
кафедра теоретической и экспериментальной физики,  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет  
им. Г. Р. Державина» (3)*

**Ключевые слова:** алгоритмы анализа и синтеза энергосберегающего управления; программно-аналитический комплекс; системы энергосберегающего управления.

**Аннотация:** Рассмотрены особенности построения программно-аналитического комплекса проектирования систем энергосберегающего управления. Отмечено, что программно-аналитический комплекс позволяет автоматизировать основные этапы разработки алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления, а также обеспечивает минимизацию времени, затрачиваемого на определение оптимальных видов функций оптимального управления и визуализацию результатов решения задачи энергосберегающего управления применительно к конкретному объекту.

---

### Введение

Исследование вопросов проектирования и практической реализации систем энергосберегающего управления (СЭУ) является актуальной задачей, поскольку внедрение таких систем на промышленных предприятиях позволяет снизить материальные и энергетические затраты на производство, повысить качество выпускаемой продукции, сократить уровень загрязнения окружающей среды и т.д.

При проектировании СЭУ, значительное количество времени тратится на разработку ее алгоритмического обеспечения, что связано с высокой степенью «наукоемкости» данного процесса и необходимостью применения методов из областей высшей математики, теории оптимальных процессов, теории алгоритмов и т.д.

В данной статье рассматриваются методологические аспекты построения программно-аналитического комплекса (ПАК) проектирования СЭУ, созданного

---

\* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (см. 2015. Т. 21, № 3).

на кафедре «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем». Разработанный ПАК дополняет экспертную систему «Энергосберегающее управление динамическими объектами» [1]. Практическое применение ПАК позволяет значительно сократить затраты времени на проектирование СЭУ, а также снизить требования к знаниям разработчиков систем управления за счет автоматизации основных этапов разработки алгоритмического обеспечения СЭУ (идентификации моделей объекта управления; полного анализа задач оптимального управления (ЗОУ); разработки алгоритмов синтеза оптимальных управляющих воздействий и др.).

### **Математический и методический аппарат программно-аналитического комплекса**

Математический и методический аппараты, используемые в ПАК, основываются на применении следующих методов и алгоритмов на основных этапах проектирования СЭУ для конкретного объекта:

1) на этапе постановок задач применяются методы представления ЗОУ на множестве состояний функционирования (МСФ) [2]. При этом, во всем множестве состояний функционирования выделяют два подмножества: наиболее вероятных и критических состояний. Первое подмножество включает состояния с нормальной работоспособностью элементов СЭУ; второе содержит все состояния с отказами технических средств. На более поздних этапах проектирования СЭУ, обеспечивающих решение ЗОУ на МСФ, создается алгоритмическое обеспечение, включающее модели и алгоритмы управления для наиболее вероятных состояний, а также возможные действия системы при критических состояниях функционирования;

2) на этапе идентификации математических моделей объектов управления применяются методы, обеспечивающие определение структуры и параметров математических моделей многомерных объектов на МСФ [3], а также оценивается адекватность полученных моделей. При этом понятие адекватности модели для использования в СЭУ рассматривается не только с точки зрения обеспечения требуемой точности. Помимо этого, адекватная модель должна: обеспечивать принципиальную возможность решения ЗОУ с данной моделью и имеющимися в базе знаний СЭУ алгоритмами анализа и синтеза оптимального управления (ОУ); иметь определенную устойчивость решений ЗОУ к незначительным изменениям параметров модели; иметь допустимые характеристики быстродействия для реализации алгоритмов синтеза ОУ в реальном времени и т.д.;

3) на этапе полного анализа ЗОУ применяются: аналитико-графический метод исследования области существования решения задачи оптимального управления многомерным объектом [4]; методы и алгоритмы получения видов функций оптимального программного и позиционного управлений на основе метода синтезирующих переменных [5] и принципа максимума Понтрягина;

4) на этапе разработки алгоритмов синтеза оптимальных управляющих воздействий возможно применение следующих алгоритмов:

- помехоустойчивого управления с оптимальной фильтрацией [6];
- помехоустойчивого управления с прогнозирующей моделью [7];
- аналитического конструирования оптимальной программы управления [8];
- интеллектуального управления на основе нечеткой логики [9];
- робастного управления [10];
- адаптивного управления [11] и др.

Для выбора оптимального алгоритма оптимального управления для различных состояний функционирования объекта управления применяется методика, подробно рассмотренная в [12], а для анализа работоспособности алгоритмического обеспечения СЭУ – методика, рассмотренная в [13].

Программная реализация разработанного при помощи ПАК алгоритмического обеспечения СЭУ возможна как с использованием специальных средств, предназначенных для создания систем автоматизации и управления, например, SCADA-систем, так и с применением инструментальных средств на основе CASE- и RAD-технологий.

### **Особенности построения и основные компоненты программно-аналитического комплекса проектирования систем энергосберегающего управления**

Разработанный ПАК полностью интегрирован с экспертной системой «Энергосберегающее управление динамическими объектами» и использует при работе как собственные программные модули, так и модули, входящие в экспертную систему.

ПАК состоит из следующих подсистем и программных компонентов:

- подсистемы формализации и постановки ЗОУ на МСФ, включающей модули, обеспечивающие информационную поддержку формализации и математической постановки ЗОУ при известных и неполных исходных данных;

- подсистемы идентификации модели объекта управления, состоящей из модулей, обеспечивающих решение задачи структурной и параметрической идентификации модели объекта управления, а также графической интерпретации данных;

- подсистемы полного анализа ЗОУ, включающей модули графического построения и исследования области существования решения ЗОУ, выделения возможных видов функций ОУ и получения соотношений для расчета их параметров;

- подсистемы синтеза алгоритмов управления, включающей модули синтеза оптимального алгоритма управления, планирования эксперимента и имитационного моделирования;

- подсистемы поддержки принятия проектных решений;

- интеллектуальной базы знаний, состоящей из фреймов и продукционных правил, реализующих алгоритмическое обеспечение ПАК;

- реляционной базы данных, предназначенной для хранения исходных данных и результатов работы ПАК;

- интегрированной среды разработки, позволяющей инженерам и экспертам вносить изменения в базу знаний ПАК (вносить изменения в существующие и добавлять новые методы и алгоритмы);

- подсистемы пользовательского интерфейса, обеспечивающей наглядный и доступный графический интерфейс для ввода исходных данных и вывода результатов работы ПАК, которая также включает модуль когнитивной графики, обеспечивающей наглядную визуализацию решения ЗОУ.

Модульная архитектура ПАК обеспечивает достаточно простой механизм расширения функциональности комплекса за счет добавления новых подсистем и модулей. При этом практически все подсистемы и модули ПАК могут работать как во взаимодействии друг с другом (обеспечивая «сквозное» проектирование алгоритмического обеспечения СЭУ), так и независимо (автономно).

### **Заключение**

Программные модули, входящие в состав ПАК, использовались при разработке ряда СЭУ, например [14 – 16]. Их применение позволило значительно сократить затраты времени на проектирование СЭУ за счет автоматизации и информационной поддержки основных этапов разработки алгоритмического обеспечения СЭУ.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-08-00489-а.*

### *Список литературы*

1. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 950464. Экспертная система «Энергосберегающее управление динамическими объектами» (EXPSYS) / Ю. Л. Муромцев, Л. П. Орлова, В. В. Орлов, А. В. Федоров, С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев. – Зарег. 19.12.95.
2. Муромцев, Ю. Л. Моделирование и оптимизация технических систем при изменении состояний функционирования / Ю. Л. Муромцев, Л. Н. Ляпин, О. В. Попова. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1992. – 164 с.
3. Артемова, С. В. Математическая модель многосекционной сушильной установки на множестве состояний функционирования / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т.12, № 4А. – С. 969 – 974.
4. Грибков, А. Н. Аналитико-графический метод исследования области существования решения задачи оптимального управления многомерным объектом / А. Н. Грибков, И. А. Куркин // Информатика и системы управления. – 2011. – № 3(29). – С. 141 – 152.
5. Муромцев, Ю. Л. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами / Ю. Л. Муромцев, Л. Н. Ляпин, Е. В. Сатина // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. – 1993. – № 11–12. – С. 19 – 25.
6. Артемова, С. В. Влияние интенсивности помех на минимизируемый функционал при энергосберегающем управлении с оптимальной фильтрацией / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 3. – С. 402 – 409.
7. Артемова, С. В. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 632 – 637.
8. Артемова, С. В. Информационная технология аналитического конструирования энергосберегающего управления / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. / под ред. проф. В. М. Тютюнника. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена, 2004. – Вып. 2. – С. 48 – 52.
9. Артемова, С. В. Информационная технология анализа и синтеза энергосберегающего управления с использованием нечеткой логики / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. / под ред. проф. В. М. Тютюнника. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена, 2003. – Вып. 1. – С. 165 – 169.
10. Артемова, С. В. Система робастного энергосберегающего управления процессами нагрева / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Пром. АСУ и контроллеры. – 2006. – № 5. – С. 31 – 34.
11. Грибков, А. Н. Алгоритм ресурсосберегающего управления динамическими режимами многосекционных сушильных установок / А. Н. Грибков, С. В. Артемова // Изв. Том. политехн. университета. – 2008. – Т. 313, № 4. – С. 48 – 50.
12. Артемова, С. В. Информационная технология синтеза оптимальной структуры алгоритмического обеспечения системы энергосберегающего управления / С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 4. – С. 14 – 19.
13. Муромцев, Ю. Л. Методика анализа работоспособности алгоритмического обеспечения систем энергосберегающего управления / Ю. Л. Муромцев, А. Н. Грибков, А. В. Петров // Изв. Том. политехн. университета. – 2009. – Т. 314, № 5. – С. 44 – 48.
14. Грибков, А. Н. Информационно-управляющая система динамическими режимами в многосекционных сушильных установках / А. Н. Грибков // Информатика и системы управления. – 2009. – № 2(20). – С. 123 – 129.

15. Тюрин, И. В. Анализ и оперативный синтез энергосберегающего управления многозонными электрическими печами / И. В. Тюрин // Автоматизация в промышленности. – 2005. – № 3. – С. 12 – 14.

16. Белоусов, О. А. Интеллектуальная радиоэлектронная система энергосберегающего управления электрокамерными печами / О. А. Белоусов, Н. А. Кольтюков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 4 – 8.

---

## Methodological Aspects of Building Software-Analytical Complex for Design of Energy-Saving Control Systems

D. Yu. Muromtsev<sup>1</sup>, A. N. Gribkov<sup>1</sup>, A. A. Churikov<sup>2</sup>, I. I. Pasechnikov<sup>3</sup>

Department "Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems" (1); [crems@crems.jesby.tstu.ru](mailto:crems@crems.jesby.tstu.ru);  
Department "Mechatronics and Measurement Technology" (2), TSTU;  
Department of Theoretical and Experimental Physics,  
Derzhavin Tambov State University (3)

**Keywords:** algorithms for analysis and synthesis of energy-saving control; software and analytical complex; systems of energy-saving control.

**Abstract:** The article describes the features of building a programmable analytical complex for design of energy-saving control systems. Software-analytical complex allows for automation of the development of basic stages of algorithmic support of energy-saving control systems and minimizes the time spent on the definition of best features of optimal control and visualization of the results of problem-solving of energy saving control in relation to a specific object.

### References

1. Muromtsev Yu.L., Orlova L.P., Orlov V.V., Fedorov A.V., Artemova S.V., Muromtsev D.Yu. *Ekspertnaya sistema "Energoberegayushchee upravlenie dinamicheskimi ob"ektami" (EXPSYS)* (The expert system "Energy-efficient control of dynamic objects" (EXPSYS)), Russian Federation, 1995, Certificate of official registration of the computer program 950464.

2. Muromtsev Yu.L., Lyapin L.N., Popova O.V. *Modelirovanie i optimizatsiya tekhnicheskikh sistem pri izmenenii sostoyanii funktsionirovaniya* (Modeling and optimization of technical systems under the changes of the functioning state), Voronezh: Izdatel'stvo Voronezhskogo universiteta, 1992, 164 p.

3. Artemova S.V., Gribkov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 4A, pp. 969-974.

4. Gribkov A.N., Kurkin I.A. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2011, no. 3(29), pp. 141-152.

5. Muromtsev Yu.L., Lyapin L.N., Satina E.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 1993, no. 11-12, pp.19–25.

6. Artemova S.V., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 402-409.

7. Artemova S.V., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 632-637.

8. Artemova S.V., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. *Informatsionnye sistemy i protsessy* (Information systems and processes), Tambov, Moscow, St. Petersburg, Baku, Vienna, 2004, issue 2, pp. 48-52.

9. Artemova S.V., Gribkov A.N. *Informatsionnye sistemy i protsessy* (Information systems and processes), Tambov, Moscow, St. Petersburg, Baku, Vienna, 2003, issue 1, pp. 165-169.

10. Artemova S.V., Gribkov A.N. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2006, no. 5, pp. 31-34.
  11. Gribkov A.N., Artemova S.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 4, pp. 48-50.
  12. Artemova S.V., Gribkov A.N. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2010, no. 4, pp. 14-19.
  13. Muromtsev Yu.L., Gribkov A.N., Petrov A.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 5, pp. 44-48.
  14. Gribkov A.N. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2009, no. 2(20), pp. 123-129.
  15. Tyurin I.V. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2005, no. 3, pp. 12-14.
  16. Belousov O.A., Kol'tyukov N.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2007, no. 12, pp. 4-8.
- 

### **Methodologische Aspekte der Konstruktion des programmanalytischen Komplexes der Projektierung der Systeme der energiesparenden Steuerung**

**Zusammenfassung:** Es sind die Besonderheiten der Konstruktion des programmanalytischen Komplexes der Projektierung der Systeme der energiesparenden Steuerung betrachtet. Der programmanalytische Komplex lässt zu, die Hauptentwicklungsstadien der algorithmischen Versorgung der Systeme der energiesparenden Steuerung zu automatisieren, sowie gewährleistet die Minimierung der Zeit, die auf die Bestimmung der optimalen Arten der Funktionen der optimalen Steuerung und die Visualisierung der Ergebnisse der Lösung der Aufgabe der energiesparenden Steuerung in Bezug auf das konkrete Objekt verbraucht wird.

---

### **Aspects méthodologiques de la construction du complexe de programme analytique pour la conception des systèmes de gestion de l'économie d'énergie**

**Résumé:** Sont examinées les caractéristiques de la construction du complexe de programme analytique pour la conception des systèmes d'économie d'énergie de la gestion. Le complexe de programme analytique permet d'automatiser les étapes essentielles du traitement de l'équipement algorithmique des systèmes d'économie d'énergie de contrôle, et donne également la possibilité de minimiser le temps dépensé pour la définition des meilleures types des fonctions de la gestion optimale et pour la visualisation des résultats de la résolution du problème de l'économie d'énergie de la gestion appliquée à un objet spécifique.

---

**Авторы:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научно-инновационной деятельности; *Грибков Алексей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Пасечников Иван Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина».

**Рецензент:** *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».