

8. *Snodgrass R.* The temporal query language TQuel // ACM Trans. on Database System (TODS). – 1987. – Vol. 12, № 2. – P. 247-298.
9. *Snodgrass R.* The TSQL2 Temporal Query Language. – Springer Science Business Media, LLC. – 1995. – 647 p.
10. *Новиков Б.А., Горшкова Е.А.* Темпоральные базы данных: от теории к практическому использованию // Программирование. – 2008. – Т. 34, № 1. – С. 1-6.
11. *Al-Kateb M., Ghazal A., Crottle A., Bhashyam R., Chimanchode J., Pakala S.P.* Temporal query processing in Teradata // EDBT'13 Proc. of the 16h Int. Conf. on Extending Database Technology. – 2013. – P. 573-578.
12. *Kulkarny K., Michels J.-E.* Temporal features in SQL: 2011 // ACM SIGMOD'12. – 2012. – Vol. 41, № 3. – P. 34-43.
13. *Robertson S.E.* The Probability Ranking Principle in IR // Readings in information retrieval. Morgan Kaufmann Publishers Inc. – San Francisco, 1997. – P. 281-286.
14. *Aurenko V., Croft W.B.* Relevance-based language models // In Proceeding of SIGIR 2001. – 2001. – P. 120-127.
15. *Бутакова М.А., Климанская Е.В., Янц В.И.* Мера информационного подобию для анализа слабоструктурированной информации // Современные проблемы науки и образования (электронный научный журнал). – 2013. – № 6.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Э.А. Мамаев.

**Бутакова Мария Александровна** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»; e-mail: butakova@rgups.ru; 344006, г. Ростов-на-Дону, пл. им. Ростовского Стрелкового Полка Народного ополчения, 2; тел.: 88632726543; кафедра информатики; профессор.

**Ковалев Сергей Михайлович** – e-mail: ksm@rfniias.ru; тел.: 88632726302; кафедра автоматки и телемеханики на железнодорожном транспорте; профессор.

**Климанская Елена Владимировна** – e-mail: elenaklimanskaja@mail.ru; тел.: 88632726543; кафедра информатики; аспирантка.

**Butakova Maria Aleksandrovna** – Federal State-Owned Budget Educational Establishment of Higher Vocational Education “Rostov State Transport University”; e-mail: butakova@rgups.ru; 2, square n.a. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenija, Rostov-on-Don, 344006, Russia; phone: +78632726543; the department of informatics; professor.

**Kovalev Sergey Mikhailovich** – e-mail: ksm@rfniias.ru; phone: +78632726543; the department of automatics and telemechanics on railway transport; professor.

**Klimanskaya Elena Vladimirovna** – e-mail: elenaklimanskaja@mail.ru; phone: +78632726543; the department of informatics; postgraduate student.

УДК 519.7

**В.И. Финаев, Е.Н. Павленко, С.В. Кирильчик**

### **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ\***

*При решении задач управления многими производственными процессами и объектами существует сложность в разработке эффективной системы управления, связанная с наличием неопределённости в исходных данных. Эти неопределённости могут касаться параметров объекта, условий его функционирования, возмущений от внешней среды, неопреде-*

---

\* Материалы статьи подготовлены в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда № 14-19-01533

лённости целей и прочее. Применение классической теории управления в этих условиях не даёт хороших результатов. Задачу управления следует решать с применением гибридных регуляторов. В материалах статьи выполнен анализ методов синтеза гибридных систем управления. Сделан вывод об отсутствии взаимодействия в гибридной системе между такими моделями, как классический алгоритм энергосберегающего управления и алгоритм с нечёткой логикой. Рассмотрен подход и приведён алгоритм синтеза интеллектуальной гибридной системы управления. Основу гибридизации составляют закон взаимной адаптации, закон дискретных рядов структур и закон трансформаций. Интеллектуальная гибридная система управления определяется законом трансформации. Приведена структура двухуровневой гибридной системы управления и рассмотрен вариант решения задачи управления.

*Управление; неопределённость; гибридная система; моделирование; искусственный интеллект; корректировка параметров; нечёткий регулятор.*

**V.I. Finaev, E.N. Pavlenko, S.V. Kirilchik**

### **SOLVING THE CONTROL PROBLEMS USING THE INTELLIGENT HYBRID SYSTEMS**

*In solving problems of many production processes and objects control there is a difficulty in the development of an effective control system, related to the uncertainties in the input data. These uncertainties can relate to object parameters, conditions its functioning, disturbances from the environment, uncertainties of goals and others. The classical control theory applying in these conditions doesn't give good results. The control problem should be solved with the use of hybrid controllers. The analysis of synthesis of hybrid control systems methods was made in the materials of the article. It was concluded that there is no interaction in a hybrid system between models as classical algorithm and energy-saving control algorithm with fuzzy logic. The approach was considered and an algorithm of the synthesis of hybrid intelligent control system was shown. The mutual adaptation law, the law of series of discrete structures and transformations law are the basis of the hybridization. Intelligent hybrid control system is determined by the transformation law. The structure of a two-level hybrid control system was shown and the solving variants of the control problem was considered.*

*The control; the uncertainty; the hybrid system; the modelling; the artificial intelligence; the adjustment parameters; the fuzzy controller.*

**Введение.** Нестабильность параметров объекта управления и изменяющиеся требования к качеству регулирования в процессе работы являются основными причинами, препятствующими повышению качества регулирования многими техническими объектами. Применение классической теории автоматического управления возможно при известной аналитической модели объекта и регулятора [1]. Определить адекватную аналитическую модель объекта управления далеко не всегда можно, поэтому решать задачу управления приходится в условиях недостатка информации – неопределённости. В условиях неопределённости применение классической теории автоматического управления не даёт требуемых результатов.

Для решения задач управления в условиях неопределённости применяют интеллектуализированные гибридные системы управления, отличающиеся особенностью одновременного использования преимуществ традиционных средств управления и методов искусственного интеллекта [2-7]. Применение гибридных систем управления является актуальной задачей в настоящее время и находит широкое применение, в частности, при управлении энергетическими объектами [8].

Актуальной остаётся задача проектирования и моделирования гибридных систем управления, чему и посвящена настоящая работа, поэтому вначале рассмотрим существующие определения и достоинства систем этого вида.

**Определение гибридной системы управления.** Для гибридной системы управления состояние определяется непрерывной и дискретной переменной, причём, непрерывная динамика системы задаётся дифференциальными уравнениями, а дискретная динамика характеризуется применением передаточной функцией с

конечным количеством состояний [2]. Непрерывный и дискретный процессы взаимодействуют в моменты, когда текущее состояние системы достигает некоторых заданных множеств в непрерывном пространстве состояний. Первое определение модели гибридной системы было приведено в работах Визенхаузена в 1966, суть которого не претерпела существенных изменений, а именно, модель гибридной системы определена в виде набора:

$$H_w = \langle M, \Omega, f, d, \omega, J \rangle, \quad (1)$$

где  $M, \Omega$  – конечные множества (дискретные пространства) состояний и выходов соответственно;  $f: M \times R^n \rightarrow R^n$  – непрерывная функция перехода от двух аргументов;  $R$  – множество действительных чисел;  $R^n$  – пространство непрерывных состояний размерности  $n$ ;  $d: M \times J \rightarrow M$  – дискретная функция перехода, вычисляющая очередное значение дискретной компоненты состояния, когда значение непрерывной компоненты состояния достигло одного из переходных множеств;  $\omega: M \rightarrow \Omega$  – функция выхода и  $J \in P(R^n)$  – множество переходных множеств.

Согласно определению (1), гибридное состояние определяется в виде вектора  $(m, x) \in M \times R^n$ . Достоинство модели (1) состоит в возможности представления гибридного состояния для имитации неоднородности в поведении системы, позволяющей комбинировать плавные изменения значений состояний  $x$  в соответствии с аналитической моделью, со скачками значений состояний в соответствии с теоретико-множественными представлениями функции переходов, определёнными знаниями экспертов.

В работе [3] рассмотрен класс гибридных систем с дискретной частью, основанной на знаниях. Динамика системы представлена в виде уравнения:

$$S(t+1) = (\cup F_j(t) \cup \psi(\varphi(S(i), U(i), R_D), R_S)), \quad (2)$$

где  $\cup$  – операция объединения берётся по всем  $j \leq t+1$  и всем  $i \leq t$ ,  $U(i)$  – факт, добавляемый в состояние  $S(i)$ , который называется управлением;  $R_S$  и  $R_D$  – компоненты базы правил, содержащие правила замыкания и перехода соответственно;  $\psi$  и  $\varphi$  – процедуры управления выполнением правил из множеств  $R_S$  и  $R_D$  соответственно.

В базе правил изменения (переходов) состояния  $R_D$  определяются действия исполнительного органа во внешней среде или действия по изменению состояния  $DB_1, \dots, DB_n$  базы данных  $DB$ . В базе правил  $R_S$  содержатся знания экспертов о внешней среде.

Функционирование гибридной системы начинается с определения начального состояния, исходя из начального множества условий (фактов). Затем реализуются процессы, для которых известны параметры объекта и можно применять правила  $R_S$ . Процесс применения правил  $R_S$  прекращается после перебора применяемых правил или стабилизации состояния, определённого базой данных  $DB$ . Следовательно, каждое состояние модели определено решением уравнения неподвижной точки  $\psi(S) = S$ . С таким «стабилизировавшимся» состоянием  $S$  работает процедура  $\varphi$ , применяющая экспертные правила  $R_D$  к  $S_i$ . После перевода модели из состояния  $S(t)$  в состояние  $S(t+1)$  к последнему снова применяется процедура замыкания  $\psi$ .

Достоинство модели (2) состоит в адаптации к изменениям среды и устойчивость к априорной полноте описания состояния. Законы поведения могут иметь как аналитическое задание, так и задаваться множеством эмпирических или экспертных правил и связей.

Для гибридной системы управления характерно наличие интеллектуальной составляющей, которую следует рассматривать, как систему поддержки принятия решений реального времени, или, согласно работе [5], как семиотическую систему распределённого интеллекта:

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle, \quad (3)$$

где  $M = \{M_i\}$  – множество логико-лингвистических моделей, реализующих интеллектуальные функции;  $R(M)$  – функция выбора необходимой модели (моделей) в текущей ситуации;  $F(M) = \{F(M_i)\}$  – множество функций модификации моделей;  $F(SS)$  – функция модификации системы  $SS$ , её базовых конструкций  $M, R(M), F(M)$ .

Достоинство модели (3) состоит в обеспечении адаптивности, а также возможности распределённой и параллельной обработки информации.

**Алгоритмы проектирования интеллектуальной гибридной системы управления.** Существуют разные подходы к решению задач управления с применением интеллектуальных гибридных систем. Например, в работе [6] рассматривается решение задачи энергосберегающего управления электрокамерными печами с применением аппарата нечёткой логики и использованием гибридного регулятора, в работе [8, 9] в качестве объекта управления взяты двигатели парогенераторной установки УПГ-50/6М для нефтепромысла, расположенного на полуострове Мангышлак.

Анализ известных моделей свидетельствует об отсутствии взаимодействия в гибридной системе между такими моделями, как классический алгоритм энергосберегающего управления и алгоритм с нечёткой логикой, что подтверждает актуальность дальнейших исследований в области проектирования систем этого вида и моделирования их поведения. Общим для существующих подходов является синтез мультисистем с многомодульной архитектурой.

Для проектирования интеллектуальной гибридной системы управления с применением методов искусственного интеллекта и при отсутствии априорного необходимого описания состояния и структуры системы основная задача - проектирование базы знаний о предметной области. Если исходить из результатов работы [9], то, как обобщение, можно рассматривать алгоритм построения интеллектуальной гибридной системы управления, который включает последовательность этапов.

Этап 1. Анализ объектов для определения степени сложности задачи управления.

Этап 2. Синтез гибридной модели и её компонент на основе аналитических моделей систем автоматического управления и моделей систем принятия решений (разработка функциональных схем, алгоритмов, моделей, информационного обеспечения, программ управления и т.д.).

Этап 3. Формирование базы знаний и базы правил экспертов с учётом изменений параметров объекта, требований к качеству управления.

Этап 4. Разработка имитационной модели гибридной системы с целью проведения различных экспериментальных исследований.

Этап 5. Моделирование отдельных подсистем интеллектуальной гибридной системы управления с целью определения возможности использования автономных моделей в рамках гибридной системы для управления дополнительными объектами.

Этап 6. Анализ адекватности модели разработанной интеллектуальной гибридной системы, качества экспериментальных исследований с целью сравнения полученных экспериментальных данных и доказательства эффективности разработанных подходов, методов, алгоритмов при проектировании гибридной системы.

Этап 7. Доработка модели с целью повышения её эффективности и возможности использования для решения других классов задач.

Основу гибридизации составляют закон взаимной адаптации, закон дискретных рядов структур и закон трансформаций [10]. Интеллектуальная гибридная система управления содержит два уровня и рассматривается, как система обработки и взаимодействия данных (рис. 1).

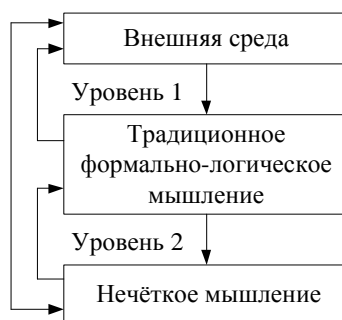


Рис. 1. Двухуровневая система обработки и взаимодействия данных

Первый уровень основан на методах классической теории управления. На втором уровне используется моделирование с применением нечёткой логики с целью получения управляющего воздействия на объект и позволяющее в совокупности с полученными результатами первого уровня исследовать различные аспекты неопределённости.

В результате появляется задача моделирования двухуровневой интеллектуальной системы управления, для которой характерно объединение классической теории управления и методов нечёткой логики при управлении технологическими объектами в условиях неполноты исходных данных. Блок-схема, показанная на рис. 2, соответствует модели при совместном применении классического и нечёткого регуляторов.

Согласно схеме на рис. 2, работа классического алгоритма управления позволяет получить данные для формирования базы правил нечёткой модели, причём, качество регулирования определено полнотой базы правил для нечёткого регулятора, что связано с компетентностью эксперта.

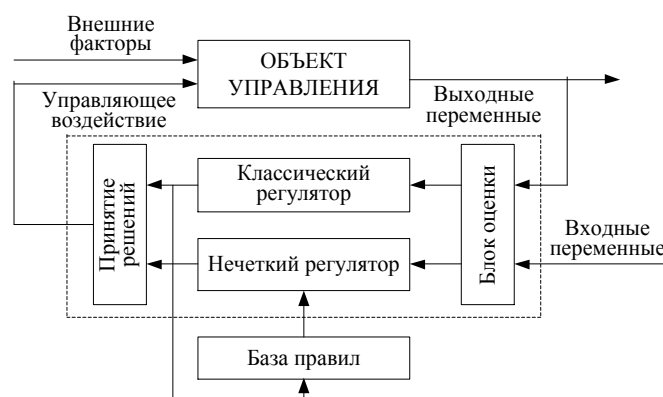


Рис. 2. Блок-схема гибридной системы управления

В работах [10, 11] показано, что в знаниях, оцениваемых экспертами, применены переменные классической модели системы автоматического управления: отклонение системы  $\theta$ , скорость изменения отклонения  $\dot{\theta}$ ; интеграл отклонения  $\int \theta dt$ ; ускорение отклонения  $\ddot{\theta}$ , определённые в виде лингвистических переменных. Управляющее воздействие  $U$  на объект определяется алгоритмом модели принятия решений с учётом реальных значений параметров объекта и внешней среды.

Суть алгоритма решения задачи управления представлена на рис. 3.

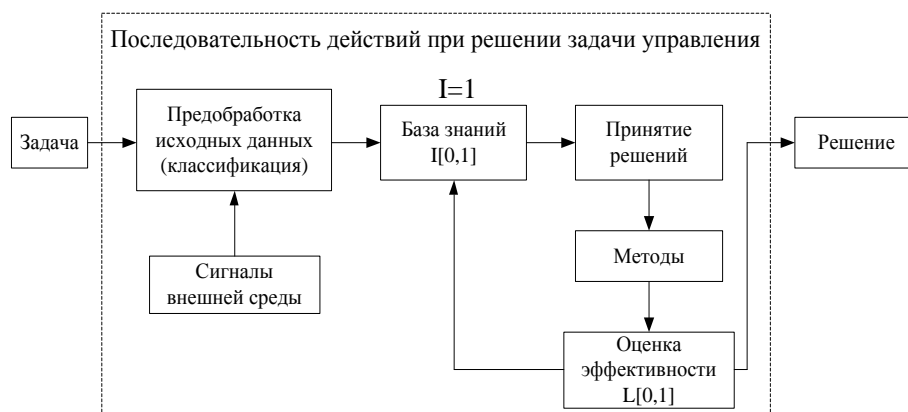


Рис. 3. Последовательность действий при решении задачи управления

Решение задачи управления с применением интеллектуальной гибридной системы основано на методе классической теории автоматического управления (метод 1) и на эвристическом методе (метод 2 – применение моделей принятия решений). Для упрощения записи алгоритма моделирования гибридной системы определим идентификаторы:

- применение метода 1 соответствует значению идентификатора  $I = 1$ ;
- невозможность применения метода 1 соответствует значению идентификатора  $I = 0$ ;
- положительная оценка эффективности решения задачи управления соответствует значению идентификатора  $L = 1$ ;
- отрицательная оценка эффективности – значению идентификатора  $L = 0$ .

Этапы моделирования гибридной системы управления имеют следующую структуру.

П. 1. Реализуется постановка задачи с описанием входных и выходных данных, используемых для её решения.

П. 2. Сбор информации. Принимаемые сигналы от внешней среды являются входными воздействиями для блока предобработки исходных данных.

П. 3. Предварительная обработка исходных данных, т.е. классификация методов, используемых в гибридной системе с целью подготовки информации для принятия решения о выборе метода.

П. 4. Формирование базы знаний в виде математического описания объектов исследуемой системы.

П. 5. Принятие решения о выборе метода решения задачи управления. Применительно к рассматриваемой задаче необходимо понимание: достаточно ли знаний получено после выполнения первого метода, чтобы продолжить выполнение процесса решения задачи управления, поэтому, если выполняется условие  $I = 1$ , то происходит переход к П. 7, иначе ( $I = 0$ ) переход к П. 6.

- П. 6. Реализация классического метода гибридной системы.
- П. 7. Реализация нечёткого метода гибридной системы.
- П. 8. Оценка эффективности принятого решения. Если выполняется условие  $L = 1$ , то происходит переход к П. 10, иначе ( $L = 0$ ) переход к П. 9.
- П. 9. Корректировка результатов для продолжения решения.
- П. 10. Завершение работы алгоритма, вывод решения.

Рассмотренные этапы моделирования представляют собой многоаспектное исследование, соответствуют известным определениям интеллектуальной гибридной системы управления и представляют собой фактически гибридный метод для решения задачи управления объектами в условиях неопределённости.

**Заключение.** В результате выполненных исследований для решения задач управления в условиях неопределённости разработаны этапы проектирования интеллектуальной гибридной системы управления и определено понятие двухуровневой системы обработки и взаимодействия данных при решении задачи управления. Задача моделирования гибридной системы управления решается путём объединения классической теории управления и методов нечёткой логики для управления технологическими объектами в условиях неполноты исходных данных. Приведены этапы моделирования гибридной системы управления. Научная новизна исследований состоит в разработке алгоритмов проектирования интеллектуальной гибридной системы управления, а практическая полезность выполненной работы определена возможностью применения разработанных алгоритмов для выбора параметров гибридной системы управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бесекецкий В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
2. *Гаврилов А.В.* Гибридные интеллектуальные системы: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 142 с.
3. *Medsker L.R.* Hybrid Intelligent Systems // International Journal of Computational Intelligence and Organizations. – 1996. – Vol. 1. – P. 10-20.
4. *Yan H.H* Power system security assessment using a hybrid expert system: neural network architecture / Proc. of IEEE. ISCS. New York. – 1992. – P. 1713-1716.
5. *Вагин В.Н., Еремеев А.П.* Реализация концепции распределенного ИИ и многоагентности в системах поддержки принятия решений на базе комплекса G2+GDA // Труды Междун. семинара «Распределённый искусственный интеллект и многоагентные системы – DIAMAS 97». – СПб., 1997.
6. *Белюсов О.А.* Гибридный регулятор для энергосберегающего управления электрокамерными печами // Промышленные контроллеры АСУ. – 2005. – № 7. – С. 29-30.
7. *Funabashi M.* Fuzzy and neural hybrid expert systems: synergetic AI // AI in Japan; IEEE Expert. – 1995. – P. 32-40.
8. *Goonatilake S., Khebbal S.* Intelligent Hybrid Systems // Intelligent Hybrid Systems. 1995. / Ed. – ISBN 0471942421.
9. *Финаев В.И., Игнатьев В.В.* Системы управления на основе объединения классической и нечеткой моделей объекта. – М.: Физматлит, 2013. – 156 с.
10. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
11. *Игнатьев В.В.* Синтез цифровых регуляторов системы управления двигателем постоянного тока // Вопросы специальной электроники: сборник научно-тематических статей / под ред. А.А. Федотова. Серия Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР). Вып. 2. Москва – Таганрог, 2011. – С.138-146.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Финаев Валерий Иванович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: finaev\_val\_iv@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Павленко Елена Николаевна** – к.т.н.; соискатель.

**Кирильчик Светлана Валерьевна** – к.т.н.; соискатель.

**Finaev Valeri Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: fin\_val\_iv@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

**Pavlenko Elena Nikolaevna** – cand. of eng. sc.; competitor.

**Kirilchik Svetlana Valentinovna** – cand. of eng. sc.; competitor.

УДК 621.82: 621.397

**Л.К. Самойлов, С.А. Киракосян**

### **ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ УСТРОЙСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

*Рассматриваются динамические погрешности восстановленного сигнала как сумма частных производных интеграла сигнала на выходе ЦАП за период дискретизации. Показано, что погрешность определяется: изменением разности длительности фронтов импульсов управления ЦАП; изменением разности задержек сигнала в ЦАП; зависимостью разности задержек сигнала в ЦАП от величины восстановленного сигнала; разностью амплитуд переднего и заднего фронтов импульсов на выходе ЦАП. Задержка сигнала в устройстве восстановления является причиной появления дополнительной погрешности, которая зависит от скорости изменения обрабатываемого сигнала. Существует оптимальная величина длительности импульса на выходе ЦАП, когда суммарная динамическая погрешность будет иметь минимальную величину. Уменьшение динамических погрешностей до уровня статических требует обеспечения значения отклонения разности времен задержек переднего и заднего фронтов импульса на выходе ЦАП на 4–6 порядков меньших  $T$ , что накладывает дополнительные ограничения на быстродействие устройства восстановления. Передискретизация цифрового сигнала на входе устройства восстановления уменьшает динамические погрешности устройства восстановления, но значительно повышает требования к скорости работы ЦАП и стабильности его временных параметров.*

*Восстановление сигналов; динамические погрешности восстановления; задержка сигнала; системы управления; передискретизация.*

**L.K. Samoilov, S.A. Kirakosjan**

### **DYNAMIC ERROR OF DEVICES OF RESTORATION OF SIGNALS IN CONTROL SYSTEMS**

*Dynamic errors of the restored signal as the sum of private derivatives of integral of a signal on exit DAC during digitization are considered. It is shown, that the error is defined: change of a difference of duration of fronts of impulses of management DAC; change of a difference of delays of a signal in DAC; dependence of a difference of delays of a signal in DAC from size of the restored signal; a difference of amplitudes of forward and back fronts of impulses on exit DAC. The signal delay in the restoration device is the reason of occurrence of an additional error which*