

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

На правах рукописи

СТОПАКЕВИЧ Алексей Аркадьевич

УДК 681.51:664

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ  
АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ  
ОПТИМАЛЬНОГО МНОГОМЕРНОГО  
МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Специальность 05.13.07 - автоматизация  
технологических процессов и производств  
(отрасли агропромышленного комплекса)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса 1989

Автореферат

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

СТОПАКЕВИЧ Алексей Аркадьевич

УДК 681.51:664

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ  
АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ  
ОПТИМАЛЬНОГО МНОГОМЕРНОГО  
МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Специальность 05.13.07 - автоматизация  
технологических процессов и производств  
(отрасли агропромышленного комплекса)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОНАХТ 11.06.1  
Автоматизированный с



v016578

Одесса 1989

016578  
Одесский технологический  
институт пищевой промышленности

Работа выполнена во Всесоюзном проектно-конструкторском и научно-исследовательском институте автоматизации пищевой промышленности "Пищепромавтоматика" (г.Одесса) и на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент В.А.Хобин.

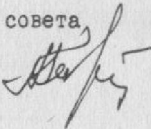
Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,  
профессор А.Г.Александров;  
доктор технических наук,  
профессор И.И.Кринецкий.

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации (ЦНИИКА, г.Москва).

Защита состоится "14" 04 1989г. в 10<sup>30</sup> часов на заседании специализированного совета К 068.35.02 в Одесском технологическом институте пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова по адресу: 270039, Одесса, ул.Свердлова II2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан "28" 02 1989г.

Ученый секретарь специализированного совета  
доктор технических наук, профессор  Л.И.Карнаушенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современного промышленного производства осуществляется в основном посредством интенсификации технологических процессов. Однако интенсификация обуславливает более сложное взаимодействие материально-энергетических потоков, ужесточение требований к качеству продукции, безопасности персонала, сохранности оборудования, воздействию на окружающую среду и поэтому возможна лишь в рамках автоматизированного оптимального управления отдельными процессами и всем производством в целом. Вместе с тем, выполнение этих требований, определяющих эффективность функционирования систем управления технологическими установками, наталкивается на серьезные трудности. Они связаны: а) с отсутствием отработанных типовых решений по управлению в условиях неопределенности, влияние которой в перерабатывающих производствах аграрно-промышленного комплекса значительно из-за большого разброса в качестве сельскохозяйственного сырья; б) с недостаточной теоретической проработкой вопросов поканального включения и выключения оптимальных систем в процессе их пуска, наладки, эксплуатации, обеспечения рационального уровня сложности создаваемой системы; в) с недостаточным развитием автоматизированных методов проектирования систем управления. Наиболее современные и подготовленные к автоматизации процессы переработки сельскохозяйственного сырья имеют непрерывный характер и большую взаимосвязанность, требуют стабилизации процесса на уровне установленного регламента и, следовательно, оптимальное управление такими процессами в теоретическом плане может быть отнесено к задаче аналитического конструирования многомерных линейных регуляторов. Уровень развития современной вычислительной техники и математических алгоритмов позволяет ставить и решать задачи аналитического конструирования высокой размерности, соответствующей охвату достаточно сложной технологической установки, участка, станции. Исходя из этого и формулируется цель исследования.

Объектом исследования являются процедуры разработки (синтеза) и реализации на базе микропроцессорной техники систем стабилизации станций и установок пищевых производств с непрерывным характером технологического процесса.

Цель работы заключается в автоматизации процедур разработки и реализации эффективно функционирующих систем стабилизации широкого класса технологических установок пищевых производств и их экспе-

риментальном опробовании в приложении к брагоректификационным установкам спиртовой и станциям дефекоатурации сахарной промышленности.

Методы исследования включают методы теории линейных оптимальных систем управления, в частности, методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов и фильтров; математический аппарат линейной (матричной) алгебры, матричных неравенств, линейных дифференциальных и конечно-разностных уравнений; методы нелинейного программирования; методы построения сложных программных систем; методы математического моделирования.

На защиту выносятся формализация технологических требований к системе стабилизации в структуре и параметрах критерия оптимальности; алгоритм синтеза многомерных регуляторов, имеющих блочный состав и иерархическую структуру передачи управления между блоками и его теоретическое обоснование; специализированный язык для автоматической генерации программного обеспечения микропроцессорных средств систем управления технологическими установками.

Научная новизна. 1. Предложена формализация совокупности требований, определяемых условиями функционирования непрерывных технологических процессов пищевых производств, в структуре и параметрах критерия оптимальности.

2. Введены понятия внешне-связанных систем, эволюционной осуществимости и показателей эволюции оптимальных регуляторов. Обоснованы утверждения об упрощенном решении задачи синтеза регуляторов для внешне-связанных систем и достаточные условия эволюционной осуществимости оптимальных регуляторов. Разработана итеративная процедура преобразования эволюционно осуществимых оптимальных регуляторов в блочно-иерархическую форму. Сформулирован принцип формирования каталога блоков и получены условия сходимости процедуры при достаточной "емкости" каталога.

3. Разработан специализированный, ориентированный на специалистов по автоматизации, язык автоматической генерации программного обеспечения микропроцессорных средств систем управления технологическими установками.

Практическая ценность. Исследования проводились в соответствии с темами НИР № ГР 81074639 (0015) "Разработать функциональное (прикладное) математическое и программное обеспечение АСУТП", № ГР 0186.0047278 (021") "Разработать унифицированное математическое и прог-

рамное обеспечение и средства автоматизации проектирования систем автоматизации агрегатов, участков и пищевых производств с использованием вычислительной техники и микропроцессорных средств", разработываемых в соответствии с заданиями целевых комплексных программ, соответственно, 0.Ц.026 и 0.80.02 ГКНТ и Госплана СССР. Результатом исследований является программное обеспечение процедур синтеза и реализации систем стабилизации, объединенное в программную систему "Автоматизированное рабочее место конструктора функциональной структуры и программного обеспечения систем стабилизации непрерывных технологических процессов". Использование программного обеспечения повысило эффективность разработки ряда АСУТП в сахарной и спиртовой промышленности.

Внедрение результатов работы. Разработанная программная система совместно со всеми входящими в ее состав пакетами программ (16 штук) сдана в Специализированный межотраслевой фонд алгоритмов и программ АСУТП (СМОБАП АСУТП, Киевское ПКБ АСУ) и Специализированное отделение АгроФАП (НПО "Пищепромавтоматика", г.Одесса). Использование программного обеспечения на базовых объектах Киевского ПКБ АСУ дало экономический эффект 286 тыс.руб. Кроме того, программное обеспечение использовано в составе микропроцессорных систем управления участками Мицуринского экспериментального и Гулевского спиртзаводов, а также Одесского сахарорафинадного завода.

Апробация работы проведена на нижеперечисленных конференциях и семинарах: Всесоюзном семинаре "Вопросы разработки и использования общесистемного обеспечения АСУ пищевой промышленности" (Одесса, 1984); Всесоюзной научной конференции "Моделирование сложных химико-технологических систем - СХТС-IV" (Одесса, 1985); Всесоюзном научно-техническом совещании "О дальнейшем повышении эффективности производства на базе использования микропроцессорной техники и робототехники" (Москва, 1984); Республиканской научно-технической конференции "Автоматизация процессов разработки информационного, технического и программного обеспечения АСУТП" (Киев, 1986); постоянно действующем семинаре "Кибернетика и автоматическое управление" научного совета АН УССР по комплексной проблеме "Кибернетика" (январь, март 1985; февраль 1986; март 1987; март 1988); областной конференции молодых ученых и специалистов "Автоматизация управления в пищевой промышленности" (Одесса, 1983).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ. Результаты исследований использованы при выполнении тем по НИР института "Пищепромавтоматика" (номера госрегистрации 81074639 и 0186.0047276) и отражены в виде глав в отчетах с инвентарными номерами, соответственно, 0285.0083929 (с.40-45, 58-64, 74-80) и 0287.000428 (т.2, с.3-54). Девятнадцать пакетов программ сданы в Государственный фонд алгоритмов и программ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка обозначений, введения, четырех разделов, выводов, списка литературы и приложений. Содержание диссертации (без приложений) изложено на 128 страницах, включая 2 таблицы и 27 рисунков. Список литературы содержит 51 наименование на русском и 21 на иностранных языках. Приложения содержат материалы, подтверждающие результаты внедрения работы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы. Формулируются задачи исследования и положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приведен анализ современного состояния теории оптимального синтеза и техники реализации систем стабилизации и сформулирована постановка задач исследования. Проанализированы многомерные математические модели технологических установок пищевых производств. Показано, что большинство установок характеризуется двумя-семью управляющими и управляемыми переменными, а размерность модели при аппроксимации запаздывания звеном первого порядка колеблется в пределах от десяти до тридцати, составляя в среднем двадцать единиц. Известно, что погрешности в коэффициентах усиления каналов приведенных моделей можно пренебречь, а погрешность в постоянных времени и запаздывании составляет двадцать-сорок процентов, исходя из чего получается оценка зоны неопределенности модели. Ситуация синтеза системы стабилизации технологической установки, таким образом, характеризуется необходимостью учета многомерности, многосвязности и неопределенности модели объекта управления; соблюдения регламентных зон на управляемые переменные при ограниченности величины управляющих воздействий в замкнутой системе; использования экономических и простых в эксплуатации, пуске и наладке регуляторов, формирующих непрерывный сигнал управления; наличия вы-

числительно устойчивых, эффективных и стандартных процедур синтеза. Исходя из приведенных требований, проанализированы критерии оптимальности в задаче синтеза (аналитического конструирования) многомерных регуляторов, приводящие к регуляторам линейной структуры. В качестве основного выбран интегральный квадратический критерий энергии. Далее показано, что требование простоты эксплуатации регулятора в теоретическом плане сводится к синтезу блочных регуляторов с иерархической взаимосвязью использующих одну и ту же управляющую переменную блоков при условии, что с подключением очередного блока качество (в смысле используемого критерия) системы управления безусловно улучшается. Последнее требование является, в сущности, известным требованием эволюционного синтеза систем управления. Требование иерархической взаимосвязи блоков приводит к структурам, аналогичным структурам широко используемых в практике управления каскадных систем. Проведен сравнительный анализ основных существующих методов решения задачи синтеза централизованных, децентрализованных и иерархических регуляторов с постоянной настройкой. При формулировке задач исследования проведена декомпозиция общей задачи эволюционного синтеза блочно-иерархического регулятора на три: задачу определения параметров критерия оптимальности так, чтобы удовлетворялись регламентные зоны и ограничения на управления в условиях неопределенности модели объекта; задачу синтеза классического оптимального по найденному критерию регулятора; задачу преобразования классического регулятора в приближенно реализующую его блочно-иерархическую форму, удовлетворяющую требованиям эволюционного синтеза. Кроме того, поставлена задача разработки прикладного программного обеспечения процедур синтеза и реализации регуляторов. Полученная оценка размерности задачи позволяет ориентировать программы синтеза на управляющие мини-ЭВМ, используемые на верхних уровнях современных АСУТП, а настраиваемые с помощью соответствующего специализированного языка программы реализации регуляторов - на управляющие микро-ЭВМ или микроконтроллеры. Такая концепция программного обеспечения позволяет приблизить процедуры синтеза (разработки) систем управления непосредственно к объекту внедрения, являясь выражением известного принципа однородности инструментальных и объектных вычислительных средств.

Во втором разделе произведена разработка теоретических основ предлагаемой методики синтеза и реализации оптимальных систем стабилизации.

Вводится понятие внешне-связанного представления математической модели объекта управления в пространстве состояний. Отличительной особенностью данного представления является то, что эффект собственного взаимодействия координат состояния выделенных блоков матрицы объекта заменяется эффектом зависимых наблюдений за независимыми координатами состояния. Строго, многомерную систему

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad y = Cx \quad (1)$$

назовем внешне-связанной (в.с.), если входящие в ее описание матрицы представимы в виде

$$A = \bigoplus_{i=1}^m A_i; \quad A_i = \bigoplus_{j=1}^L A_{ij}; \quad B = \bigoplus_{i=1}^m B_i; \quad C_i = \bigoplus_{j=1}^L C_{ji}; \quad (2)$$

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_m]; \quad B_i^T = [B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{iL}];$$

$$A \in \mathcal{R}^{n \times n}; \quad B \in \mathcal{R}^{n \times m}; \quad C \in \mathcal{R}^{l \times n};$$

$$A_i \in \mathcal{R}^{n_i \times n_i}; \quad A_{ij} \in \mathcal{R}^{n_i \times n_j}; \quad B_{ij} \in \mathcal{R}^{n_i \times l}; \quad C_{ij} \in \mathcal{R}^{l \times n_j},$$

где  $x, y, u$  - векторы состояний, выходов и управлений соответствующей размерности;  $\bigoplus$  - обозначение прямой суммы матриц;  $\mathcal{R}$  - поле вещественных чисел;  $n, m, l$  - числа, указывающие число состояний, управлений и выходов.

Показано, что справедливо утверждение: для представления матрицы передаточных функций в виде внешне-связанной системы необходимо и достаточно, чтобы для любой пары передаточных функций, стоящих в одной строке или столбце, не существовал общий множитель в виде правильной (несократимой, с порядком числителя меньшим порядка знаменателя) передаточной функции. Отсюда следует, что приближенно можно в качестве внешне-связанной системы представить любую систему, если на малую величину сместить полюса общих множителей.

Доказано, что для внешне-связанной системы в случае, если

$$R = \bigoplus_{i=1}^m R_i; \quad Q = \bigoplus_{i=1}^m Q_i; \quad Q_i \in \mathcal{R}^{n_i}; \quad R_i \in \mathcal{R}, \quad (3)$$

решение задачи синтеза регулятора, оптимизирующего систему по критерию

$$J = 0.5 \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt, \quad R, Q > 0, \quad (4)$$

дается соотношением

$$u = Kx; \quad K = \bigoplus_{i=1}^m K_i; \quad K_i = LQ(A_i, B_i, R_i, Q_i), \quad (5)$$

где  $LQ$  - матричная функция, определяющая решение стандартной задачи по соотношениям

$$LQ(A, B, R, Q) := -R^{-1}B^T P; \quad A^T P + PA + Q - PB R^{-1} B^T P = 0. \quad (6)$$

Исследуется возможность поканального включения оптимального регулятора так, чтобы величина критерия в системе с устойчивым, возмущенным ненулевыми начальными условиями объектом, после замыкания очередного канала соответствующей подмоделью оптимального регулятора, монотонно уменьшалась от максимального значения, полученного в системе без регулятора, до минимального значения, соответствующего оптимальной системе, в которой включены все подмодели оптимального регулятора. Указанное требование выражает известное, эволюционное требование синтеза. Регулятор, для которого выполняется эволюционное требование, назван эволюционно осуществимым. Исследование проводится для объектов, заданных в в.с. представлении. Задаваясь определенной последовательностью включения каналов оптимального регулятора, на основе известных оценок собственных значений решений матричных уравнений Риккати, Ляпунова, а также собственных и сингулярных значений для сумм и произведений матриц, получим неравенство, связывающее след матрицы  $Q$  ( $R$  выбрана в виде  $R=I$ ) с собственными числами матрицы  $A$ , в виде

$$\begin{aligned} & \text{tr}(-B_{ij} K_{ij+1}) > [\delta \max(A_i) + 2 \text{tr}(-B_i L_{ij})] \text{tr}(K_{ij+1} K_{ij+1}) / [\text{tr}(Q_i) + \text{tr}(L_{ij}^T L_{ij})] + \varphi_i; \\ & \lambda_{\min}(-A_i A_i^T - B_i K_i - K_i^T B_i^T) \geq \lambda_{\min}(-A_i - A_i^T) + \text{tr}(-B_i K_i); \quad B_i^T K_i + (I - B_i^T B_i^T) M_i > 0; \\ & R = I; \quad Q_i \geq K_i^T K_i - [B_i^T K_i - (I - B_i^T B_i^T) M_i] A_i - A_i^T [B_i^T K_i - (I - B_i^T B_i^T) M_i]; \quad \delta(A) = \lambda(-A - A^T); \\ & K_i = [K_{i1} \dots K_{im}]; \quad L_{ij} = [L_{ij1} \dots L_{ijm}]; \quad K_{ij} \in \mathcal{R}^{n_i \times l}; \quad \varphi_i = \delta \max(A_i) - \lambda_{\min}(A_i); \\ & M_i \in \mathcal{R}^{n_i \times n_i}; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\text{tr}, \lambda$  - соответственно след и собственное значение матрицы. При  $n = 1$  регулятор эволюционно осуществим всегда.

Полученное неравенство протабулировано при  $m = 2$  и  $n = 10$  и десятикратном диапазоне изменения координат  $(K, \delta, \text{tr} Q)$ . Анализ табуляграммы показывает, что даже при использовании очень грубых оценок решения, практически для любого объекта можно построить эволюционно осуществимый регулятор, а область существования таких регуляторов достаточно заполнена и увеличивается с ростом  $n$ . Поэтому при тестировании на эволюционную осуществимость целесообразно использовать прямое определение, решая соответствующие уравнения Ляпунова. Этот вывод, наряду с использованием известных неравенств, связывающих элементы весовых матриц  $R$  и  $Q$  с величинами регламентных зон на выходы объекта, ограничениями на управления и диапазоном неопределенности объекта, позволяет полностью определить критерий оптимальности. Отклонение величины критерия оптимальности в этих условиях свидетельствует об отклонении формализованных в критерии требований к системе управления.

Далее сформулирован алгоритм преобразования эволюционно осуществимого оптимального регулятора в блочно-иерархическую форму так, чтобы он состоял из иерархически соединенных типовых блоков  $\mathcal{S}$ ; Каталог блоков  $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_f\}$  содержит типовые звенья 0, 1, ... порядков с равными порядками числителя и знаменателя, интерпретируемые как симметрические разложения Паде соответствующих подмоделей вспомогательного, используемого в процедуре преобразования, регулятора. Алгоритм преобразования состоит из трех основных шагов.

Шаг 1. Определить пару  $i$ -вход,  $j$ -выход такую, что

$$\mathcal{J}(K^{\nu} \boxplus_{ij} (K^{**} \boxminus K^{\nu}))_{ij} \Rightarrow \min_{ij} \quad (8)$$

Шаг 2. Решить задачу параметрической оптимизации

$$\mathcal{J}(K^{**} \boxplus_{ij} (K^{**} \boxminus K^{\nu}))_{ij} \boxplus \eta(K^{\nu}, \mathcal{S}_f, i, j) \Rightarrow \min_{\substack{f \in \{1, n_s\} \\ D_f \in D_f^*}} \mathcal{J}(f) - \mathcal{J}(f-1) < \epsilon_{ps}; \quad (9)$$

переопределить регулятор  $K^{\nu+1} = \eta(K^{\nu}, \mathcal{S}_f, i, j)$  и показатель сложности системы  $\psi = \psi + \eta(f)$ .

Шаг 3. Проверить критерии останова

$$\mathcal{J}(K^{\nu+1}) - \mathcal{J}(K^{\nu}) < \epsilon_{ps} \quad (\text{достигнута точность});$$

$$\psi \geq \psi^* \quad (\text{превышена сложность});$$

и если они не удовлетворяются, то нарастить  $\nu := \nu + 1$  и перейти к началу процедуры, иначе расчет закончен.

При описании использованы обозначения:  $K^{**}$  - модель оптимального многомерного регулятора;  $K^{\nu}$  - модель синтезируемого блочно-иерархического регулятора на  $\nu$ -итерации алгоритма (в регуляторе  $\nu$  блоков) - при входе в алгоритм  $\nu = 0$ , а  $K^0$  означает, что регулятора нет;  $K_{ij}$  - подмодель регулятора  $K$ , связывающая  $i$ -й вход и  $j$ -й выход объекта управления;  $\boxplus, \boxminus$  - операции параллельного соединения моделей-операндов с суммированием или вычитанием выходов;  $\boxplus_{ij}, \boxminus_{ij}$  - операции параллельного подсоединения к  $i$ -му входу,  $j$ -му выходу левого операнда одномерной модели - правого операнда;  $\eta(K^{\nu}, \mathcal{S}_f, i, j)$  - операция иерархического подсоединения к регулятору  $K^{\nu}$  блока  $\mathcal{S}_f$  из каталога  $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_k\}$  так, чтобы соединить  $i$ -й вход и  $j$ -й выход модели  $K^{\nu}$ ;  $\mathcal{J}(K)$  - величина критерия в замкнутой системе с регулятором  $K$ ;  $\mathcal{J}(f)$  - величина критерия в замкнутой системе, когда к регулятору  $K^{\nu}$  подсоединен блок  $\mathcal{S}_f$  из каталога  $\mathcal{S}$ ;  $n_s$  - число блоков в каталоге  $\mathcal{S}$ ;  $D_f, D_f^*$  - множества параметров блока  $\mathcal{S}_f$  и ограничивающее множество;  $\eta(f)$  - функция, ставящая в соответствие номеру блока в каталоге неотрицательное целое число - "сложность" блока;  $\epsilon_{ps}$  - малое число;  $\psi^*$  - допустимый уровень сложности. Величины  $\mathcal{J}(K^{\nu})$ , полученные при  $\nu = 0, 1, \dots$  в про-

цессе преобразования оптимального регулятора, названы показателями эволюции.

Шаг 1 составляет структурообразующую, шаг 2 - оптимизирующую, а шаг 3 - решающую часть алгоритма. Показано, что при достаточной "емкости" каталога (достаточной величине  $n_s$ ), итерации в алгоритме сходятся.

Для учета в структуре регулятора действующих на объект неконтролируемых скачкообразных возмущений использован известный прием, связанный с подключением последовательно регулятору модели возмущений - модели многомерного интегратора.

С целью реализации регуляторов на базе микропроцессорной техники разработан специализированный язык АС-85 для автоматической генерации программного обеспечения систем управления. Теоретической основой заложенного в язык формализма являются структурные схемы. Лингвистические конструкции языка адекватны терминам, используемым специалистами по автоматизации. Основными конструкциями являются СИСТЕМА регулирования, регулирующий БЛОК и МОДУЛЬ. За счет введения двух уровней иерархии понятий (СИСТЕМА регулирования состоит из регулирующих БЛОКОВ, а БЛОКИ в свою очередь конструируются из МОДУЛЕЙ), удается описать практически сколь угодно сложную систему регулирования при минимальной избыточности. Текст программы может быть подробно закомментирован. Единицы БЛОК и СИСТЕМА являются конструкциями в области данных, а единица МОДУЛЬ - является программой. Расширение функциональных возможностей языка достигается за счет расширения библиотеки МОДУЛЕЙ и конструирования разнотипных БЛОКОВ.

В третьем разделе проводится разработка прикладного программного обеспечения (ПО) процедур оптимального синтеза и реализации систем стабилизации. Базовая версия ПО оформлена в виде программной системы "Синтез оптимальных линейных регуляторов", состоящей из шести групп пакетов прикладных программ (ППП): построения и преобразования моделей систем управления; построения критерия оптимальности; синтеза систем управления; анализа систем управления; вспомогательных операций; реализации систем управления.

Первая группа включает ППП вычисления передаточных функций и дискретизации многомерных систем управления (САУ); вторая - ППП вычисления весовых матриц критерия оптимальности; третья - ППП синтеза классических оптимальных регуляторов состояния и фильтров Калмана; параметрического синтеза многомерных САУ, синтеза блочно-иерархических регуляторов; четвертая - ППП вычисления полной и поканальной

управляемости и наблюдаемости, собственных значений и векторов матриц, вычисления величины и чувствительности критерия оптимальности на основе решения уравнений Ляпунова, моделирования многомерных систем и вычисления прямых показателей качества; пятая – процессор унарных и бинарных матричных операций; шестая – транслятор с разработанного языка АС-85 и ППП, реализующий систему управления в реальном времени на базе микропроцессорной техники. Настройка всех ППП унифицирована, ориентирована на специалиста по автоматизации и производится с помощью файлов-планов специального вида, содержащих размерности и месторасположения исходных матриц, признаки типа решаемой задачи и комментарии. ППП первых пяти групп функционируют на СМ I420, а ППП шестой группы на микро-ЭВМ СМ I800. ПО прошло экспертизу на новизну и в 1987 году сдано в СМОФАП АСУТП (г. Киев, ПКБ АСУ) и СпецАгроФАП (г. Одесса, НПО "Пищепромавтоматика"). Затем базовая версия ПО была расширена: в первую группу включены ППП идентификации многомерных систем, редукции систем и вычисления матриц встречно-параллельного соединения многомерных систем; в третью группу – ППП оптимизации блока в многомерной системе; в четвертую – модальная оценка прямых показателей качества; в пятую – копирования и переименования матриц. Версия названа "Автоматизированное рабочее место конструктора функциональной структуры и программного обеспечения систем стабилизации непрерывных технологических процессов" и сдана в перечисленные фонды программ в июне 1988 г.

В четвертом разделе проводится исследование оптимальных систем стабилизации конкретных технологических станций и установок пищевых производств. В качестве базовых объектов приняты бражные колонны вакуумной и косвенного действия брагоректификационных установок спиртового производства и станция дефекосатурации сахарного производства. Для известных математических моделей указанных объектов находится в.с. представление. Проводится синтез и модельное исследование систем стабилизации с классическим оптимальным регулятором. Определены весовые матрицы критерия оптимальности, исходя из предположения 40 % неопределенности в постоянных времени и 20 % неопределенности во времени запаздывания, ограничений на управления и выходы. Исследование САУ бражной колонны косвенного действия показывает, что при удовлетворении ограничений относительное изменение величины критерия внутри зоны неопределенности модели составляет 24 %, относительное изменение величин выходов и управлений при этом составляет, соответственно, 10 % и 1 %. Модельное сравнение с типовой системой управления бражной колонной показывает, что в типовой сис-

теме допускается значительно большее (в 3–4 раза) отклонение температур верха и отходящей воды. Относительное изменение величины критерия внутри зоны неопределенности также составляет 24 %. Время расчета оптимального регулятора для станции дефекосатурации (13 минут) позволяет сделать вывод о применимости разработанного программного обеспечения для синтеза систем управления сложными технологическими участками пищевых производств. Далее проводится синтез блочно-иерархических регуляторов для бражной колонны вакуумной [  $u = \{G_{br}; G_n\}$ ,  $y = \{t_b, P_n, P_b, h\}$  ] и косвенного действия [  $u = \{G_{br}, G_n\}$ ,  $y = \{t_{кт}, t_{к0}\}$  ] установок. Для первого из указанных объектов регулятор описывается структурой (модель в виде передаточных функций)

$$u_1 = W_2 (y_3 + W_4 y_2); \quad u_2 = W_1 (y_2 + W_3 y_3); \quad (I)$$

$$W_1 = -0.0623; \quad W_2 = 0.116; \quad W_3 = \frac{0.66p + 0.73}{1.17p + 1}; \quad W_4 = \frac{7.84p + 158.4}{20.2p + 1},$$

где  $W_i$  – передаточные функции блоков, а индекс  $i$  соответствует порядку установки блоков при синтезе. Величины критерия оптимальности (показатели эволюции) после установки очередного блока изменяются следующим образом (100 % – величина критерия в объекте без регулятора, 0 % – в системе с оптимальным регулятором)

$$\langle 9,26 \% ; 1,84 \% ; 0,94 \% ; 0,93 \% \rangle .$$

Для второго объекта регулятор описывается структурой

$$u_1 = W_2 y_1; \quad u_2 = W_1 (y_1 + W_3 (y_2 + W_4 y_2)) \quad (II)$$

$$W_1 = -\frac{1.71 + 0.51p}{0.49p + 1}; \quad W_2 = -\frac{0.51 + 0.08p}{0.09p + 1}; \quad W_3 = \frac{4.65 + 1.1p}{4.35p + 1}; \quad W_4 = -\frac{394 + 0.46p}{856p + 1}.$$

Показатели эволюции изменяются по закону

$$\langle 7,91 \% ; 5,25 \% ; 5,24 \% ; 5,20 \% \rangle .$$

Отличительной особенностью второй структуры по сравнению с первой является то, что алгоритм синтеза потребовал последовательной установки блоков  $W_3$  и  $W_4$ . С учетом двадцатипроцентного отклонения величины критерия из-за неопределенности модели в обеих структурах, получилось очень хорошее приближение к оптимальному режиму. Интересно отметить, что в обоих случаях значительное улучшение системы достигается уже при установке первого блока. В первой структуре информация с 1 и 4 выходов не потребовалась. При реализации регуляторов с учетом скачкообразных возмущений последовательно управлениям  $u_1$  и  $u_2$  необходимо в контур обратной связи включить интеграторы.

Приводятся результаты испытаний программных средств реализации систем управления в производственных условиях. Описана программа на языке АС-85, реализующая регулирующий блок, использованный при

ручной наладке САУ. В сочетании с входящей в состав программных средств реализации типовой дисплейной формой наладчика, программа позволяет производить согласованный с результатами синтеза плавный пуск и наладку системы на промышленном объекте. Показано, что программные средства реализации обладают достаточно высокой реактивностью, мобильностью и простотой перестройки регулирующей программы силами наладочного и эксплуатационного персонала в случае, если организовано его предварительное обучение (в объеме приблизительно 32 часов).

#### Основные результаты и выводы диссертационной работы

1. Показано, что наиболее полный учет требований к системам стабилизации непрерывных технологических процессов пищевых производств достигается в рамках задачи эволюционного синтеза блочно-иерархических регуляторов, решение которой целесообразно представить в виде последовательного решения трех основных подзадач: определения параметров критерия оптимальности стандартной задачи аналитического конструирования на основе выделенной совокупности технологических требований; синтеза классического оптимального регулятора; преобразования оптимального регулятора в блочно-иерархическую форму.

2. Анализ многомерных математических моделей широкого класса технологических установок различных подотраслей пищевой промышленности показал, что в качестве объекта синтеза следует брать в целом отдельную технологическую установку. Возможность синтеза САУ в этом случае продемонстрирована в приложении к достаточно сложной установке - станции дефекосации сахарного производства.

3. Инструментом теоретического анализа возможности преобразования оптимального регулятора в блочно-иерархическую форму явились понятия эволюционной осуществимости оптимального регулятора показателя эволюции. На основе использования оценок решений основных уравнений оптимального синтеза показано, что область эволюционно осуществимых регуляторов достаточно полна.

4. Значительное упрощение основных процедур синтеза достигнуто в результате использования специальной формы представления математической модели многомерного объекта - внешне-связанного представления. Показано, что с достаточной для практики точностью в такой форме может быть представлена математическая модель практически любого многомерного объекта управления.

5. Приведены основные методы учета технологических требований в параметрах критерия оптимальности. Сформулирован алгоритм преобразования оптимального регулятора в блочно-иерархическую форму, удовлетворяющую эволюционному требованию синтеза, и обоснована его сходимость. Разработан специализированный язык для генерации программного обеспечения, реализующего синтезированный регулятор на базе микропроцессорной техники.

6. Синтезированы и исследованы блочно-иерархические системы управления бражными колоннами спиртового производства. Показано, что блочно-иерархическая система, обеспечивая высокую степень приближения к оптимальной системе уже при малом числе блоков, значительно упрощает реализацию, пуск и наладку регулятора. Качество процессов в оптимальной системе улучшилось по сравнению с используемой в настоящее время типовой системой управления.

7. Разработано программное обеспечение, состоящее из пяти групп пакетов программ для работы с многомерными САУ: построения и преобразования моделей; определения весовых матриц критерия качества; синтеза регуляторов; анализа систем управления; вспомогательных операций; реализации регуляторов. Программное обеспечение прошло экспертизу на новизну и работоспособность и сдано в Государственный фонд алгоритмов и программ. Система общения с программами ориентирована на специалистов по автоматизации. Программное обеспечение целесообразно использовать в проектно-конструкторских и научно-исследовательских организациях соответствующего профиля и при обучении студентов современным методам анализа и синтеза многомерных систем управления.

8. Испытание программного обеспечения реализации САУ в составе микропроцессорных систем управления на предприятиях пищевой промышленности показало его достаточно высокую реактивность, мобильность и простоту перенастройки регулирующей программы силами предварительно обученного наладочного и эксплуатационного персонала. Входящие в состав программного обеспечения дисплейные формы позволяют производить согласованные с результатами синтеза пуск и наладку системы.

9. Экономический эффект от использования программного обеспечения составил 286 тыс. руб./год.

Основное содержание диссертации, наряду с программами, опубликовано в 15 работах.

1. Сатановский В.Р., Стопакевич А.А. Вопросы разработки математического и программного обеспечения систем цифрового управления технологическими процессами//Вопросы разраб. и исп. общесистемного обеспечения АСУ пищ.пром-сти: Всесоюз. семинар: Тез. докл. - М., 1984. - С. 8-9.
2. Комплекс типовых алгоритмов контроля и управления технологическими процессами с помощью микро-ЭВМ//П.К.Сергиевский, С.В.Нагирнер, А.А.Стопакевич и др.//О дальнейшем повышении эффективности пр-ва на базе использования микропроцессорной техн. и робототехники: Всесоюз. научн.-техн. совещ.: Тез. докл. - М., 1984. - С. 36-38.
3. Варламов М.Л., Стопакевич А.А. Оптимизация расхода материально-энергетических ресурсов ХТС в переходном режиме//Математическое моделирование сложных хим.-технол. систем. СХТСИУ: Всесоюз. науч. конф.: Тез. докл. - Одесса, 1985. - Т. I - С. 170.
4. Автоматизация выбора алгоритмов цифрового регулирования/В.Р.Сатановский, А.А.Стопакевич, Л.И.Грехова//Сб. науч. тр./НПО "Днепроавтоматика". - Одесса, 1985. - С. 68-75.
5. Кожухарь Л.П., Стопакевич А.А. Автоматическое регулирование//Алгоритмы и прогр. ВНИЦентр. - 1988. - №1. - Реф. 88.01.0075. - 15с.
6. Прямое и обратное  $Z$ -преобразование/М.В.Долгов, А.А.Стопакевич, Н.В.Шайхет//Алгоритмы и прогр. ВНИЦентр. - 1988. - №1. - Реф. 88.01.0034. - 10с.
7. Анализ качества, чувствительности и робастности линейных многомерных систем управления/А.А.Стопакевич, Л.И.Грехова, Т.И.Волошановская. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001020 ГосФАП. - 11с.
8. Анализ системных характеристик линейных многомерных систем управления/А.А.Стопакевич, Т.И.Волошановская, Л.И.Грехова. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001030 ГосФАП. - 11с.
9. Параметрический синтез линейных многомерных систем управления/А.А.Стопакевич, Т.И.Волошановская, Л.И.Грехова. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001029 ГосФАП. - 10с.
10. Синтез линейно-квадратических регуляторов многомерных объектов/А.А.Стопакевич, Т.И.Волошановская, Л.И.Грехова. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001022 ГосФАП. - 12с.
11. Стопакевич А.А., Грехова Л.И. Моделирование линейных динамических систем и вычисление прямых показателей качества. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001036 ГосФАП. - 11с.
12. Стопакевич А.А., Грехова Л.И. Определение весовых матриц квадратического функционала на основе требований робастности. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001035 ГосФАП. - 10с.
13. Стопакевич А.А., Грехова Л.И. Расчет матриц передаточных функций систем, заданных в пространстве состояний. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001021 ГосФАП. - 9с.
14. Стопакевич А.А., Грехова Л.И. Процессор матричных вычислений. - М.: ВНИЦентр, 1988. - Рег. № 50880001026 ГосФАП. - 9с.
15. Стопакевич А.А. САПР по функций регулирования//Алгоритмы и прогр. ВНИЦентр. - 1988. - №1. - Реф. 88.01.0112. - 10с.

*А.С.Савицкий*

110  
V.016578