

05.13.02

>11

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Тележкин Владимир Федорович

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
СЕТЕВОГО ПОДХОДА

05.13.02 - Теория систем, теория автоматического  
регулирования и управления, системный  
анализ"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1982

ИТИ

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола

Научный руководитель - доктор технических наук, старший  
научный сотрудник Лазарев И.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор  
Половинкин А.И.,  
кандидат технических наук,  
доцент  
Влакоманов В.В.

Ведущая организация - институт кибернетики АН УССР

Защита состоится 16 июня 1982 года, в 15 часов, на заседа-  
нии специализированного совета К.058.18.04 в Челябинском поли-  
техническом институте, аудитория 244 (454044, г.Челябинск,  
пр.Ленина, 76)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " мая 1982г.

Ученый секретарь  
специализированного совета



В.С.Лазарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** Современный этап научно-технической революции предъявляет повышенные требования к качеству создаваемых автоматических систем (АС), выполняющих те или иные функции по управлению самыми различными физическими процессами во многих областях техники. Это вызвало необходимость качественного расширения задач, изучаемых теорией автоматического регулирования и управления. В результате традиционная задача оптимального синтеза АС по показателям качества функционального процесса (точность, устойчивость, быстродействие) при заданной структуре её энергетической части и соблюдении заданных требований по всем необходимым другим её свойствам (надёжность, стоимость, масса) была качественно расширена до задачи, в которой оптимальный синтез АС осуществлялся как по показателям качества функционирования, так и по экономическим показателям в совокупности при незаданной (т.е. искомой) структуре её энергетической части. Чтобы эффективно (т.е. с наименьшими затратами ресурсов материального, интеллектуального и временного характера) решить эту задачу при большом количестве альтернативных вариантов исполнения АС и несовпадении условий оптимальности её элементов (информационных и энергетических) с условиями оптимальности этих элементов как компонентов системы необходимо осуществлять направленное формирование системы как единого информационно-энергетического комплекса с использованием процедур совместной структурной (комбинаторной) и параметрической оптимизации её энергетической части по показателям экономического и функционального характера в совокупности в рамках располагаемой базы данных, содержащей математические модели разрабатываемой системы.

В известных подходах при разработке информационной части АС структура и обобщенные (внешние) параметры её энергетической части рассматриваются как заданные и свойства системы пытаются улучшить только за счет выбора определенным образом подобранного закона регулирования с использованием многошаговых итерационных процедур согласования принимаемых решений среди априорно выбранных её возможных вариантов. В результате, как правило, не гарантируется возможность достижения действительно оптимального решения за приемлемый (зачастую очень сжатый) срок. Необходимость в одновременном выполнении оптимизационных операций комбинаторного и параметрического характера диктуется тем обстоятельством, что принятые показатели качества АС зависят не только от выбранного варианта сочетания её энергетических элементов (т.е. от выбранного варианта её структуры), но и от выбранных численных значений обобщенных параметров (кцд) этих элементов. В свою очередь оптимальные численные значения обобщенных параметров этих элементов

зависят от выбранной структуры АС. В настоящей работе методы оптимального структурно-параметрического синтеза на основе сетевого подхода\* нашли своё развитие применительно к односвязным автоматическим системам, функции энергетических элементов которых связаны с приёмом, преобразованием, передачей и накоплением энергии электрического, гидравлического или пневматического характера. При этом оптимальная структура системы и оптимальные обобщенные параметры её элементов выбираются по результатам структурно-параметрического синтеза эффективных ("паретовских") структур с учетом экономических показателей, показателей надежности и показателей, учитывающих ожидаемые потенциальные возможности АС в области её статических и динамических характеристик. Необходимость в использовании последних показателей качества объясняется тем, что значения показателей качества функционального процесса АС определяются как типом и параметрами корректирующих (информационных) устройств, так и выбранным вариантом её структуры. Поэтому выбор варианта структуры АС из множества допустимых технических решений необходимо осуществлять с учетом как экономических и надежных показателей, так и показателей качества функционального процесса. В связи со сложностью установления строгой однозначной зависимости между показателями качества функционального процесса элементов и аналогичными показателями АС до завершения этапа формирования её структуры представляет определённый интерес оценка ожидаемого качества функционального процесса всей системы по потенциальным возможностям выбираемых элементов агрегатной базы. Процедура оптимизации внутренних параметров АС с целью улучшения показателей качества её функционального процесса осуществлялась с учетом найденных обобщенных параметров структуры системы. Это представляет как теоретический, так и практический интерес, поскольку позволяет эффективно (т.е. экономно организовать поиск наилучшего варианта) решать одну из важнейших задач теории автоматического регулирования - задачу оптимального синтеза автоматической системы по показателям экономического и функционального характера.

Актуальность проведенных исследований вытекает из практической необходимости поиска путей повышения качества создаваемых АС, что нашло своё отражение в материалах XXVI съезда КПСС.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Целью работы является повышение качества функционирования АС и улучшение их экономических показателей на основе использования методов структурно-параметрического синтеза, ориентированных на использование ЭВМ.

\* Лазарев И.А. Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1976. - 255 с.

В соответствии с поставленной целью основные задачи работы определены следующим образом.

1. Разработать сетевой алгоритм оптимального структурно-параметрического синтеза АС при учете ожидаемого влияния характеристик её энергетических элементов на показатели качества функционального процесса.

2. Разработать алгоритм получения эффективных ("паретовских") структур АС на основе направленного поиска варианта структуры системы и её параметров при оптимальном (согласованном в диалоге с ЛПР) компромиссе по показателям экономического и функционального характера.

3. Разработать машинный метод построения математической модели процесса функционирования (передаточной функции) АС синтезированной структуры по схемам замещения её элементов, обеспечивающий количественную оценку динамических свойств системы при экономии памяти ЭВМ.

4. Разработать метод направленного поиска путей улучшения статических и динамических характеристик автоматической системы выбранной структуры.

5. Реализовать полученные алгоритмы и методы на практике.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** Научная новизна результатов работы заключается в развитии сетевого подхода применительно к расширенному оптимальному структурно-параметрическому синтезу АС и разработке на его основе новых машинных методов (и алгоритмов) анализа и оптимального структурно-параметрического синтеза технических систем указанного класса как единых информационно-энергетических комплексов.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.** Практическая ценность полученных результатов определяется:

- эффективностью использования созданных алгоритмов и методов на практике, а именно, повышением качества функционирования автоматических систем при улучшении экономических показателей и сокращении трудовых и материально-технических ресурсов на их создание, что подтверждается соответствующими актами внедрения и отзывом заказчика ;

- возможностью использования разработанных машинных алгоритмов и методов в качестве основы математического и программного обеспечения САПР автоматических систем, в частности, автоматических систем вторичного электропитания подвижных автономных объектов, (СВЭ ПАО);

- наличием запросов, поступивших в Госфонд алгоритмов и программ СССР на помещенные компоненты программного обеспечения разработки;

- использованием результатов работы в учебном процессе в составе учебного пособия.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на: I) седьмой Всесоюзной конференции "Моделирование электроэнергетических систем", проводимой научным советом по комплексной проблеме "Кибернетика" при АН СССР (Таллин, 1977г.); зональной научно-технической конференции "Радиоэлектроника и автоматика на службе пятилетки качества" (Свердловск, 1978г.); Всесоюзном семинаре АН СССР "Кибернетика электротехнических систем" (Челябинск, 1978г.); региональном научно-техническом семинаре по вопросам теории и принципам построения оптимальных устройств автоматики (Новочеркасск, 1978г.); четвертом Всесоюзном совещании по управлению многосвязными системами, проводимом национальным комитетом СССР по автоматическому управлению (ИПУ) (Москва, 1978г.); втором Всесоюзном научно-техническом семинаре "Оптимизация технических систем" (Винница, 1979г.); Всесоюзном семинаре АН СССР "Автоматизированное проектирование электротехнических устройств и комплексов" (Челябинск, 1981г.).

**ПУБЛИКАЦИИ.** Основное содержание работы опубликовано в 16 работах.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (141 наименование) и приложений. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков и 7 таблиц.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Развитие современной техники характеризуется широким распространением АС. Примером АС могут служить электроэнергетические системы (ЭЭС), технические средства автоматики различных отраслей народного хозяйства. АС во многих случаях представляют собой очень сложные устройства. Однако, любую АС можно разделить на отдельные элементы, выполняющие определённые функции вне зависимости от её конструкции, вида энергии и других факторов. Каждая АС состоит из объекта (О) и регулятора (рис. I). Последний состоит из датчика (Д), задающего элемента (ЗД), элемента сравнения (ЭС), корректирующего элемента (КЭ) и цепи регулирования. Обычно располагаемая элементно-агрегатная база АС конечна и относительно невелика, потенциальные же возможности по созданию высокоэффективных систем (т.е. множество допустимых технических решений) чрезвычайно разнообразны, поскольку определяются возможностями по формированию различных комбинаций энергетических, информационных и конструктивных связей между элементами системы. На рис. I показаны некоторые возможные варианты исполнения цепи регулирования АС ПАО одного класса. Если принять во внимание все известные принципы действия, схемы и конструкции АС, то можно констатировать, что небольшое число её элементов позволяет построить большое число

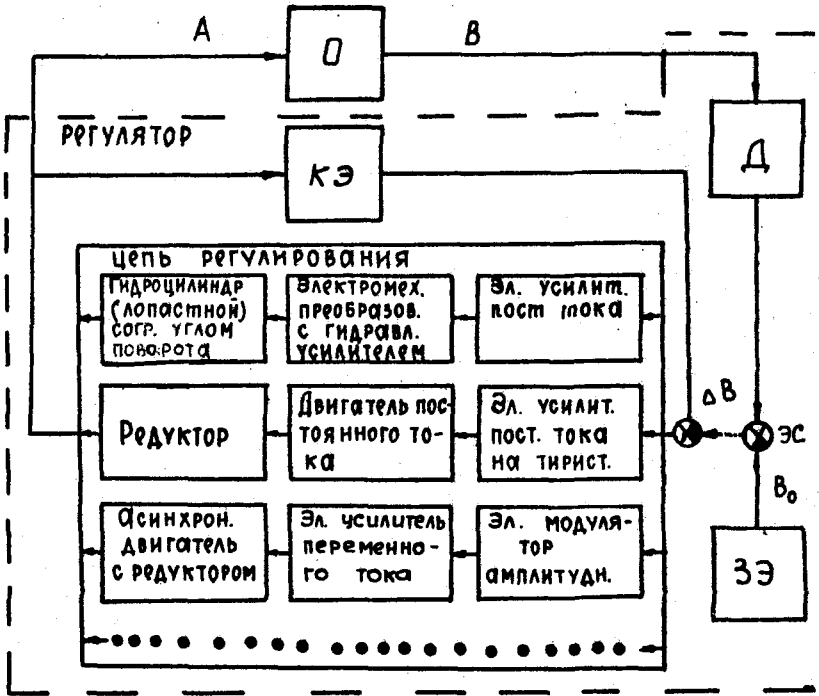


Рис. 1

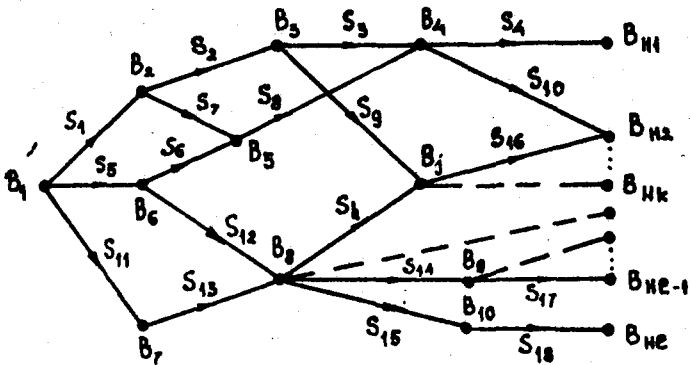


Рис. 2

исследуемых автоматических систем (Тищенко Н.М. и др.). Априорное ограничение множества возможных вариантов подмножеством заданных разработчиком приводит к неполному использованию возможностей по улучшению функциональных и экономических показателей создаваемых систем. Всё это указывает на насущную необходимость использования в процессе выбора структуры АС методов, которые бы обеспечивали возможность выбора решения, наилучшего по принятым показателям качества в рамках располагаемых потенциальных возможностей. Такой подход нашел своё развитие в работах Половинкина А.И. на уровне использования многообразия элементарных физических процессов, а также в работах Лазарева И.А., где множество допустимых технических решений представляется в виде сетевой математической модели (рис.2), каждый маршрут (путь) которой от вершины  $V_1$  (исток или источник энергии) до вершин  $V_{nk}$ ,  $k = \overline{1, \ell}$  (стоки или потребители энергии) является допустимым вариантом исполнения структуры АС. Эту сеть можно рассматривать как конечный связный орграф  $G = (S, B)$ , где  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, \dots\}$  - дуги графа, которым ставятся в соответствие технические устройства элементарно-агрегатной базы АС, реализующие отдельные функциональные операции преобразования накопления и передачи потока энергии; передачам  $K(s_n) = \{k_m^n = f_m^n(p), k_m^n = \varphi_m^n(\eta), m = \overline{1, m}; p, \eta \in X_0 \subset X\}$  дуг графа поставлены в соответствие численные значения принятых показателей экономического и функционального характера, удовлетворяющие условиям аддитивности;  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots\}$  - узлы графа соответствуют видам энергии, получаемой при выполнении отмеченных выше функциональных операций.

Постановка задачи оптимального синтеза АС на сети  $G = (S, B)$  вытекает из особенностей её эффективного исследования в условиях большого количества альтернатив и неоднородности оценочных показателей, а также обзора работ по обсуждаемой тематике. На основании проведенного обзора делается вывод о необходимости развития сетевого подхода, являющегося удобной формальной основой для построения машинных процедур структурной и параметрической оптимизации АС. В работе обсуждается (в утверждении I) необходимость совмещения структурной и параметрической (по обобщенным параметрам) оптимизации АС в процессе её направленного синтеза из множества допустимых технических решений.

Таким образом, существенный практический и теоретический интерес представляет разработка методов оптимального структурно-параметрического синтеза АС, ориентированных на использование ЭВМ и обеспечивающих повышение эффективности решения прикладных задач оптимального синтеза АС по показателям экономического и функционального ка-



рактера. Исходя из этого сформулированы приведенные выше цель и задачи работы.

2. СЕТЕВОЙ МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. Метод основан на сетевом алгоритме оптимального структурно-параметрического синтеза АС, с помощью которого решается задача направленного поиска эффективных ("паретовских") её структур из множества допустимых технических решений по показателям экономического и функционального характера. Получение множества  $\{s^t, \{t\} = T\} \subset G^n \subset G = (s, B)$ , где  $G^n$  - множество "паретовских" структур АС, в работе основано на известном\* положении: если структура  $s^t \subset G^n$ , то существует такой вектор  $A^t: \{0 \leq a_m^t \leq 1, m = \overline{1, m}, \sum_{m=1}^m a_m^t = 1\}$ , что минимум функции:

$$K(A^t) = \sum_{k=1}^m a_m^t \sum_{h=1}^m a_m^t k_m^h / k_m^0, \quad (I)$$

на множестве  $G = (s, B)$  (множество не пусто) достигается для  $s = s^t \subset G^n$ . При этом предполагается, что компоненты функции (I) являются выпуклыми функциями варьируемых параметров  $p_h, b_h \in X_B$  - замкнутое выпуклое множество варьируемых параметров, где  $p_h, b_h$  - мера измерения, соответственно, потока передаваемой энергии и потеря его передачи элементами  $\{s_h, \{h\} = H\} \in s^t \subset G^n \subset G = (s, B)$ . Таким образом, алгоритм получения множества эффективных решений сводится к их направленному поиску в рамках непустого множества  $G = (s, B)$  при условии минимизации принятого обобщенного показателя (I) и определяемыми в диалоге с ЛПР его весовыми коэффициентами  $\{a_m, m = \overline{1, m}\}$ . Прогнозирование численных значений весовых коэффициентов функции (I) может быть выполнено на основе топологической модели парных отношений, которая формируется ЛПР путем установления качественных уровней доминирования ( $R_0, R_1, R_2, R_3, \dots$ ) весовых коэффициентов. Заданные ЛПР качественные уровни предпочтения (приоритеты) принятых показателей качества функции (I) преобразуются в количественную информацию с помощью предложенного в работе машинного алгоритма. Этот алгоритм позволяет уточнять численные значения показателей доминирования, составленной ЛПР топологической модели парных отношений, и определять с помощью аппарата теории вероятностей средние значения весовых коэффициентов  $\{a_m, m = \overline{1, m}\}$ . При составлении топологической модели парных отношений на первом её уровне ЛПР устанавливается условная качественная мера ожидаемого

\* Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике. - М.: Мир, 1964. - 837 с.

доминирования весовых коэффициентов  $A^1 = \{a_{jm}^1, j = \overline{1, m}\}$  варианта  $S_k^1 \in G^n \subset G = (S, B)$ ; на втором уровне ЛПР устанавливается предпочтение попарно сравниваемых коэффициентов  $A^1, A^2 \in \{A^t, \{t\} = T\}$  вариантов  $S_k^1, S_k^2 \in G^n \subset G = (S, B)$ , причем для варианта  $S_k^1$  известно точное количественное распределение величин принятых показателей качества, поскольку был осуществлен его направленный поиск и т.д. Условием конца процедуры поиска оптимального варианта структуры АС является условие получения удовлетворительных значений (с точки зрения лица принимающего решение) компонент вектора  $\{k_{jm}(S^t), j = \overline{1, m}\}$ , варианта структуры  $S^t \in G^n \subset G = (S, B)$ . В предложенной процедуре прогнозирования численных значений весовых коэффициентов функции (I) используется информация как априорного, так и апостериорного характера. Это позволяет получать достоверные данные эвристического алгоритма прогнозирования весовых коэффициентов функции (I).

Общая методология поиска "паретовских" структур АС состоит из следующих этапов (рис.3): на первом этапе решается задача I, которая позволяет найти граничные решения (рис.4)  $S_0^1, S_0^2, \dots, S_0^n \in G^n \subset G = (S, B)$ , оптимальные по каждому из принятых показателей качества (результат этой операции - вектор  $K^0 = \{k_1^0, k_2^0, \dots, k_m^0\}$ ) позволяет реализовать один из способов нормализации обобщенного показателя (I); на втором этапе (задача 2) осуществляется направленный поиск компромиссных ("паретовских") решений по обобщенному показателю (I) при  $A^2 = \{0 < a_{jm}^2 < 1, j = \overline{1, m}, \sum_{j=1}^m a_{jm}^2 = 1\}$ . В работе обсуждается (утверждение 2) необходимое и достаточное условие получения "паретовских" структур АС из множества  $G = (S, B)$  при принятом в диалоге с ЛПР компромиссе между показателями экономического и функционального характера.

Операция направленного поиска граничных и компромиссных структур АС из множества допустимых технических решений состоит в выборе маршрутов  $\{S^t, \{t\} = T\} \subset G^n$  от истока  $B_1$  (рис.2) к стокам  $B_{k\lambda}, \lambda = \overline{1, P}$  сетевой модели  $G = (S, B)$  и оптимальных численных значений обобщенных параметров ( $h$ ) элементов, принадлежащих этим маршрутам, при обеспечении минимизации численного значения принятого показателя качества  $\sum_{S^t \in G^n} a_{jm}(S, B) f_{jm}^h(p) - \Delta F_{jm}^+(p, h)$ . Для реализации этой операции в работе предложен сетевой алгоритм направленного оптимального структурно-параметрического синтеза АС, в котором совмещены оптимизационные операции комбинаторного и параметрического характера. В основу оптимизационных операций комбинаторного характера положены идеи венгерского метода решения линейной транспортной задачи и потокового алгоритма Форда-Фалкерсона.

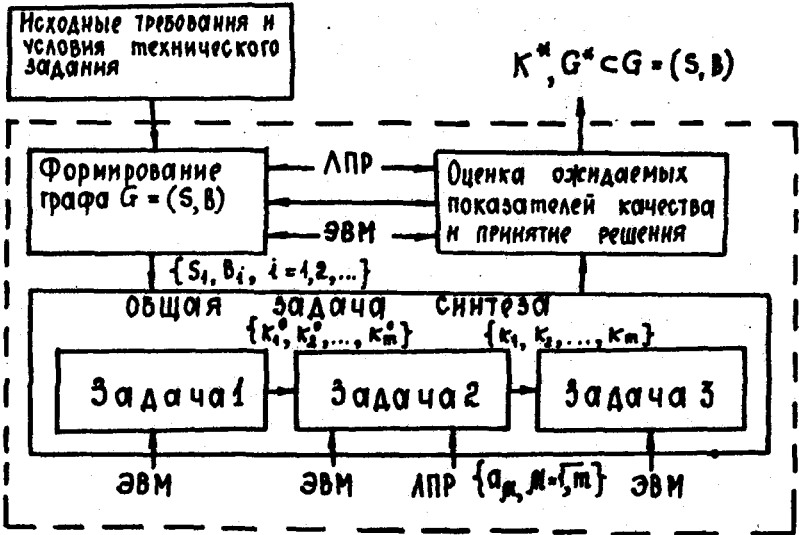


Рис.3

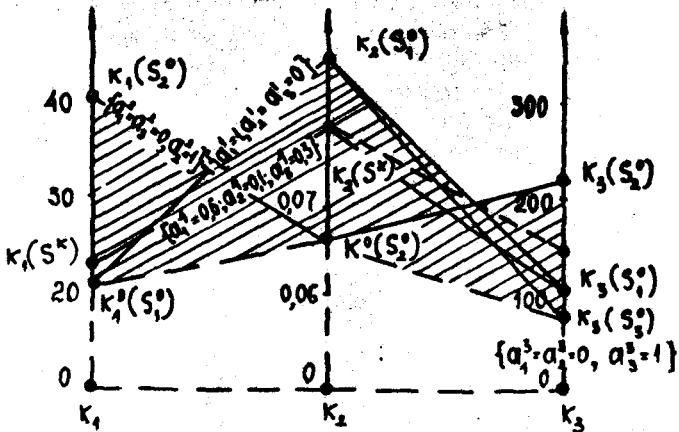


Рис.4

Основу оптимизационных операций параметрического характера составляют процедуры оптимизации обобщенных параметров - потерь передаваемого потока энергии в графе  $G = (S, B)$  из условий обеспечения экстремальных значений принятого показателя качества. При этом обеспечиваются заданные условия  $\Phi_y^{saa}$  работы системы (например, превышение температуры относительно окружающей среды).

На начальном этапе данного ( сетевого) алгоритма ( $z=1, k=1$ ) имеем следующее подмножество частных решений:  $\omega_1^z, \omega_2^z, \dots, \omega_n^z, \dots, \omega_N^z$ , для которых осуществляется эквивалентное преобразование коэффициентов стоимости (выпуклые аддитивные функции стоимости  $k_{j\bar{k}}^z = f_{j\bar{k}}^z(p)$ ) и потерь  $k_{j\bar{k}}^z = q_{j\bar{k}}^z(h)$  являются непрерывно-дифференцируемыми и, в общем случае, неоднозначными, т.е.  $\Delta f_{j\bar{k}}^z(\Delta p) \neq \Delta q_{j\bar{k}}^z(\Delta h)$ ,  $p, h \in X_B, p > 0, h > 0$  ):

$$C_{j\bar{k}}^{(k)} = \Delta f_{j\bar{k}}^z(\Delta p_{j\bar{k}}) / \Delta p_{j\bar{k}}, \quad (2)$$

где  $\Delta p_{j\bar{k}} = p_{j\bar{k}} - p_{j\bar{k}-1}$ ;  $p_{j\bar{k}0} = 0$ ;  $p_{j\bar{k}}, p_{j\bar{k}-1} \in X_{j\bar{k}}^{(k)} \subset X_{j\bar{k}} \subset X_h \subset X_B = \{p, h\} \subset X = \{X_B, X_h\}$ ,  $z=1$ , путем уменьшения их на величину  $\Delta p_{j\bar{k}} = \min_{h \in X_h} \bar{C}_{j\bar{k}}^{(k)}(\bar{C}_{j\bar{k}}^{(k)} = C_{j\bar{k}}^{(k)}$  при  $z=1$ ), т.е.  $\bar{C}_{j\bar{k}}^{(k)} = C_{j\bar{k}}^{(k)} + \bar{C}_{j\bar{k}}^{(k-1)} - \Delta z$  (при  $z=1, k=1, \bar{C}_{j\bar{k}}^{(0)} = 0$ ). (3)

После этого осуществляется пометка вершин сети  $G = (S, B)$  с нулевой стоимостью, т.е.  $N(J) = I$  и  $M(z) = J$ . Эта операция эквивалентна передаче потока энергии в заданном количестве (количество энергии определяется интенсивностью её потребления разрешенным стоком сети  $G = (S, B)$  на данном  $k$ -м итерационном этапе поиска кратчайшего маршрута передачи потока энергии от пункта его производства к пунктам его потребления). Пометка  $N(J) = I$  позволяет восстановить кратчайший маршрут в сети  $G = (S, B)$  после достижения разрешенного стока. Пометка  $M(z) = J$  (в совокупности с пометкой  $N(J)$ )

$I$  ) позволяет учесть потери потока передаваемой энергии и реализовать (в совокупности с операцией эквивалентного преобразования стоимости дуг сети) оптимизационные операции комбинаторного и параметрического характера. Эти операции формируют оптимальное "дерево"  $G^n \subset G = (S, B)$  передачи потока энергии от источника до разрешенного на  $k$ -м итерационном шаге алгоритма стока (вершины, соответственно,  $B_1$  и  $B_{n\bar{k}}$ , на рис.2), где  $G^n \supset S^1, \dots, S^t, \dots, S^v$ ;

$S^1 = \{s_1, s_2, \dots\}, \dots, S^t = \{s_t, s_c, \dots\}, \dots, S^v = \{s_v, s_{12}, \dots\}$ .

Параметрическая оптимизация элементов  $\{s_h, \{h\} \in \{s^t$ ,

$t = \{v\} \subset G = (S, B)$  состоит в выборе ( $\Phi_y^h = \Phi_y^{saa}$ ):

$$b_{j\bar{k}}^{max} = \begin{cases} b_{j\bar{k}}^{saa} + \Delta b_{j\bar{k}} & \text{при } \Delta F_{j\bar{k}}^+(p, h) < 0, \\ b_{j\bar{k}}^{saa} & \text{при } \Delta F_{j\bar{k}}^+(p, h) \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\Delta F_{j\bar{k}}^+(p, h) = \sum_{j, \bar{k}} \frac{\partial f_{j\bar{k}}^z(p)}{\partial p_{j\bar{k}}} \Delta p_{j\bar{k}} + \frac{\partial q_{j\bar{k}}^z(h)}{\partial h} \Delta h_{j\bar{k}}; \Delta p_{j\bar{k}} = p_{j\bar{k}}^{max} - p_{j\bar{k}}^{saa}; p_{j\bar{k}}^{saa} = \Psi(\Delta h_{j\bar{k}}); \Delta h_{j\bar{k}} = \Theta_{j\bar{k}}(\Phi_y^{saa}).$$

Найденные параметры  $\{b_{hk}^{\text{max}}, p_{hk}^{\text{max}}\} \in X_{hb}^{(k)} \subset X_{hb}^{\text{opt}} \subset X_B^0 =$   
 $\{p, b\} \subset X = \{X_B, X_s\}$  учитываются  
 при эквивалентном преобразовании (3) коэффициентов стоимости (2).  
 Итерационный процесс поиска наилучшего маршрута передачи пото-  
 ка энергии при оптимальном соотношении его потерь заканчивается  
 при пометке последнего ранжируемого стока  $\{b_{hk}, k = \bar{k}\} \in B \subset G = (S, B)$ .  
 Достаточное и необходимое условие оптимальности распределяемого в  
 процессе решения оптимизационной задачи потока энергии обсуждается  
 в работе в утверждении 3. В работе приводится также числовой при-  
 мер, в котором показана сходимость предлагаемого сетевого алгорит-  
 ма.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНК-  
 ЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЫБРАННОЙ СТРУКТУРЫ. В общей  
 задаче синтеза (рис.3) задача оптимального выбора внутренних пара-  
 метров элементов структуры АС по показателям качества функциональ-  
 ного процесса (задача 3) решается с учетом её обобщенных парамет-  
 ров, найденных в процессе структурно-параметрической оптимизации  
 системы по показателям экономического и функционального характера  
 (задачи 1 и 2 на рис.3). Базовый вариант решения задачи 3 (рис.3)  
 формулируется следующим образом: требуется в рамках найденных об-  
 обобщенных параметров выбранного варианта структуры АС (вариантов  
 может быть в общем случае несколько  $\{S^i, \{t\} = T\} \subset G^n \subset G = (S, B)$ )  
 таким образом, подобрать тип и параметры её корректирующего уст-  
 ройства, а также внутренние параметры структуры АС (точнее пара-  
 метры модели процесса её функционирования - передаточной функции),  
 чтобы обеспечить желаемые изменения её статических и динамических  
 характеристик простейшим образом. Для включения задачи 3 в общую  
 схему оптимального структурно-параметрического синтеза АС из мно-  
 жества допустимых технических решений, ориентированной на исполь-  
 зование ЭВМ, потребовалось, во-первых, решить проблему формализо-  
 ванного построения адекватной передаточной функции АС по схемам  
 замещения элементов её структуры, выбираемых из агрегатной базы в  
 соответствии с выявленными кратчайшими маршрутами передачи потока  
 энергии от пункта его производства к пунктам его потребления;  
 во-вторых, создать метод направленного поиска путей улучшения ста-  
 тических и динамических характеристик АС за счет желаемых измене-  
 ний внутренних параметров её структуры и корректирующих устройств.  
 Решить проблему формализации процедуры композиции передаточной  
 функции структуры АС из физических моделей её элементов представля-  
 ется возможным с использованием графовой формы (сигнального графа)  
 описания модели процесса её функционирования. В работе предложен

метод расчета составляющих модифицированной формулы Мэсона на основе формализованного исследования топологических параметров графа сигналов АС, получаемого в результате применения известной (Лазарев И.А.) формальной логики топологического объединения графовых моделей принятых схем замещения её элементов. Построение графовых моделей основных элементов АС осуществляется по физическим моделям, которые представляются в виде линейных электрических цепей — четырехполюсников. Типовыми внутренними элементами (внутренними параметрами АС) таких четырехполюсников приняты реальные физические элементы, способные осуществлять операции усиления, интегрирования и дифференцирования. В рассматриваемом случае нет необходимости в формировании системы линейных уравнений в той или иной форме, а также в построении сигнального графа общей схемы замещения АС. Достаточно лишь поставить в соответствие строкам матрицы  $M(Z)$  (формируется с помощью ЭВМ по выходным данным задачи 2 и данным элементно-агрегатной базы):

$$M(Z) = \begin{bmatrix} z_{11}(p) & z_{12}(p) & \dots & z_{1s}(p) & \dots & z_{1n}(p) \\ z_{21}(p) & z_{22}(p) & \dots & z_{2h}(p) & \dots & z_{2d}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{i1}(p) & z_{i2}(p) & \dots & z_{iq}(p) & \dots & z_{ik}(p) \\ z_{n1}(p) & z_{n2}(p) & \dots & z_{nt}(p) & \dots & z_{ne}(p) \end{bmatrix} \quad (5)$$

которая имеет  $n$  строки  $m_n = \max\{\alpha, \beta, \dots, \gamma, \dots, \beta\}$  столбцов ( $n$  — число контуров схемы замещения) физические элементы анализируемой схемы замещения АС. Используемая в работе формула Мэсона имеет вид<sup>ж</sup>:

$$W_0(p) = \sum_k B_k \Delta(\Theta_k) / (1 - \sum_{i=1}^N L_i^{(1)} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N L_i^{(1)} L_j^{(1)} \beta_{ij} - \dots), \quad (6)$$

где  $\beta_{ij} = 0$ , если  $L_i^{(1)} \cap L_j^{(1)} \neq \emptyset \forall i, j = \overline{1, N}$  и  $\beta_{ij} = 1$  в противном случае;  $B_k$  — передача пути от вершины (исток), соответствующей входному сигналу, к вершине (сток), соответствующей выходному сигналу;  $\Theta_k$  — коэффициент, учитывающий касание  $k$ -го пути от истока к стоку с передачами контуров  $L_1^{(1)}, L_2^{(1)}, \dots, L_N^{(1)}$  и их произведениями. Расчет передач  $L^{(1)} = \{L_{1c}^{(1)}, L_{2c}^{(1)}, \dots, L_{1N}^{(1)}, L_{2N}^{(1)}, \dots, L_{nN}^{(1)}\} = \{L_1^{(1)}, L_2^{(1)}, \dots, L_N^{(1)}\}$  формулы (6), число которых определяется из

$$\text{выражений: } N_c = \sum_{i=1}^N (\gamma_i - 1), \quad N_n = \sum_{i=1}^N (\gamma_i - 1)(n - i), \quad (7)$$

где  $\gamma_1 = \alpha, \gamma_2 = \beta, \dots, \gamma_n = \beta$ , осуществляется с помощью следующих соотношений:

ж Мэзон С., Циммерман Г. Электрические цепи, сигналы и системы. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 619 с.

$$L_c^{(1)} = Z_0 / Z_{INV}, L_c^{(1)} = \{L_{vc}^{(1)} = z_{if}(p) / z_{ik}(p), \quad (8)$$

$$j = \overline{1, N_c}, i = \overline{1, n}, f = \overline{1, r_i}, k = \overline{1, \beta}\},$$

$$L_n^{(1)} = Z_0 / Z_{INV}, L_n^{(1)} = \{L_{on}^{(1)} = z_{if}(p) / z_{ek}(p), \quad (9)$$

$$\Theta = \overline{1, N_n}, i = \overline{1, n}, f = \overline{1, r_i}, e = \overline{1, l}, \dots, e = n - i, k = \overline{1, \beta}\},$$

где  $Z_{INV} = -\{z_{ik}(p), i = \overline{1, n}, k = \overline{1, \beta}\}$ ,  $Z'_{INV} = -\{z_{ik}(p), i = \overline{1, n}, k = \overline{1, \beta}\}$ ,  $Z_0 = \{z_{ij}(p), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, r_i}, r_i = \overline{1, R}\}$  предложенном методе формализована трудоёмкая операция перечисления всех путей и контуров графа сигналов схемы замещения АС при использовании достаточно простой процедуры определения знака слагаемых формулы (6). В работе осуществлена проверка метода с помощью метода контурных токов, которая показала достоверность получаемых результатов.

В задаче 3 (рис. 3) процедура реализации противоречивых требований технического задания по показателям статического и динамического характера сопровождается выбором физически реализуемого корректирующего устройства и целенаправленным изменением внутренних параметров АС. Для синтеза АС по заданным показателям качества функционального процесса (в случае если внутренние параметры структуры АС являются заданными) в работе (в рамках метода) предложен алгоритм, последовательность операций в котором следующая.

1. Исследуется математическая модель процесса функционирования АС с целью определения её доминирующих полюсов (Дель Торо В., Васин В.П. и др.).

2. Формируется желаемая амплитудно-фазовая характеристика АС.

3. Выбирается оптимальное соединение информационных и энергетических элементов АС (т.е. структурная схема системы) и определяются величины  $R_1(\omega_i) = \operatorname{Re} R(j\omega_i)$ ,  $R_2(\omega_i) = \operatorname{Im} R(j\omega_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$  ( $m = 2p_1$ , где  $p_1$  - количество доминирующих полюсов АС) из следующих соотношений:

- при параллельном соединении элементов

$$R(j\omega_i) = W_{ж}(j\omega_i) - W_0(j\omega_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (10)$$

- при последовательном соединении элементов

$$R(j\omega_i) = W_{ж}(j\omega_i) / W_0(j\omega_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (11)$$

- при соединении элементов по схеме обратной связи

$$R(j\omega_i) = 1 / W_{ж}(j\omega_i) - 1 / W_0(j\omega_i) + 1, \quad i = \overline{1, m}. \quad (12)$$

4. Определяется аппроксимирующая передаточная функция корректирующего устройства:

$$R(p) = (a_0 p^m + a_1 p^{m-1} + \dots + a_m) / (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + 1), \quad (13)$$

которая находится из решения системы  $2m$  - линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов  $A = \{a_0, a_1, \dots,$

$a_m$ },  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{m-1}\}$ , полученной в результате разделения уравнения  $(i = \overline{1, m})$ :

$$R(j\omega_i)(b_0(j\omega_i)^m + b_1(j\omega_i)^{m-1} + \dots + 1) - a_0(j\omega_i)^m + a_1(j\omega_i)^{m-1} + \dots + a_m \quad (14)$$

на вещественную и мнимую части. В работе проведено исследование и показана сходимость процесса поиска физически реализуемой передаточной функции корректирующего устройства. При этом показано также, что приближение действительных частотных свойств АС к желаемым может быть обеспечено с заданной точностью.

Для решения задачи синтеза не просто требуемых показателей качества функционального процесса АС, а в каком-то смысле оптимальных их значений в рамках метода направленного поиска путей улучшения статических и динамических характеристик АС в работе предложена процедура параметрической оптимизации модели процесса функционирования АС. В основу процедуры положены методы нелинейного математического программирования при наличии ограничений типа равенств и неравенств. Эти ограничения позволяют учитывать обобщенные параметры структуры АС, найденные в процессе формирования её эффективных вариантов (задача 2 на рис.3), что обеспечивает решение задачи оптимизации качества регулирования АС в условиях большого диапазона альтернатив как единого информационно-энергетического комплекса. Параметрическая оптимизация АС осуществляется в процессе решения следующей экстремальной задачи:

$$\min I(\omega, Y, A, B), \omega \in \Omega, y \in Y, a \in A, b \in B, \quad (15)$$

при  $\Delta_1 = b_1 > 0, \Delta_2 = \left| \frac{b_1}{b_0} \frac{b_2}{b_1} \right| > 0, \Delta_3 > 0, \dots, |F_0(j\omega)|_{\max} \leq M_{\max}^{\text{доп}}$ ,

где  $Y = \{y_0, y_1, \dots, y_s\}$ ,  $y_0 = \psi_0(X_0^*)$ ,  $y_1 = \psi_1(X_1^*), \dots$ ,

$y_s = \psi_s(X_s^*)$ ,  $X_s^* = \{X_{nh}^{\text{опт}}\} \subset X$ ,  $\{s_h, \{h\} = N\} \in S^t \subset G^n \subset G = (S, B)$ ;

$I(\omega, Y, A, B)$  - частотный аналог квадратичной интегральной

оценки, вычисляемый по формуле Релея;  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$  - определители Гурвица. Решение задачи (15) осуществляется с помощью программы ФЛЕКСИПЛЕКС (Хаммельблау Д).

4. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОДВИЖНОГО АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА. Разработанные методы были практически использованы для решения ряда прикладных задач оптимального синтеза АС, а также для обоснования технических предложений создаваемых автоматических СВЭ ПАО. Указанные работы проводились Челябинским политехническим институтом им. Ленинского комсомола совместно с одним предприятием г. Свердловска в рамках НИР "Разработка методики проектирования сложных ЭЭС с использованием средств вычислительной техники". Названная специализация НИР объясняется актуальностью задачи синтеза оптимальных ЭЭС, поскольку повсильсь



требования к их миниатюризации (в частности, масса полупроводниковых источников электропитания составляет в настоящее время от 30 до 70% массы питаемой ими аппаратуры\*) и качеству вырабатываемой системами электроэнергии. Применение разработанных машинных методов проиллюстрировано на примере практического решения задачи оптимального синтеза подсистемы ЭЭС - автоматической системы вторичного электропитания. При этом были реализованы следующие операции подхода, представленного на рис.3.

1. Формирование информационного обеспечения базы данных задачи оптимального синтеза СВЭ в условиях большого диапазона альтернатив.

2. Формирование сетевой математической модели, отображающей множество допустимых технических решений СВЭ.

3. Направленный поиск вариантов структуры СВЭ, оптимальных по показателям конструктивной массы ( $\kappa_1$ )  $S_1^1 \Rightarrow$  { трехфазн. неупр. выпр. - распред. сеть пост. тока - собств. инв. - ФНЧ (П-образн.) - в/ч трансф. (торроид.) }, надежности ( $\kappa_2$ )  $S_2^1 \Rightarrow$  { распред. сеть перем. тока - трехфазн. н/ч трансф. - трехфазн. неупр. выпр. - сглаж. С - фильтр - собств. инв. - ФНЧ } и динамических свойств ( $\kappa_3$ )  $S_3^1 \Rightarrow$  { трехфазн. неупр. выпр. - распред. сеть пост. тока - собств. инв. - ФНЧ (Т-образн.) - в/ч трансф. (бр.) }. Показатели данных вариантов представлены на рис.4.

4. Направленный поиск компромиссного варианта структуры СВЭ по обобщенному показателю (I)  $S_k \Rightarrow$  { распред. сеть перем. тока - трехфазн. неупр. выпр. - собств. инв. - ФНЧ (П-образн.) - в/ч трансф. (торроид.) }. Показатели варианта находятся в заштрихованной области на рис.4.

5. Синтез оптимальных внутренних параметров найденного компромиссного варианта структуры СВЭ, исходя из обеспечения желаемых показателей точности, запаса устойчивости, коэффициента нелинейных искажений и быстродействия. При этом были найдены внутренние параметры элементов структуры СВЭ: ФНЧ (С, L и др.), в/ч трансформатора ( $R_c, L_s, M, R_i$ ) и корректирующего устройства ( $C, R = f(A, B)$ ).

Проведенные исследования показали, что за счет усовершенствования процедуры направленного поиска варианта структуры синтезируемой системы по совокупности показателей экономического и функционального характера число итерационных операций оптимального синтеза может быть уменьшено по сравнению с существующими методами в 2

\* Вересов Г.Н., Смурыков Ю.Л. Стабилизированные источники питания радиоаппаратуры. - М.: Энергия, 1978. - 191 с.

раза. При этом представляется возможным минимизация экономических показателей СВЗ при обеспечении желаемого качества процессов её функционирования, что подтверждается соответствующими актами внедрения. Оценочный расчет эффективности создаваемых машинных методов (и алгоритмов) показал, что стоимость проектных работ в этом случае может быть снижена на 14 тыс. руб. при разработке 2-той серии ПАО одного класса (что подтверждается отзывом заказчика), а затраты, связанные с эксплуатацией изделий (ПАО) могут быть уменьшены. Аналоговое и цифровое моделирование подтвердило работоспособность и эффективность предлагаемых в работе методов оптимального структурно-параметрического синтеза АС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы явилось развитие сетевого подхода применительно к расширенному оптимальному структурно-параметрическому синтезу автоматической системы. При этом были получены следующие результаты.

1. Разработан сетевой алгоритм оптимального структурно-параметрического синтеза автоматической системы из множества допустимых технических решений. Метод позволяет практически решить с помощью ЭВМ задачу совместной структурной и параметрической оптимизации автоматической системы. В работе показано, что использование данного сетевого алгоритма позволяет практически реализовать основные принципы системного подхода к вопросам оптимального синтеза структуры автоматической системы и её обобщенных параметров из множества допустимых технических решений в рамках существующей и развиваемой элементарно-агрегатной базы. Следствием этого явилась возможность достижения высоких экономических показателей и показателей функциональной эффективности создаваемых автоматических систем.

2. Создан алгоритм получения эффективных ("паретовских") структур автоматической системы на основе предложенного сетевого алгоритма оптимального структурно-параметрического синтеза с учетом показателей экономического и функционального характера. Метод позволяет достаточно строго и корректно осуществлять поиск эффективных решений из множества допустимых структурных организаций автоматической системы по обобщенному показателю качества, в который входят с определенными весами (устанавливаемыми в диалоге с ЛПР) показатели экономического и функционального характера. При этом обеспечивается оптимальный (в смысле заданных свойств компромисс между экономическими показателями, показателями функциональной эффективности и показателями, учитывающими ожидаемые потенциальные

возможности автоматической системы в области статических и динамических характеристик.

3. Разработан машинный метод построения математической модели процесса функционирования автоматической системы по схемам замещения её элементов, который позволил включить топологические методы анализа в общую схему задачи оптимального структурно-параметрического синтеза автоматической системы из множества допустимых технических решений. К достоинствам метода следует отнести возможность формализации операции композиции математической модели процесса функционирования автоматической системы выбранной структуры при оптимальных затратах оперативной памяти ЭВМ.

4. Разработан метод направленного поиска путей улучшения статических и динамических характеристик автоматической системы. Метод позволяет осуществлять выбор физически реализуемой передаточной функции корректирующего устройства автоматической системы и оптимальное назначение внутренних параметров модели процесса функционирования автоматической системы из условий повышения качества показателей функционального процесса и оптимизации экономических показателей в совокупности с показателями функциональной эффективности. При этом обеспечивается сокращение этапа отработки автоматической системы в процессе её практической реализации и в конечном итоге снижение трудовых и материально-технических ресурсов.

5. Разработанные машинные методы анализа и синтеза автоматических систем, ориентированные на большое количество альтернатив и неоднородность оценочных показателей, доведены до уровня инженерной методики. Данная инженерная методика была апробирована при решении ряда прикладных задач, в частности, в задачах оптимального синтеза автоматических систем вторичного электропитания подвижных автономных объектов. Результаты апробации показали, что применение развитого в работе сетевого подхода к исследованию автоматических систем указанного класса позволило достичь желаемого качества их функционирования при улучшении экономических показателей на 15% по сравнению с традиционными методами синтеза. В рамках проведенных работ были созданы и внедрены на одном предприятии г.Свердловска и в НИО "Центрпрограммсистем" г.Калинина следующие пакеты прикладных программ: а) пакет по прогнозированию и аналитическому описанию параметрических зависимостей численных значений показателей качества элементов исходной агрегатной базы данных; б) пакет прикладных программ по структурно-параметрической оптимизации автоматических систем. Внедрение этих пакетов в

практику конструирования автоматических систем позволяет уменьшить степень риска при принятии окончательного решения о вариантах их исполнения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ  
ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Казаринов Л.С., Тележкин В.Ф., Яковлев Б.С. Метод синтеза систем электроснабжения с использованием качественных моделей. - Тезисы докладов УП Всесоюзной конференции по моделированию электроэнергетических систем. Таллин, 1977, с.14.

2. Тележкин В.Ф. и др. Программа синтеза проектируемой ЭЭС по экономическим показателям качества. - В сб.: Алгоритмы и программы. М.: ВНИИЦ, 1978, № 6, с.75-76.

3. Лазарев И.А., Тележкин В.Ф., Казаринов Л.С. Синтез структуры системы электроснабжения автономных объектов на начальных этапах проектирования. - В сб.: Алгоритмы и программы. М.: ВНИИЦ, 1978, № 5, с.38-39.

4. Казаринов Л.С., Тележкин В.Ф., Яковлев Б.С. Определение областей возможных вариаций параметров. - Известия вузов. Приборостроение, 1978, № 5, с.38-41.

5. Тележкин В.Ф. Метод параметрической оптимизации в задачах выбора структуры автономных систем электроснабжения. - В сб.: Методы системного подхода к проектированию объектов в автономной электроэнергетике. Челябинск, 1978, с.52-58.

6. Лазарев И.А., Тележкин В.Ф. Оптимизация структуры системы электроснабжения автономного объекта по результирующему показателю надежности. Реферат. - Известия вузов. Электромеханика, 1978, № 12, с.45-46.

7. Тележкин В.Ф. и др. Прогнозирование показателей качества и математическое моделирование типовых элементов сложных технических систем на начальных этапах проектирования. - В сб.: Алгоритмы и программы. М.: ВНИИЦ, 1979, № 3, с.59.

8. Лазарев И.А., Тележкин В.Ф. Метод формального представления многосвязных систем автоматического регулирования. - Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания по управлению многосвязными системами. М.: ИГУ АН СССР, 1978, с.79-80.

9. Казаринов Л.С., Тележкин В.Ф., Яковлев Б.С. Метод структурного синтеза систем электроснабжения. - В сб.: Информационно-управляющие системы и устройства. Челябинск, 1978, № 216, с.29-31.

10. Тележкин В.Ф. и др. Об одном способе построения универсальной модели автономной электроэнергетической системы. - В сб.: Информационно-управляющие системы и устройства. Челябинск, № 216, с.99-102.

11. Лазарев И.А., Тележкин В.Ф. Оптимизация структуры системы электроснабжения автономного объекта по результирующему показателю качества. - Известия вузов, Энергетика, 1979, № 7, с.25-30.

12. Яковлев Б.С., Тележкин В.Ф. и др. Проектирование систем автоматики. Учебное пособие. - Челябинск, 1979. - 76 с.

13. Тележкин В.Ф., Яковлев Б.С. Вопросы автоматизации выбора структуры системы электроснабжения автономного объекта. - В сб.: Информационные и управляющие элементы и системы. Челябинск, 1979, № 231, с.65-69.

14. Тележкин В.Ф. Метод выбора структуры системы управления формальными способами. - В сб.: Информационные и управляющие элементы и системы. Челябинск, 1980, № 250, с.24-25.

15. Тележкин В.Ф. Метод оптимизации процесса функционирования автоматической системы вторичного электропитания. - Тезисы докладов Всесоюзного семинара по автоматизированному проектированию электротехнических устройств и комплексов. Челябинск, 1981, с.36.

16. Лазарев И.А., Тележкин В.Ф. Сетевой метод оптимального резервирования сложных технических систем. - Известия вузов. Приборостроение, 1981, № 3, с.91-96.