

Автор ер.  
Г 65

Библ. карт.

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

На правах рукописи

ГОНЧАРЕНКО Александр Евгеньевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО  
ГРАНУЛИРОВАНИЯ КОМБИКОРМОВ И РАЗРАБОТКА  
ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ

05.13.07 – автоматическое управление и  
регулирование, управление технологи-  
ческими процессами (промышленность)

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1981



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Закономерности экономического развития социалистического общества, нашедшие глубокое отражение в программных документах Партии и Советского правительства, свидетельствуют о возрастающей роли отраслей народного хозяйства, призванных обеспечить всемерное удовлетворение потребностей трудящихся в продуктах питания. Так, на XXVI съезде КПСС было признано необходимым разработать специальную продовольственную программу, основу которой составляет интенсивное развитие сельского хозяйства и, прежде всего, животноводства — ударного фронта сегодня на селе. В качестве основной трудности на пути решения поставленных задач отмечается нехватка кормов.

В свете этих решений планируется развитие отраслей, обеспечивающих кормовую базу промышленного животноводства, в частности, комбикормовой промышленности. Высокие темпы роста объема производства комбикормов, продиктованные объективно существующей необходимостью, обострили противоречия между постоянно растущей потребностью и недостаточной эффективностью технологических процессов (ТП). Особенно остро эти противоречия проявляются в производстве гранулированных комбикормов, план выпуска которых в X пятилетке невыполнен более, чем на 27%, несмотря на высокую эффективность скармливания именно этого вида кормов.

Одним из основных направлений решения проблемы интенсификация ТП гранулирования является разработка АСУ ТП на базе эффективных локальных систем управления отдельными агрегатами и участками ТП. В такой связи разработка и исследования оптимальной системы управления основным участком процесса гранулирования (ПГ) является актуальной задачей.

Объектом исследования в диссертационной работе является процесс гранулирования комбикормов на прессах с вертикальной кольцевой

Переучет 19.8.87.

матрицей типа ДГ-I (операции гидротермической обработки (ГТО) и прессования) и оптимальная автоматическая система регулирования (АСР) этим процессом.

Цель работы заключается в повышении эффективности функционирования автоматизируемого участка путем интенсификации технологического процесса при одновременном обеспечении высокой эксплуатационной надежности и требуемого качества гранул.

Методы исследования. Теоретические результаты получены с использованием аппарата высшей алгебры, теории множеств, интегрального и дифференциального исчисления. При решении задач синтеза оптимального алгоритма управления ПГ (АУ ПГ) на ЭВМ использовался метод Рунге-Кутты и метод деформированного многогранника. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований выполнялись методами математической статистики, в том числе методами дисперсионного и регрессионного анализов.

Научная новизна. Разработан метод статической оптимизации АСР с линейной моделью дрейфа оптимизируемого параметра и на примере АСР ПГ показана его практическая эффективность.

Обоснована аналитическая форма математической модели ПГ (ММ ПГ) - описание объекта в терминах пространства состояний. Доказана предпочтительность ММ с полиномиальной матрицей связи входных и выходных переменных, обеспечивающая значительное снижение размерности задачи параметрической идентификации ММ ПГ. Доказана адекватность такой ММ при изменении режимных условий эксплуатации ПГ в широком диапазоне и наличии ВВ случайного характера.

Доказана корректность применения для синтеза оптимального АУ ПГ квадратичного критерия с определенной структурой целевой функции.

Обоснованы структура и значения "настроечных" параметров оптимального АУ ПГ, обеспечивающего автоматический вывод ПГ на оптимальный режим (автоматизацию пусков) и качественное управление процессом

в условиях ВВ случайного характера.

Практическая ценность. Непосредственное применение полученных результатов для целей реконструкции и технического перевооружения действующих или разработки систем автоматизации вновь строящихся комбикормовых заводов может дать значительный экономический эффект.

Внедрение результатов работы. Опытно-промышленный вариант оптимальной АСР ПГ внедрен в цехе гранулирования Киевского комбикормового завода. Годовой экономический эффект на этапе внедрения единичного экземпляра АСР ПГ фактически составил (с учетом затрат на НИР и ОКР) более 30 тысяч рублей, что соответствует сроку окупаемости 1,5 года.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах секции "Кибернетика и автоматическое управление" научного совета по проблеме "Кибернетика" АН УССР (г. Одесса, 1978, 1980 гг.), на всесоюзных научно-технических конференциях "Научно-технический прогресс в зерноперерабатывающей промышленности" (г. Одесса, 1977 г.), "Проблемы математического, программного и информационного обеспечения АСУ технологическими процессами" (г. Черновцы, 1979 г.), "Управление производством и автоматизированные системы управления (г. Одесса, 1980 г.), на юбилейной конференции, посвященной десятилетию ВНИИКИ (г. Воронеж, 1979 г.), на научно-технических конференциях ОТИПП им. М.В. Ломоносова (г. Одесса, 1978-1981 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 1 авторское свидетельство.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографии из 155 наименований и приложений. Изложена на 98 страницах машинописного текста, включает 47 рисунков и 14 таблиц. Приложения содержат программы расчета на ЭВМ ЕС10-22 (листинги) - 3, таблицы - 9, рисунки \* 7, акты

производственных испытаний и внедрения - 2, расчет экономической эффективности - 1.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы. Формируются ее цель, основная задача и положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе дается краткая характеристика ТП гранулирования комбикормов, приводятся основные сведения об оборудовании и методах контроля качества продукции. Более детально рассматривается исследуемый участок (операции ГТО и прессования), при этом основное внимание уделяется его особенностям, существенным для целей управления.

Приводятся результаты анализа известных решений вопроса автоматизации ПГ (ретроспективного и современных тенденций). Выделяется два основных направления, характерных как для отечественных, так и для зарубежных исследований: 1) создание комбикормовых заводов-автоматов на базе АСУ ТП и АСУП; 2) разработка эффективных всережимных АСР ПГ с широким привлечением средств микропроцессорной техники.

Рассмотрены отечественные и зарубежные разработки АСР ПГ. По известным решениям делается вывод об их недостаточности для создания эффективной, всережимной АСР ПГ. Это обусловлено ограниченной постановкой задачи (лишь в плане стабилизации основных параметров ТП) и недостаточной эффективностью применяемых АУ (позиционные и линейные П, ПИ, ПИД).

Анализируются известные ММ ПГ как объекта управления (ОУ) и делается вывод о их неприменимости для синтеза оптимальной всережимной АСР ПГ. Этот вывод обосновывается тем, что ввиду линейности и чрезмерного упрощения условий эксплуатации ПГ известные ММ неадекватны объекту. Отмечается, что режимы повышенной интенсивности, т.е. режимы ПГ, на которых достигается максимальная произ-

водительность оборудования, практически не исследованы.

На основании предварительного анализа глобального критерия оптимальности АСУ ТП, заключающегося (РТМ 25.207-75) в максимизации прибыли у потребителя АСУ ТП ( $\Delta\Pi_n$ ) и в смежных отраслях ( $\Delta\Pi_c$ )

$$\Phi \rightarrow \max [\Delta\Pi_n + \Delta\Pi_c]; \quad (I)$$

устанавливается, что в отличие от выводов предыдущих исследований, основным источником эффективности АСУ ТП является экономия по условно-постоянной части себестоимости ( $H_b$ ) за счет повышения производительности ТП, а не снижение затрат на пар и электроэнергию.

В результате аналитического обзора формулируется основная задача исследования - интенсификация ТП гранулирования с одновременным обеспечением высокой эксплуатационной надежности и требуемого качества гранул, и вспомогательные задачи, решаемые в диссертационной работе:

1. Разработать методику синтеза и выполнить параметрическую идентификацию ММ ТП, адекватно описывающую объект управления в широком диапазоне режимных условий с учетом его нелинейности, нестационарности, многосвязности и наличия БВ случайного характера.

2. Разработать метод синтеза алгоритма статической оптимизации нелинейных, многомерных АСУ и на его основе синтезировать алгоритм статической оптимизации АСУ ТП.

3. Разработать с учетом результатов анализа критерия (I) методику структурного синтеза оптимального АУ ТП и методику определения значений "настроечных" параметров на ЭВМ.

4. Выполнить проектную разработку и реализацию синтезированной АСУ ТП с целью практической проверки и внедрения результатов исследования в промышленность.

Во второй главе решается задача синтеза ММ ТП, адекватной объекту в широком диапазоне режимных условий. На основании анализа

литературных источников и в соответствии с основной задачей исследования выдвигается рабочая гипотеза о характере идентифицируемого объекта, состоящая в следующих предположениях:

1. Исследуемый участок представляет собой иерархическую систему, нижний уровень которой составляют физико-химические процессы, сопровождающие гранулирование, а верхний - организационно-экономическая система производства комбикормов.

2. Конструктивное исполнение пресса-гранулятора допускает представление ПГ как объекта с сосредоточенными параметрами.

3. Уровень априорных знаний не позволяет обосновать структуру ММ ПГ аналитически.

На основании анализа нижнего уровня составляется параметрическая и структурная схема ПГ как ОУ. Определяются основные ВВ, их характер и "точки приложения". Формируется параметрическое пространство, на котором строится ММ ПГ. Это пространство может быть записано в виде:

$$\bar{y}(t) = \begin{Bmatrix} J(t) \\ Q(t) \end{Bmatrix}; \quad \bar{u}(t) = \begin{Bmatrix} G(t) \\ Q(t) \\ P(t) \end{Bmatrix}; \quad \bar{f}(t) = \begin{Bmatrix} U_c(t) \\ P(t) \\ Re(t) \\ d(t) \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

где  $\bar{y}(t)$  - вектор выходных (управляемых) параметров,  $\bar{u}(t)$  - вектор управления,  $\bar{f}(t)$  - вектор ВВ,  $G(t)$  - расход комбикорма на гранулирование (кг/с),  $Q(t)$  - расход пара (кг/с),  $P(t)$  - давление пара в паропроводе (МПа),  $U_c(t)$  - напряжение питающей сети (В),  $Re(t)$  - рецептурный состав комбикорма,  $d(t)$  - рабочий диаметр фильер матрицы (м).

С позиций адекватности отображения физической структуры ПГ и сложности параметрической идентификации ММ ПГ проводится сравнительный анализ основных видов аналитического описания нелинейных, многомерных объектов. Рассматриваются описания:

1) в терминах пространства состояний (фазового пространства);

- 2) в виде уравнений "вход" - "выход";
- 3) матричными передаточными функциями (в частотной области);
- 4) функциональными рядами типа Вольтерра.

Делается вывод о предпочтительности описания I с полиномиальной матрицей связи между  $\bar{y}(t)$  и  $\bar{u}(t)$ . Показывается, что в этом случае количество неизвестных параметров существенно (на 40+60) меньше, чем для постоянной матрицы. Приводится описание такой MM III вида:

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}(t) = & (L_0^0)_{\gamma}^{-1} \left\{ A_{0\gamma} \cdot \bar{X}_{\gamma}(t) + \sum_{i=0}^m \left\{ B_{i\gamma} \cdot u_{i\gamma} [t - \tau_{i\gamma}(t)] + \right. \right. \\ & \left. \left. + B_{i\theta} \cdot u_{i\theta} [t - \tau_{i\theta}(t)] \right\} \right\} + (L_0^0)_{\theta}^{-1} \left\{ A_{0\theta} \cdot \bar{X}_{\theta}(t) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=0}^m B_{i\theta} \cdot u_{i\theta} [t - \tau_{i\theta}(t)] \right\} + R_f \cdot \bar{f}(t); \\ \bar{y}(t) = & C \cdot X(t), \quad X(t) = \{ X_{\gamma}(t) \quad X_{\theta}(t) \}; \\ u(t) = & \varphi_u(t), \quad t_0 - \tau_{ij}(t) \leq t \leq t_0; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\bar{X}_{\gamma}(t) = \| X_{c\gamma}(t) \quad X_{a\gamma}(t) \quad X_{p\gamma}(t) \|;$$

$$\bar{X}_{\theta}(t) = \| X_{c\theta}(t) \quad X_{a\theta}(t) \quad X_{p\theta}(t) \|;$$

$$(L_0^0)_{\gamma} = \begin{vmatrix} T_{c\gamma}^2(t) & 0 & 0 \\ 0 & T_{a\gamma}^2(t) & 0 \\ 0 & 0 & T_{p\gamma}^2(t) \end{vmatrix}; \quad C^T = \| R_{\gamma} \quad R_{\theta} \|;$$

$$(L_0^0)_{\theta} = \begin{vmatrix} T_{c\theta}(t) & 0 & 0 \\ 0 & T_{a\theta}(t) & 0 \\ 0 & 0 & T_{p\theta}(t) \end{vmatrix}; \quad A_{0\gamma} = B_{ij} = E_m;$$

$$(B_{\Sigma\gamma}^m)^T = \sum_{i=0}^m (B_{i\gamma})^T = \| 2T_{c\gamma}(t) \quad 2T_{a\gamma}(t) \quad 2T_{p\gamma}(t) \|;$$

$$R_f = \| W_u \quad 1 \quad 0 \quad 0 \|; \quad \dot{W}_u = k_u = const;$$

$R_j, T_{ij}, \tau_{ij}$  - функции ( $F_{ij}$ ) вида

$$F_{ij} = a_{0ij} + a_{1ij} \cdot G + a_{2ij} \cdot Q_y + a_{3ij} \cdot P + a_{4ij} \cdot G \cdot Q_y + \\ + a_{5ij} \cdot G \cdot P + a_{6ij} \cdot Q_y \cdot P + a_{7ij} \cdot G^2 + a_{8ij} \cdot Q_y^2 + a_{9ij} \cdot P^2;$$

$Q_y = Q/G$ , для  $T_{ij}, \tau_{ij}$  коэффициенты  $a_{7ij} + a_{9ij} = 0$ ,

$T$  - символ транспонирования матриц.

Структура модели поясняется рисунком I. Как следует из этого рисунка и описания (3), предлагаемый вариант ММ органично сочетает ММ статики (матрица  $C$ ) и ММ динамики (уравнения состояния), что является существенным для нелинейных ОУ.

Приводится характеристика производственного эксперимента, поставленного в условиях Киевского комбикормового завода с целью параметрической идентификации ММ ПГ (3). Описывается измерительно-регистрирующая аппаратура, включающая помимо серийных - устройства, разработанные специально для целей эксперимента - шестиканальный измерительный преобразователь ИП-6 и анализатор параметров стационарных случайных процессов (ССП) АСП-1А.

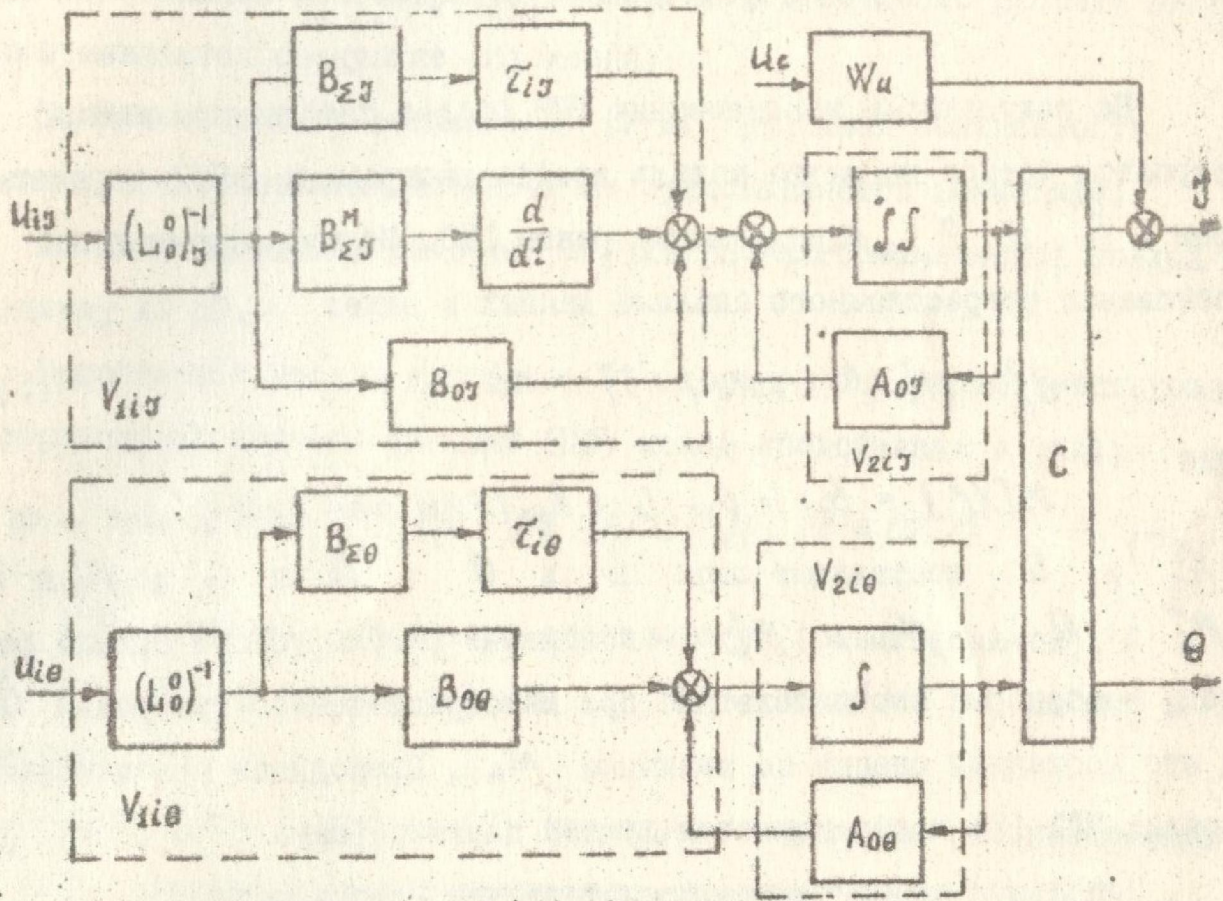
На основании статистической обработки значительного объема экспериментальных данных (более 1000 переходных функций ПГ, свыше 5000 точек статических зависимостей и более 46 часов записей реализаций СП) определяются коэффициенты ММ ПГ (3) и строится ММ ВВ вида:

$$\psi(P) = 6,02 \cdot e^{-0,5 \left( \frac{P-0,215}{0,066} \right)^2};$$

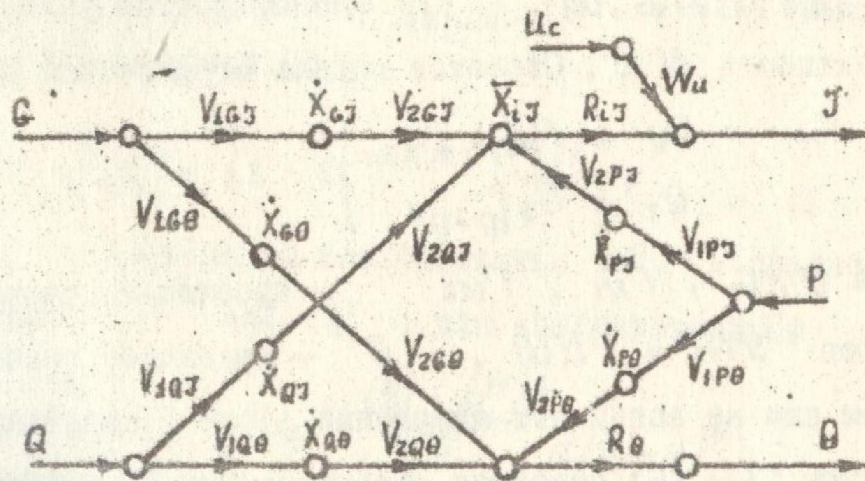
$$\psi(U_c) = 0,116 \cdot e^{-0,5 \left( \frac{U_c - 225,4}{3,43} \right)^2};$$

(4)

$$K_p(\tau) = 0,44 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-0,18 \cdot 10^{-2} \cdot \tau} \left( \cos 0,74 \cdot 10^{-2} \cdot \tau + \right. \\ \left. + 0,264 \sin 0,74 \cdot 10^{-2} |\tau| \right);$$



a)



б)

Рис. 1. Блок-схема (а) и граф (б) ММ ПГ (2.5): ввиду идентичности структуры каналов по Q и P последние (P) на блок-схеме не показаны.

$$K_u(\tau) = 11,76 \cdot e^{-0,51 \cdot 10^{-2} \cdot \tau} (\cos 0,57 \cdot 10^{-2} \cdot \tau + 10,1 \sin 0,57 \cdot 10^{-2} \cdot |\tau|);$$

По результатам исследования РПИ (более пятидесяти опытов) строятся четыре варианта модели дрейфа экстремума (МДЭ) параметров  $(G, Q, P)$ , определяющих режим ГТО. Модели строятся на основании регрессионного анализа данных в виде:

$$Y_i^3 = M[X_i^3(L, R_e, P)] \pm n\sigma_i; \quad (5)$$

где

$$M[X_i^3] = v_{1i} + v_{2i} \cdot L + v_{3i} (P - P_{ном});$$

$X_i$  и  $L$  составляют пары  $G$  и  $\theta$ ;  $\theta$  и  $G$ ;  $\mu'_G$  и  $\theta$ ,  $\mu''_G$  и  $\theta$ ,  $\mu'_G$  и  $\mu''_G$  - положение регулирующего органа расхода комбикорма соответственно при непосредственном измерении  $G$  и его косвенной оценке по величине  $\mu''_G$ . Проводится сравнительный анализ МДЭ (5) и определяется лучший вариант (пара  $\mu'_G$  и  $\theta$ ).

Используя каноническое представление поверхностей

$J(G, Q)|_{P=const}$ ,  $\theta(G, Q)|_{P=const}$  анализируются условия физической корректности ММ ПГ. Строится модель ограничений ПГ вида:

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{M2} \leq Q_y \leq \Gamma_{M1}^0; \\ 0 \leq Q_y \leq Q_y|_{\theta=\theta^*}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $Q_y = Q/G$ ,  $\Gamma_{M1}^0$ ,  $\Gamma_{M2}$  - кусочно-непрерывные функции векторов  $\bar{Y}(t)$  и  $\bar{U}(t)$ ,  $\theta^*$  - граничное значение  $\theta$ , при котором еще не возникает аварийный режим "замазывания".

С учетом (3) + (6) строится обобщенная ММ ПГ и формируется базовый набор ММ, используемых для синтеза АУ ПГ. Набор включает три ММ ПГ (рецепты III-4, I-43 и 56-20), каждая из которых определяется массивом из 76 коэффициентов. Приводятся результаты оценки адекватности ММ ПГ, указывающие на хорошее совпадение с данными

эксперимента.

В третьей главе проводится анализ методов синтеза оптимального АУ нелинейными многомерными объектами и в качестве рабочей гипотезы принимаются следующие положения:

1. Синтезировать оптимальный АУ ПГ, учитывая нелинейность объекта, аналитическими методами не представляется возможным.

2. Целесообразным является структурно-алгоритмический подход к синтезу АУ ПГ.

Выполняется анализ критерия (I), который после соответствующих преобразований целевой функции (ЦФ) можно представить в виде:

$$\Phi \rightarrow \min \int_0^T \{ \gamma(t) [1 + \mu_K^H(t)] - 1 \} dt; \quad t \in (0, T); \quad (7)$$

где  $\gamma(t)$  - увеличение объема производства (относительное),  $\mu_K^H(t)$  - нормированные затраты ( $\mu_K^H = \mu_K / H\delta$ ) на пар и электроэнергию.

Исследования критерия (7) для случая нормально распределенных ССП устанавливается аналитическая зависимость "потерь" ( $H_j$ ) от параметров закона распределения  $M[\ ]$ ,  $\sigma$  и вида ЦФ. В частности, для кусочно-линейной ЦФ

$$H_{j1} = \frac{4n \cdot c_{2j}}{3\sqrt{2\pi}} (1 - e^{-0,5n^2}) \cdot \sigma_j^2; \quad (8)$$

где  $n$ ,  $c_{2j}$  - постоянные коэффициенты,  $\sigma_j$  - среднеквадратичное отклонение  $J$  или  $\Theta$ ; для квадратичной ЦФ

$$H_{j2} = \frac{c_{2j}}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \int_{-n\sigma_j}^{n\sigma_j} (y_j - y_j^{zd})^2 \cdot e^{-\frac{(y_j - y_j^{zd})^2}{2\sigma_j^2}} \cdot d(y_j - y_j^{zd}); \quad (9)$$

где  $y_j$  - соответственно  $J$  или  $\Theta$ ,  $y_j^{zd}$  - заданное значение параметра.

Согласно (8), (9) потери  $H_{ij}$  не зависят от  $y_j^{zd}$  (т.е. ЦФ этого вида инвариантны к заданному значению управляемого параметра). Это позволило доказать эквивалентность (для рассмотренных ЦФ) крите-

рия (7) и критерия вида:

$$\Phi \rightarrow \min \left\{ \sum_{j=1}^2 \mathcal{E}_p''(y_j^{zd}) + \mathcal{E}_\gamma \int_0^T [\mathcal{J}(t) - \mathcal{J}^{zd}]^2 dt + \right. \\ \left. + \mathcal{E}_\theta \int_0^T [\theta(t) - \theta^{zd}]^2 dt \right\}; \quad (10)$$

где

$$\mathcal{E}_\gamma = 4n c_{2\gamma} / 3\sqrt{2\pi} (1 - e^{-0,5n^2}), \quad \mathcal{E}_\gamma = 1, \quad \mathcal{E}_\theta = c_{2\theta} / c_{2\gamma} \approx 4.$$

и таким образом обосноват (учитывая адекватность аппроксимации расчетной ЦФ ПГ квадратичным полиномом) применимость для целей синтеза АУ ПГ квадратичного критерия (10).

Инвариантность ЦФ (7), (10) к положению  $y_j^{zd}$  обеспечивается при условии  $c_{ij} = const$ , но поскольку изменение  $Re$  приводит к дрейфу экстремума ЦФ (7), т.е.  $c_{ij} = f(Re)$ , то задача статической оптимизации АСР ПГ, в частности, по параметру  $\theta$  сохраняет свою значимость.

В связи с этим разработан метод (метод  $A^z$ -преобразований) статической оптимизации АСР с линейной моделью дрейфа оптимизируемого параметра вида (5). Он может рассматриваться, как развитие идеи формирования искусственных статических характеристик, используемой для построения дифференциальных экстремальных систем регулирования. Теоретической основой метода служат утверждения, справедливость которых для широкого класса нелинейных многосвязных систем управления (устойчивых по А.М. Ляпунову) доказывается в работе.

**Теорема 1.** Множество  $M_c$  всех стационарных точек системы управления является подмножеством множества  $M_s$  точек гиперплоскости

$$S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (v_i^{-1} - \delta_i \cdot u_{ij}); \quad (11)$$

с той же областью определения.

**Теорема 2.** Множество  $M_c$  является собственным (непустым) подмножеством  $M_s$ , т.е.  $M_c \equiv M_s$ .

Теорема 3. Оптимальная статическая характеристика вида:

$$y^{opt} = m^{-1} (a_i^{-1} + b_i \cdot u_{ij}), \quad i = (1, m); \quad (I2)$$

всегда реализуема системой управления при условии:

$$\left. \begin{aligned} a_i &\leq 1 / (m y_{min} - b_i \cdot u_{ijmin}); \\ a_i &\geq 1 / (m y_{max} - b_i \cdot u_{ijmax}); \\ a_i &\leq \gamma_i / m, \quad a_i \leq m \delta_i; \end{aligned} \right\} \quad (I3)$$

где  $y_{extz}$ ,  $u_{ijextz}$  определяют  $\bar{y}(t)$  и  $\bar{u}(t)$ ,  $m$  - размерность  $\bar{u}(t)$ .

По результатам (I1) + (I3) строятся методики синтеза алгоритмов статической оптимизации АСР (адаптивного и неадаптивного) и синтезируется алгоритм статической оптимизации АСР III вида:

$$u_z(t) = \alpha_u \int_0^t Z(t) dt + \alpha_n \cdot Z(t) + \alpha_p \cdot \dot{Z}(t); \quad (I4)$$

где  $Z = \gamma [G(\theta) + \delta \theta]^2 - [G(\theta) + \delta \theta]$ ;

$\alpha_u, \alpha_n, \alpha_p$  - "настроечные" параметры,  $\gamma = b_{1G}^{-1}$ ,  $\delta = b_{2G}$ .

Излагается процедура синтеза оптимального АУ III, которая в соответствии с (I) + (I7) и допущением 2 построена из двух этапов. На первом этапе путем минимизации достаточно общей схемы АУ III, приведенной на рисунке 2, выделяется набор "типовых элементов структуры", под которыми понимается система операторов и связей, выполняющих определенную функцию - стабилизация, оптимизация, коррекция и т.п.

На втором - решаются задачи оптимизации "настроечных" параметров "конкурирующих" вариантов АУ III на ЭВМ. Проводится сравнительный анализ этих вариантов для вынужденного (ВВ (4)) и свободного движения АСР III в установившихся и пусковых режимах. По характеру процедуры синтезируемый алгоритм не является оптимальным в строгом смысле этого слова, поэтому под оптимальным АУ III везде следует по-



нимать наилучший по критерию (7) или (9) из набора АУ определенного в работе.

Возможность реализации широкого перебора вариантов обеспечивалась применением универсального АУ вида:

$$U_j(p) = \Psi_n \cdot X_j^n(p) + \Psi_p \cdot \dot{X}_j^{n*}(p) + \Psi_n \cdot K_{2j} \cdot \Psi_u \cdot X_j^n(p) - \Psi_m \cdot f_j(p); \quad (I5)$$

где

$$X_j^n(p) = X_j(p) - \frac{12 K_j^n}{(T_{nj} \cdot p + 1)(\tau_{nj}^2 \cdot p^2 + 6\tau_{nj} \cdot p + 12)};$$

$$\dot{X}_j^{n*}(p) = \frac{K_{1j} \cdot p}{T_{1j} \cdot p + 1} \cdot X_j^n(p); \quad \Psi_n = \begin{cases} \alpha_n & \text{если } g_j \cdot X_j^n \geq 0; \\ \beta_n & \text{если } g_j \cdot X_j^n < 0; \end{cases}$$

$$\Psi_p = \begin{cases} \alpha_p & \text{если } g_j \cdot \dot{X}_j^{n*} \geq 0; \\ \beta_p & \text{если } g_j \cdot \dot{X}_j^{n*} < 0; \end{cases} \quad \Psi_u = \begin{cases} \alpha_u & \text{если } g_j \cdot u \geq 0; \\ \beta_u & \text{если } g_j \cdot u < 0; \end{cases}$$

$$u = K_{2j} \cdot \Psi_u \cdot X_j^n(p) \cdot \frac{1}{p}; \quad g_j = X_j^n - c_{gj} \cdot \dot{X}_j^{n*};$$

$$|X_j^n| \leq B_j; \quad |\dot{X}_j^{n*}| \leq B_j; \quad |\Psi_m \cdot f_j| \leq B_j; \quad X_j = Y_j - Y_j^{3d};$$

$$K_{1j}, T_{1j}, T_{nj}, \tau_{nj}, K_{2j}, c_{gj}, B_j = \text{const.}$$

Из анализа результатов синтеза АУ ПГ на ЭВМ определяется оптимальный вариант, состоящий в применении комбинированного АУ (СПС + ПК + ОП + А), включающего: алгоритмы СПС, прогнозирующие коррекции типа "упредитель Смита" (ПК), беспойсковый алгоритм статической оптимизации АСР ПГ (I7) (ОП) и аperiodические коррекции (А)  $J_n^{3d}$  и  $\Theta_n^{3d}$ .

В четвертой главе дается краткая характеристика экспериментального образца оптимальной АСР ПГ на базе многофункционального регулятора МФР-2, реализующего весь набор исследуемых АУ. Приводятся основные результаты производственного эксперимента по практиче-

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

св. 13650

V 013650

ской проверке результатов синтеза оптимального АУ ПГ. Выполняется сравнительный анализ результатов теоретических исследований и их практической реализации. На основании хорошего совпадения этих результатов делается вывод об адекватности разработанных ММ и эффективности предложенной процедуры синтеза АУ ПГ. В приложении приводится акт, отражающий основные итоги эксперимента.

Обсуждаются результаты внедрения опытно-промышленного варианта оптимальной АСР ПГ, разработанного на основании комплекса предыдущих исследований. Отмечается, что впервые в отечественной практике создана АСР ПГ, обеспечивающая автоматический вывод ПГ с режима "холостого хода" на оптимальный режим и качественное управление процессом при наличии существенных ВВ случайного характера. Эффект от внедрения составил более 30 тысяч рублей в год на один экземпляр оптимальной АСР ПГ. Выводы иллюстрируются рисунком 3.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследованный участок ТП гранулирования представляет сложный динамический объект, для которого характерны нелинейность, нестационарность, многосвязность при наличии запаздывания и значительных возмущений случайного характера по сырью и энергоносителю. Адекватное описание этого объекта потребовало специального обоснования структуры математической модели и большого объема экспериментальных исследований по ее параметрической идентификации. Однако, несмотря на значительные трудовые затраты, синтез такой ММ целиком себя оправдал на последующих этапах создания оптимальной АСР ПГ.

2. Стремление к более точному отражению объекта на всех этапах синтеза оптимального алгоритма управления привело к необходимости разработки метода статической оптимизации АСР (метод  $A^2$  преобразований) и ряда методик, позволивших в конечном итоге соз-

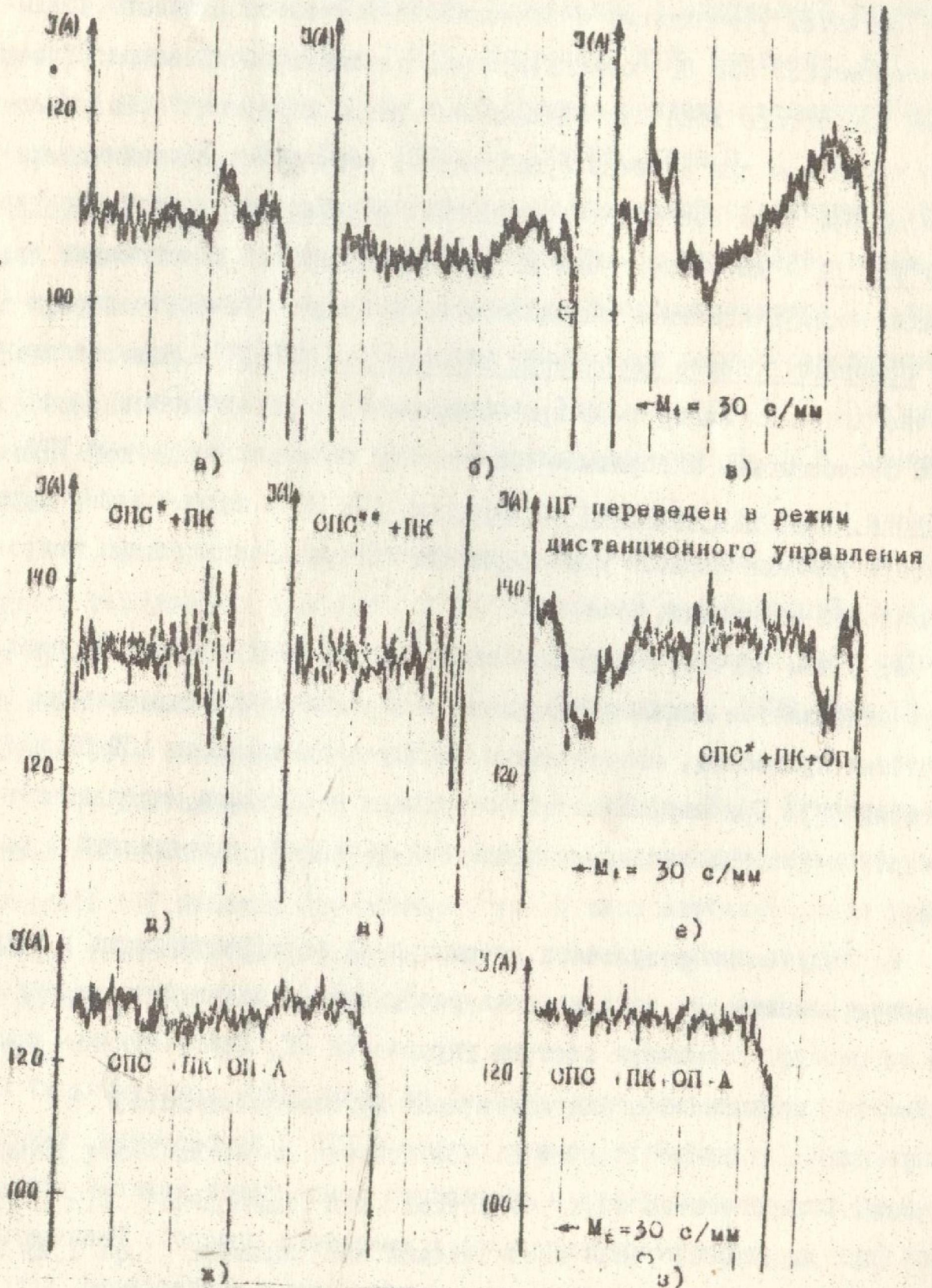


Рис. 3. Фрагмент экспериментальных записей пусковых режимов при управлении ПГ квалифицированным оператором (а, б, в) и АСР ПГ (г, д, е, ж, з): \* - с коммутацией П-составляющей, \*\* - с коммутацией П и Д-составляющих.

дать эффективную всережимную АСР ПГ.

3. Основным фактом, доказанным в результате проведенной работы, является утверждение о возможности и целесообразности создания всережимной АСР ПГ, обеспечивающей автоматический вывод ПГ с режима "холостого хода" на оптимальный режим и качественное управление процессом при наличии существенных возмущений случайного характера. При этом необходимо учитывать: основной источник эффективности АСР ПГ - интенсификация ТП при одновременном обеспечении высокой эксплуатационной надежности и требуемого качества продукции; основное условие реализации эффективной АСР ПГ - применение кусочно-линейных алгоритмов прогнозированного управления в сочетании с беспойсковым алгоритмом статической оптимизации режима ГТО; основная трудность создания оптимальной АСР ПГ - недостаточная изученность влияния свойств комбикорма на оптимальность режима гидро-термической обработки.

4. В том случае, когда изменение управляемых величин ПГ адекватно описывается моделью нормально распределенных стационарных случайных процессов, обоснованную оценку оптимальности АСР ПГ дает критерий (9). При нарушении этого условия необходимо использовать критерий с кусочно-непрерывной целевой функцией, приведенный в работе.

5. Полученные результаты, несмотря на их эффективность и определенную новизну, не отрицают целесообразности дальнейших исследований по совершенствованию системы управления ПГ. Перспективным представляется направление исследований по разработке адаптивных АУ ПГ для участка, включающего помимо операций ГТО и прессования, также операции охлаждения гранул и обогащения комбикормов жидкими добавками (при их вводе непосредственно в смеситель прессы). Реализация таких АУ перспективна на базе микропроцессорных контроллеров или УВК.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Система автоматического управления с адаптацией по параметру скользящего режима / П.Н. Платонов, Л.П. Драгаева, В.П. Драгаев, А.Е. Гончаренко. В кн.: Адаптивные системы автоматического управления.- К., Техника, 1974.- с. 53-59.- Вып.3.
2. Гончаренко А.Е. Разработка рациональной структуры и модулей технических средств для автоматизации исследований, наладки и профилактики АСР зерноперерабатывающей промышленности.- В кн.: Всесоюз. конф. "Научно-технический прогресс в зерноперерабатывающей промышленности", Тез. докл.- Одесса, 1977.- с. 78-79.- (Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова).
3. Долгозвяг В.А., Гончаренко А.Е. Разработка структуры и модулей технических средств для автоматизации исследований, наладки и профилактики АСР в пищевой промышленности.- В кн.: Реф. информ. о законченных НИР в ВУЗах УССР.- К., Вища школа, 1978, вып.13, с. 58-59.- (Пищевая промышленность).
4. Долгозвяг В.А., Гончаренко А.Е., Хобин В.А. К вопросу автоматизации научных экспериментов при исследовании установившихся режимов АСР пищевой промышленности.- В кн.: Автоматическое управление технологическими процессами в пищевой промышленности.- Краснодар, 1979, с. 41-47.- (Тр. / Краснодар. политехн. ин-т, вып. 92).
5. Специализированная аппаратура для автоматизации исследований установившихся режимов АСР объектами пищевой промышленности / А.Е. Гончаренко, В.А. Долгозвяг, А.Г. Плева, В.А. Хобин.- В кн.: Тр. / Всесоюз. НИИ комбик. пром.- М., 1979, вып. 15, с.67-68.
6. Разработка и исследование программных модулей для автоматизации проектирования АСР объектов пищевой промышленности / В.А. Долгозвяг, А.Е. Гончаренко, Г.М. Редунов, В.А. Хобин.- В кн.:

Всесоюз. науч.-техн. конф. "Проблемы математического, программного и информационного обеспечения АСУ технологическими процессами". Тез. докл. - Черновцы, 1979, с. III-II2.

7. А.с. по заявке № 2795827/25-27, Заявлено 28.06.1979.  
Устройство для автоматического управления пресс-гранулятором / В.А. Долгозвят, А.Е. Гончаренко, Г.М. Редунов, В.А. Хобин, А.Г. Плева. - Положит. р. пат. от 29.01.1980.

8. Хобин В.А., Гончаренко А.Е., Плева А.Г. Регулятор с кусочно-линейным алгоритмом прогнозируемого управления для промышленных автоматических систем. - В кн.: I-я Всесоюз. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов "Управление производством и автоматизированные системы управления": Тез. докл. - М., 1980, с. 107-108.

9. Построение математической модели пресс-гранулятора ДГ-I и ее исследование в широком диапазоне режимных условий / В.А. Долгозвят, А.Е. Гончаренко, А.Г. Плева, Г.М. Редунов, В.А. Хобин. - Изв. вузов, Пищевая технология, 1981, № 3, с. 110-112.