

2-52(043)

307 Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

ШТЕССЕЛЬ Юрий Борисович

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПО МНОГИМ КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА

Специальность 05.13.07 -
"Автоматическое управление и регулирование,
управление технологическими процессами
(промышленность)"

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

Челябинск

1978

ЧПИ

[Stamp]

Работа выполнена на кафедре "Автоматика и телемеханика" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор ЯКОВЛЕВ Б.С.

Научный консультант -
кандидат технических наук, доцент КАЗЫМИН О.Н.

Официальные оппоненты:
профессор, доктор технических наук ЦЫТАНКОВ В.А.
(Челябинский политехнический институт),
старший научный сотрудник, кандидат технических наук ШМУЛЬЯН Б.Л. (ВНИИ системных исследований АН СССР, г. Москва).

Ведущее предприятие -
научно-производственное объединение "Полет", г. Челябинск.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1978 года
на заседании Специализированного совета К 053.13.04 по присуждению
ученых степеней Челябинского политехнического института имени Ле-
нинского комсомола (г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского
политехнического института имени Ленинского комсомола.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1978 года.

Ученый секретарь Специализированного совета
доцент, кандидат технических наук

В. Шабреев
В. ШАБРЕЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темн. В Отчетном докладе ЦК КПСС XXV съезду партии Генеральный секретарь ЦК КПСС, Председатель президиума Верховного Совета СССР тов. Л.И.Брежнев отметил: "Проблему качества мы понимаем очень широко... На повышение качества продукции должны быть нацелены весь механизм планирования и управления... усилия инженеров и конструкторов... Первоочередной задачей является ускорение научно-технического прогресса".

В настоящее время автономные электроэнергетические системы (АВЭС) являются частью большого числа важных народнохозяйственных объектов. Поэтому задача повышения качества функционирования АВЭС имеет большое значение. Одним из путей повышения качества функционирования АВЭС является совершенствование процесса их проектирования, преимущественно с применением ЭВМ. При этом с позиций системного подхода при проектировании АВЭС необходимо исходить из условия повышения качества функционирования всех взаимодействующих подсистем АВЭС. Качество функционирования каждой подсистемы характеризует критерий или группа критериев, которые образуют вектор-критерий качества функционирования.

Таким образом, при проектировании АВЭС необходимо решать задачи оптимизации по многим критериям качества, теория которых получила развитие в основном в последние 10-15 лет, а практические результаты пока еще малочисленны.

Следовательно, актуальной научной и технической проблемой является применение многокритериального подхода к проектированию АВЭС.

Цель работн. Целью настоящей работы является разработка и исследование метода многокритериальной оптимизации АВЭС, разработка на его основе инженерной методики, а также решение задач оптимизации конкретных АВЭС по многим критериям качества. В рамках сформулированной цели в диссертационной работе поставлены задачи:

1. Выявить принципы формирования частных критериев, способы нормализации и оценки вектор-критериев качества функционирования АВЭС.
2. Для задачи (проблемы) многокритериальной оптимизации АВЭС разработать и исследовать метод, основанный на принципе заданных свойств системы.

3. Разработать инженерные методики двухкритериальной параметрической оптимизации АВЭС двух классов, с помощью которых
 - осуществить оптимизацию регулятора в системе подчиненного регулирования нажимных винтов стана П80 ЧМЗ;
 - оптимизировать АВЭС подвижных объектов, состоящие из
 - а) генератора постоянного тока и автоматизированного электропривода;
 - б) управляемого выпрямителя, сглаживающего фильтра и нагрузки.
4. Разработать комплекс вычислительных алгоритмов, позволяющий решать задачи многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС в режиме машинного проектирования.

Методы исследований. Разработка и исследование метода многокритериальной оптимизации АВЭС проводились на основе методов функционального анализа, нелинейного программирования, теории операций, векторной оптимизации, оптимального управления. При разработке инженерных методик и решении задач оптимизации конкретных АВЭС по многим критериям качества применялись численные методы прикладной математики, методы теории автоматического управления и регулирования. Кроме того, для исследования АВЭС привлекались методы макетирования и натуральных испытаний.

Научная новизна. I. Выявлены принципы формирования частных критериев, способы нормализации и оценки вектор-критериев качества АВЭС.

2. Для задачи (проблемы) многокритериальной оптимизации АВЭС разработан и исследован метод, основанный на принципе заданных свойств системы. При этом сформулированы теоремы, утверждающие условия существования, парето-оптимальности, а также определяющие способы вычисления компромиссных решений.

3. Сформулированы теоремы, утверждающие условия получения решения поставленных задач многокритериальной параметрической оптимизации и многокритериального оптимального управления АВЭС по частному случаю принципа заданных свойств системы - принципу пропорциональных ущербностей.

4. Разработаны схемы алгоритмов, с помощью которых возможно получение решения поставленных задач многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС по принципу пропорциональных ущербностей в режиме диалога "ДПР - ЦЕМ".

Практическая ценность. I. Разработан комплекс вычислительных алгоритмов многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС. Разработана и внедрена программа однокритериальной параметрической оптимизации АВЭС.

2. Разработаны и внедрены

- графо-аналитическая инженерная методика двухкритериальной двух- или трехпараметрической оптимизации АВЭС;
- инженерная методика двухкритериальной параметрической оптимизации с помощью номограмм для линеаризованных АВЭС третьего порядка.

3. По разработанным инженерным методикам решены задачи оптимизации параметров

- регулятора в системе подчиненного регулирования нажимных винтов стана I160 ЧМЗ, внедренного на этом стане, в результате чего снижено время выполнения технологической операции примерно на 5%;
- АВЭС "генератор - электропривод", в результате чего обеспечена компромиссная настройка между наилучшим качеством поддержания номинального напряжения генератора и наилучшим качеством отработки задания по скорости электроприводом;
- АВЭС "управляемый выпрямитель - сглаживающий фильтр - нагрузка", в результате чего обеспечен компромисс между минимальными габаритами сглаживающего фильтра и наилучшим качеством поддержания напряжения на нагрузке.

Реализация работы в промышленности. I. Разработанные инженерные методики двухкритериальной параметрической оптимизации АВЭС внедрены в практику проектирования объектов НПО "Автоматика" г. Свердловска, Челябинского отделения ТИИПРОМЕЛЕКТРОПРОЕКТ.

2. Разработанная программа однокритериальной параметрической оптимизации АВЭС внедрена в практику проектирования объектов ряда предприятий г. Челябинска.

3. Регулятор в системе регулирования нажимных винтов, оптимизированный по разработанной инженерной методике, внедрен в промышленную эксплуатацию на стане I160 ЧМЗ.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на

- научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола в 1975-1978 гг.;

- научно-техническом семинаре АБТВ им. Р.Я.Малиновского, руководимом профессором Белоновским А.С., в 1977 г.;
- республиканских семинарах РДНТЭП, г. Киев, 1976-1977 гг.;
- Всесоюзном семинаре по проблеме развития цифро-аналого-физических комплексов в АВЭС, г. Иркутск, 1977 г.;
- Всесоюзном семинаре АН СССР "Кибернетика электроэнергетических систем", проведенном по проблеме "Проектирование АВЭС", г. Челябинск, 1978 г.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 9 опубликованных работах, из них 6 - во всесоюзных и республиканских изданиях, 2 - в трудах ЧПИ, а также в 5 отчетах по НИР, выполненных для ряда предприятий г.Челябинска и ИПО "Автоматика" г.Свердловска.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6-ти глав основного текста и заключения. Содержит 152 страницы машинописного текста, 78 фигур, библиографию из 159 наименований и приложения на 37 страницах.

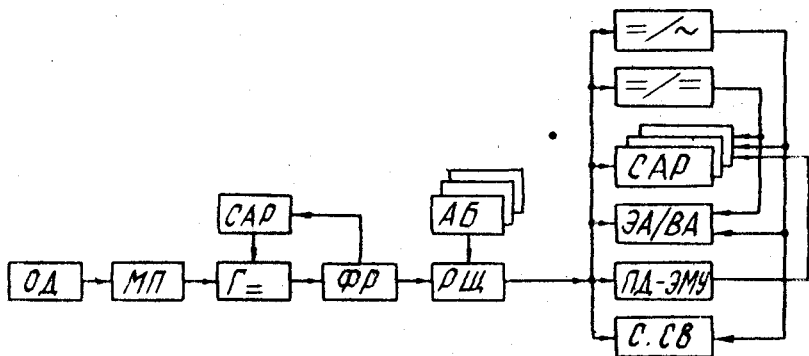
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы и очерчивается круг решаемых в ней задач.

Первая глава посвящена обзору и анализу отечественных и зарубежных работ в области задач и методов многокритериальной оптимизации АВЭС. В работе рассмотрено содержание задачи многокритериальной оптимизации на примере АВЭС специальных гусеничных машин (СГМ), упрощенная функциональная схема которой представлена на фиг.1. Для штатного режима работы части АВЭС СГМ, состоящей из взаимодействующих генератора СТ-10 и автоматизированного электропривода на базе двигателя ДПН-3 (фиг.2), выделены, в частности, основные цели функционирования:

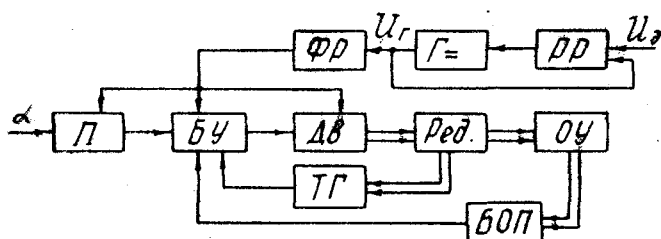
- поддержание номинального напряжения генератора $27^{+2}_{-5} В$;
- обеспечение требуемого качества отработки электроприводом сигнала задания по скорости.

Эффект взаимодействия приведет к необходимости рассмотрения части АВЭС СГМ (фиг.2) как единого - динамического комплекса. С позиций системного подхода в работе предлагается осуществлять проектирование комплекса из условия одновременного улучшения качества выполнения указанных целей, причем улучшение качества отработки электроприводом сигнала задания по скорости приводит к ухудшению



ОД - основной двигатель; МП - механическая передача; Г= - генератор постоянного тока; РЩ - распределительный щиток; ФР - фильтр радиочастотных помех; АБ - аккумуляторная батарея; САР - система автоматического регулирования; ПА-ЭМУ - приводной двигатель - электромашинный усилитель; ЭА/ВА - электроавтоматика/вспомогательная аппаратура; С.СВ - средства связи; =/~, =/= - преобразователи постоянного напряжения в переменное и постоянное, соответственно.

Фиг. 1



РР - реле-регулятор; П - потенциометр; БУ - блок управления; Дв - двигатель; Ред. - редуктор; ОУ - объект управления; ТГ - тахогенератор; БОП - блок ограничения положения; U_g - напряжение генератора; $U_э$ - эталонное напряжение; α - угол поворота потенциометра.

Фиг. 2

переходного процесса напряжения генератора, и наоборот. То есть, при проектировании АВЭС необходимо принимать компромиссное решение. Качество выполнения целей в работе оценено вектор-критерием с составляющими

$$J_1 = \int_0^{\infty} (\Omega - \Omega_{уст})^2 dt ; \quad J_2 = \int_0^{\infty} (U_r - U_{rуст})^2 dt, \quad (I)$$

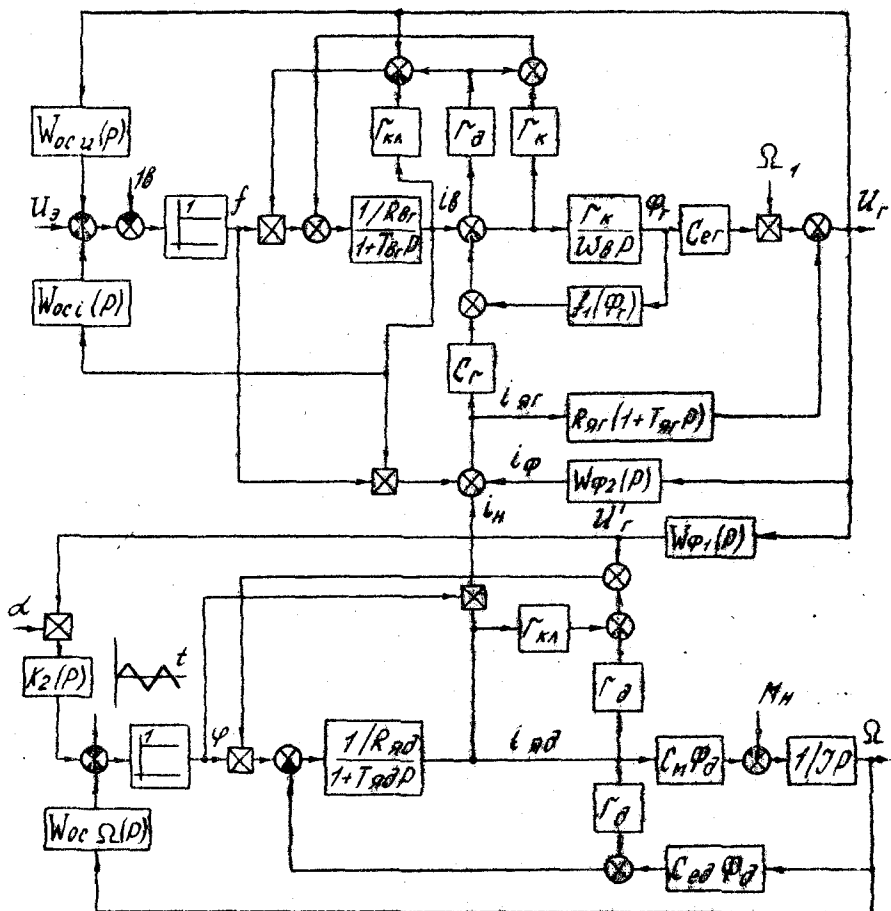
где $\Omega_{уст}, U_{rуст}$ — установившиеся значения Ω, U_r , соответственно. Частные критерии качества (I) могут быть вычислены на траектории движения части АВЭС СИМ, упрощенная структурная схема которой представлена на фиг.3. Оптимизируемыми параметрами комплекса (фиг.3) могут быть взяты различные коэффициенты, постоянные времени, номиналы емкостей, сопротивлений и т.д. В работе в качестве вектора оптимизируемых параметров взят $\bar{x} = \text{colon}\{C_1, C_2\}$, где C_1, C_2 — емкости корректирующего контура (стоящего на входе БУ (фиг.2)), входящие в выражения (фиг.3)

$$K_2(p) = \frac{0,6}{1 + (2,601 \cdot 10^{-3} C_1 + 3,12 \cdot 10^{-3} C_2)p + 3,46 \cdot 10^{-6} C_1 C_2 p^2}$$

$$W_{ос\Omega}(p) = \frac{0,0176 (1 + 1,108 \cdot 10^{-3} C_1 p)}{1 + (2,601 \cdot 10^{-3} C_1 + 3,12 \cdot 10^{-3} C_2)p + 3,46 \cdot 10^{-6} C_1 C_2 p^2}$$

При этом задача проектирования рассмотренной части АВЭС СИМ сведена к выбору вектора параметров $\bar{x}^* = \text{colon}\{C_1^*, C_2^*\}$, обеспечивающего компромисс между наилучшими качествами выполнения целей функционирования АВЭС. Кроме того, в главе отмечена многокритериальность задачи проектирования систем подчиненного регулирования электроприводов. В работе отмечается большой вклад, внесенный в рассмотрение вопросов взаимодействия источников энергии и потребителей советскими учеными Аветисяном Д.А., Ельсуковым В.Н., Морозовским В.Т., Синдеевым И.М., Яковлевым Б.С. и другими авторами, вклад Емельянова С.В., Ларичева О.И., Попкова В.С., Салуквадзе М.Е., Шмulyяна Б.Л. и других авторов в разработку методов многокритериальной оптимизации, а также Слежановского О.В. и других авторов — в разработку методов проектирования систем подчиненного регулирования. В первой главе выявлено современное состояние рассматриваемой проблемы и сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Вторая глава посвящена решению задач формирования интегральных частных критериев качества, оценки вектор-критериев качества функционирования АВЭС, а также решению задачи выбора предпочтительного способа нормализации частных критериев качества.



$i_b, i_{\varphi}, i_n, i_{\Omega}$ - токи обмотки возбуждения и якоря генератора, фильтра, нагрузки, якоря двигателя, соответственно; Ω, Ω' - скорости приводного двигателя и ДТН-3, соответственно; Φ_r - поток возбуждения генератора; M_n - момент нагрузки; U_r' - напряжение на нагрузке; $p = d/dt$.

Фиг. 3

Из функционального анализа известно, что основные свойства метрики $\rho(y_i^1, y_i^2); y_i^1, y_i^2 \in Y_i$, некоторым образом введенной на пространстве Y_i изменения фазовой координаты системы y_i , удовлетворяют определению функционала. Если $Y_i \equiv L^p[a, b]$, где $L^p[a, b] = \{y_i(t) : \int_a^b |y_i(t)|^p dt < \infty, p \in [1, \infty), b = [a, b]\}$,

$$\rho[y_i^1(t), y_i^2(t)]_p = \left\{ \frac{1}{b-a} \int_a^b |y_i^1(t) - y_i^2(t)|^p dt \right\}^{1/p} \quad (2)$$

характеризует ошибку регулирования $y_i^1(t)$ как среднее интегральное отклонение p -го порядка $y_i^1(t)$ от $y_i^2(t) = y_i^*(t)$. Изменяя $p \in [1, \infty)$, получают функционалы (метрики) (2) с широким спектром свойств. Наибольшее применение как критерии качества для задач оптимизации АВЭС могут иметь метрики (2) при $p = 1, 2, \infty$. Пусть для каждой фазовой координаты y_i определены d_i частных критериев качества $J_k^i \forall k = 1, d_i \forall i = 1, m$, тогда вектор-критерий качества примет вид $\bar{J} = \text{col on } \{J_1^1, J_2^1, \dots, J_{d_1}^1, J_1^2, J_2^2, \dots, J_{d_2}^2, \dots, J_1^m, J_2^m, \dots, J_{d_m}^m\}$. (3) Для сравнения часто "несравнимых" критериев J_k^i их приводят к безразмерным величинам, т.е. нормализуют.

На основе способа построения области E -эффективных решений, предложенного Попковым Ю.С., Шмульяном Б.Л., Дубовым Ю.А. и другими, в диссертационной работе сформулировано следующее определение.

Определение 1. Некоторый (K -й) способ нормализации частных критериев качества среди $R (K \in R)$ возможных способов считаем предпочтительным, если для индексов предпочтения решений, полученных с помощью заданного критерия доминирования при различных способах нормализации, справедливо неравенство $(E_i^*)_{K^*} \gg (E_i^*)_{i^*}; k, i \in [1, R], k \neq i$, где $(E_i^*)_{i^*}$ - индекс предпочтения решения, полученного с помощью заданного критерия доминирования при i -ом способе нормализации, $i \in [1, R]$.

При этом решение, полученное при способе нормализации, выбранном в силу определения 1, обладает лучшей равномерностью в некоторой малой окрестности $\bar{x} \in X$, чем решения, полученные при других способах нормализации, где $\bar{x} = \text{col on } \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - обобщенный вектор управления, заданный на области X .

Для оценки отклонения вектор-критерия (3) от идеального значения $\bar{J}^0 = \text{col on } \{J_1^0, J_2^0, \dots, J_{d_1}^0, J_1^0, J_2^0, \dots, J_{d_2}^0, \dots, J_1^0, J_2^0, \dots, J_{d_m}^0\}$. (4)

где $J_k^{i0} = J_k^i(\bar{x}_k^{i0}) = \inf_{\bar{x} \in X} J_k^i(\bar{x})$, в работе предлагается использовать метрику $\rho(\bar{J}, \bar{J}^0)^{X^*}$, заданную на пространстве частных критериев качества R^N .

Определение 2. Под ущербностями δ_k^i , частных критериев качества J_k^i следует понимать выражения

$$\delta_k^i = |\hat{J}_k^i - \hat{J}_k^{i0}| \quad \forall i = \overline{1, m} \quad \forall k = \overline{1, d_i}, \quad (5)$$

где $\hat{J}_k^i = J_k^i / \varphi_k^i$; φ_k^i - нормализующие множители.

При условии выполнения $\sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^m (\delta_k^i)^p < \infty$, $p \in [1, \infty)$ в работе вводится на R^N метрика вида

$$\rho(\bar{J}, \bar{J}^0) = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^d \sum_{i=1}^m (\delta_k^i)^p \right]^{1/p}, \quad p \in [1, \infty). \quad (6)$$

Метрика (6) характеризует ошибку регулирования в R^N как среднее значение p -го порядка ущербностей $\delta_k^i \forall i = \overline{1, m} \quad \forall k = \overline{1, d_i}$. Изменяя величину $p \in [1, \infty)$, получают множество метрик (6), обладающих широким спектром свойств.

В работе рекомендуется выбирать величину параметра p в выражении для суперкритерия

$$Q_p = N \cdot \left\{ \rho(\bar{J}, \bar{J}^0)_p \right\}^p = \sum_{i=1}^m (\delta_i^i)^p, \quad \kappa = 1, \quad (7)$$

порожденного метрикой (6), из условия

$$\rho(\delta_i^i)^{p-1} \gg 1, \quad (8)$$

обеспечивающего повышенную чувствительность суперкритерия (7) к изменению ущербностей $\delta_k^i \forall i = \overline{1, m}$ по сравнению с чувствительностью при $p = 1$, что положительно сказывается на скорости сходимости численных методов решения задачи многокритериальной оптимизации АВЭС по методу минимизации суперкритерия (7).

Третья глава посвящена формулировке и исследованию разработанного для задачи (проблемы) многокритериальной оптимизации АВЭС метода оптимизации, основанного на принципе заданных свойств системы.

При формализации задачи многокритериальной оптимизации в работе полагаем, что движение АВЭС $-S(Y, X, Z, T)$ - описывается векторным операторным уравнением (в частном случае дифференциальным)

$$\bar{y} = \bar{F}(\bar{y}, \bar{x}, \bar{z}, t), \quad \bar{y} \in Y, \quad \bar{x} \in X, \quad \bar{z} \in Z, \quad t \in [t_0, t_1] = T, \quad (9)$$

где $\bar{y} = \text{colon}\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ - вектор фазовых координат; $\bar{x} = \text{colon}\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор обобщенного управления; $\bar{z} = \text{colon}\{z_1, z_2, \dots, z_r\}$ - вектор возмущения; $\bar{F} = \text{colon}\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ - векторный оператор, осуществляющий отображение $Y \times X \times Z \times T \rightarrow Y$;

t - время; причем Y - область нормированного пространства m -

мерных систем непрерывных функций; X - область нормированного пространства l -мерных систем действительных чисел, либо кусочно-непрерывных функций; Z - область нормированного пространства l -мерных систем кусочно-непрерывных случайных или детерминированных функций. В диссертационной работе $\bar{z} \in Z, \bar{F}, T, Y, X$ считаем детерминированными и заданными. Кроме того, полагаем, что перед АВЭС стоят N целей функционирования, качество выполнения которых характеризует вектор-критерий

$$\bar{J}(X) = \text{colon} \{ J_1(X), J_2(X), \dots, J_N(X) \} \in Q \subset R^N, \quad (10)$$

где Q - замкнутая область пространства R^N , а $J_i(X) \geq 0 \forall i = \overline{1, N}$.

Если все ресурсы системы (9) направить на выполнение i -й цели функционирования, то решение задачи оптимизации ищется в виде

$$J_i^0 = J_i(\bar{x}^{i0}) = \inf_{\bar{x} \in X} J_i(\bar{x}), \quad i \in \overline{1, N}. \quad (11)$$

Идеальный вектор

$$\bar{J}^0 = \text{colon} \{ J_1^0, J_2^0, \dots, J_N^0 \} \quad (12)$$

характеризует наилучшее качество выполнения всех целей функционирования АВЭС. В работе рассматривается случай, когда $\bar{J}^0 \notin Q$. Известен подход, когда оптимальный проект АВЭС ищут из условия

$$\rho[\bar{J}(\bar{x}^*), \bar{J}^0] = \inf_{\bar{x} \in X} \rho[\bar{J}(\bar{x}), \bar{J}^0], \quad (13)$$

которое допускает значительное ухудшение качества выполнения некоторых целей за счет существенного улучшения качества выполнения других целей функционирования АВЭС. В то время как приемлемые показатели качества функционирования АВЭС достигаются, как правило, при заданном заранее соотношении между оптимальными значениями функционалов оптимизации в зависимости от степени важности соответствующих целей функционирования АВЭС. Для устранения указанного недостатка метода минимизации метрики (13) множество оптимальных проектов, удовлетворяющее заранее заданным условиям, задается в виде

$$P(\bar{x}^*) = \{ G_i[\bar{J}(\bar{x}^*), \bar{J}^0, A] = 0 \forall i = \overline{1, R}; R < N; \bar{x}^* \in X \}, \quad (14)$$

$$A = \left\{ \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0 \forall i = \overline{1, N} \right\}, \quad (15)$$

или в частных случаях

$$P(\bar{x}^*) = \begin{cases} \alpha_i f_i[\delta_i(\bar{x}^*)] - \alpha_{i+1} f_{i+1}[\delta_{i+1}(\bar{x}^*)] = 0 \forall i = \overline{1, N-1}, & (16) \\ \alpha_i \delta_i(\bar{x}^*) - \alpha_{i+1} \delta_{i+1}(\bar{x}^*) = 0 \forall i = \overline{1, N-1}, & (17) \end{cases}$$

где $f_i(\delta_i)$ - монотонные возрастающие непрерывные и непрерывно дифференцируемые функции $\forall i = \overline{1, N}$, а $\delta_i(\bar{x})$ определяются выражениями (5). Единственный элемент $\bar{x}^* \in P(\bar{x}^*)$ определяем с помощью метода минимизации метрики.

Определение 3. Элемент $\bar{x}^* \in X$ является оптимальным проектом системы (9) с вектор-критерием (10), если выполняется равенство

$$\rho[\bar{J}(\bar{x}^*), \bar{J}^0] = \inf_{\bar{x} \in P(\bar{x})} \rho[\bar{J}(\bar{x}), \bar{J}^0]. \quad (18)$$

Определение 3 формулирует принцип заданных свойств системы в задаче многокритериальной оптимизации АВЭС.

Метрику ρ задаем в виде

$$\rho[\bar{J}(\bar{x}), \bar{J}^0] = \left\{ \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f_i(\delta_i(\bar{x}))]^p \right)^{1/p}, \rho \in [1, \infty), \quad (19)$$

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\delta_i(\bar{x})]^p \right)^{1/p}, \rho \in [1, \infty). \quad (20)$$

Определение 3 для частного случая (17), (20) формулирует частный случай принципа заданных свойств системы - принцип пропорциональных ущербностей. Из определения 3 следует, что принцип заданных свойств системы для случаев (16), (17) обеспечивает строгую обратную пропорциональность мер ухудшения качества выполнения целей функционирования АВЭС степеням важности этих целей.

В работе сформулированы и доказаны:

Утверждение I. Для того, чтобы элемент $\bar{x}^* \in X$ явился оптимальным проектом системы (9) с вектор-критерием (10) по принципу заданных свойств системы для случая (16), (19) необходимо и достаточно существования такого $\bar{x}^* \in X$, что выполняется равенство

$$f_j[\delta_j(\bar{x}^*)] = \inf_{\bar{x} \in X} \{ f_j[\delta_j(\bar{x})] | a_i f_i[\delta_i(\bar{x})] - a_{i+1} f_{i+1}[\delta_{i+1}(\bar{x})] = 0 \forall i = \overline{1, N-1} \}, \quad (21)$$

где j - любое целое число на отрезке $[1, N]$.

Примечание. Условия утверждения I справедливы для принципа пропорциональных ущербностей при замене выражения (21) на

$$J_j(\bar{x}^*) = \inf_{\bar{x} \in X} \{ J_j(\bar{x}) | a_i \delta_i(\bar{x}) - a_{i+1} \delta_{i+1}(\bar{x}) = 0 \forall i = \overline{1, N-1} \}. \quad (22)$$

Теорема I. Если существует элемент $\bar{x}^* \in X$, являющийся оптимальным проектом системы (9) с вектор-критерием (10) по принципу пропорциональных ущербностей и множество Q изменения частных критериев качества $J_i(\bar{x}) \forall i = \overline{1, N}$ выпукло, то значение $\bar{x}^* \in X$ оптимально по Парето.

Кроме того, в работе получены утверждения и теоремы, формули-

рующие необходимые и отдельно достаточные условия существования оптимального по принципу заданных свойств системы проекта АВЭС, необходимые условия его парето-оптимальности, а также достаточные условия выпуклости множества Q для частного случая $n = N$.

Для случая формирования составляющих идеального вектор-критерия (12) $J_i = J_{i \text{огп}} \forall i = \overline{1, N}$, где $J_{i \text{огп}}$ - предельные допустимые значения частных критериев $J_i \forall i = \overline{1, N}$, в работе переформулированы выше изложенные результаты из условия максимизации метрики $\rho[\bar{J}(\bar{x}), \bar{J}^0]$.

Четвертая глава посвящена применению принципа пропорциональных ущербностей к некоторым задачам многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС, многокритериального оптимального управления АВЭС, принятия решения в диалоге "ЛПР - ЦВМ".

Задача многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС, рассмотренная в работе, состоит в выборе элемента $\bar{x}^* \in X$, представляющего собой n -мерную систему действительных чисел, являющегося оптимальным проектом АВЭС с вектор-критерием (10) по принципу пропорциональных ущербностей, причем множество X задано:

$X = \{ \psi_j(\bar{x}) \leq 0, \varphi_i(\bar{x}) = J_i(\bar{x}) - J_{i \text{огп}} \leq 0 \forall j = \overline{1, K} \forall i = \overline{j_1, j_R}; R \leq N \}$, известны весовые коэффициенты (15) и нормализующие множители $\varphi_i \forall i = \overline{1, N}$. Тогда, в силу примечания к утверждению I, необходимо и достаточно, чтобы $\bar{x}^* \in X$ удовлетворял условиям (22) при учете выражений (5), (II), (I7). В работе сформулирована и доказана следующая теорема, основанная на методе множителей Лагранжа.

Теорема 2. Пусть определены $J_i(X), \psi_j(X), \varphi_r(X), G_e[\bar{J}(X), \bar{J}^0, A] \forall i = \overline{1, N} \forall j = \overline{1, K} \forall r = \overline{j_1, j_R} \forall e = \overline{1, N-1}$ и непрерывны вместе с двумя первыми производными по $\bar{x} \in X$, причем $J_i(X)$ унимодальны $\forall i = \overline{1, N}$. Пусть решены задачи (II) $\forall i = \overline{1, N}$, а $\bar{x}^* \in X$ является оптимальным проектом АВЭС с вектор-критерием (10) по принципу пропорциональных ущербностей. Тогда:

I. Найдутся системы чисел $\bar{c} = \{c_1, c_2, \dots, c_K\} \geq 0$; $\bar{d} = \{d_{j_1}, d_{j_2}, \dots, d_{j_R}\} \geq 0$; $\bar{\lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N-1}\}$, что для функции Лагранжа
$$L(\bar{x}^*, \bar{c}, \bar{d}, \bar{\lambda}) = J_j(\bar{x}^*) + \sum_{i=1}^K c_i \psi_i(\bar{x}^*) + \sum_{r=j_1}^{j_R} d_r \varphi_r(\bar{x}^*) + \sum_{e=1}^{N-1} \lambda_e G_e[\bar{J}(\bar{x}^*), \bar{J}^0, A]$$
, где j - любое целое число на $\{1, N\}^{j_1, j_R}$, выполняется равенство $dL(\bar{x}^*, \bar{c}, \bar{d}, \bar{\lambda})/d\bar{x} = 0$.

2. Выполняются условия дополняющей нежесткости

$$c_i \psi_i(\bar{x}^*) = 0; d_r \varphi_r(\bar{x}^*) = 0 \forall i = \overline{1, K} \forall r = \overline{j_1, j_R}$$

3. Квадратичная форма $D = \bar{y}^T \frac{d^2 L(\bar{x}^*; \bar{c}, \bar{d}, \bar{\lambda})}{d \bar{x}^2} \bar{y}$ неотрицательна на гиперплоскости, заданной уравнениями $\frac{d \Psi_i(\bar{x}^*)}{d \bar{x}} \bar{y} = 0$;
 $\frac{d \Psi_{\ell q}(\bar{x}^*)}{d \bar{x}} \bar{y} = 0$; $\frac{d G_{\ell}[\bar{J}(\bar{x}^*), \bar{J}^0, A]}{d \bar{x}} \bar{y} = 0 \forall j = \overline{1, m} \forall q = \overline{1, Q} \forall \ell = \overline{1, N-1}$,

где

$$G_{\ell}[\bar{J}(\bar{x}), \bar{J}^0, A] = \frac{\alpha_i}{\Phi_i} \left\{ J_i(\bar{x}) - \frac{\alpha_{i+1}}{\Phi_{i+1}} [J_{i+1}(\bar{x}) - J_{i+1}^0] - J_i^0 \right\} \forall i = \overline{1, N-1}$$

причем неравенства $\Psi_i(\bar{x}) \leq 0$, $\Psi_r(\bar{x}) \leq 0$ активны $\forall i = \overline{1, l_m}$
 $\forall r = \overline{1, l_a}$.

Кроме того, в работе получена теорема, утверждающая достаточные условия многокритериального параметрического оптимума второго порядка по принципу пропорциональных ущербностей, аналогичная теореме 2. В работе приведен расчетный пример, иллюстрирующий применение полученных теорем.

Задача многокритериального оптимального управления АВЭС в форме Майера, рассмотренная в работе, состоит в выборе элемента $\bar{x}^* \in X$, представляющего собой N -мерную систему кусочно-непрерывных функций, являющегося оптимальным проектом АВЭС с вектор-критерием (IO) по принципу пропорциональных ущербностей. Составляющие вектор-критерия (IO) заданы в виде

$$J_i(\bar{x}) = \varphi_i[\bar{y}(t_i)] \geq 0 \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (23)$$

причем $\varphi_i(\bar{y})$ непрерывны и непрерывно дифференцируемы по $\bar{y} \forall i = \overline{1, N}$, а движение АВЭС описывается векторным дифференциальным уравнением в форме Коши:

$$\dot{\bar{y}} = \bar{F}(\bar{y}, \bar{x}, \bar{z}, t), \quad \bar{y} \in Y, \quad \bar{x} \in X', \quad \bar{z} \in Z, \quad t \in [t_0, t_1] = T, \quad \bar{y}^0 = \bar{y}(t_0), \quad (24)$$

где $\bar{F} = \text{colon}\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ - вектор-функция непрерывная по всем переменным и непрерывно дифференцируемая по \bar{y} . Остальные переменные имеют тот же смысл, что и в системе (9).

Ограничения на правом конце траектории заданы

$$\Phi: \{g_i[\bar{y}(t_1)] = \varphi_i[\bar{y}(t_1)] - J_i^{\text{доп}} \leq 0 \quad \forall i = \overline{1, j_n}; R \leq N\} \quad (25)$$

вместе с весовыми коэффициентами (15) и нормализующими множителями $\Phi_i \forall i = \overline{1, N}$.

В работе сформулирована и доказана теорема, основанная на принципе максимума Л.С.Понтрягина, условием которой удовлетворяет решение поставленной задачи многокритериального оптимального управления АВЭС. Кроме того, приведен расчетный пример, иллюстрирующий применение указанной теоремы.

В реферируемой работе приведены схемы алгоритмов, позволяющих

получить решение $\bar{x}^* \in X$ задачи многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС по принципу пропорциональных ущербностей в диалоговом режиме "ЛПР - ЦВМ", если исходная неопределенность не позволяет обоснованно назначить величины предельных допустимых значений частных критериев качества J_{i0} и (или) величины значений весовых коэффициентов $\alpha_i \forall i = 1, N$.

Пятая глава посвящена решению инженерной задачи двухкритериальной параметрической оптимизации линеаризованных АВЭС третьего порядка с помощью номограмм.

В работе рассмотрен случай, когда качество регулирования одной из координат $y_i, i \in [1, m]$ АВЭС представляет наибольший интерес. При этом движение АВЭС упрощенно описано системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2; \quad \dot{y}_2 = y_3; \\ \dot{y}_3 = \frac{1}{\lambda_4} \cdot [-\lambda_3 y_3 - \lambda_2 y_2 - \lambda_1 y_1 + \lambda_1 y_1^2 + \lambda_5 \dot{y}_1^2]; \\ y_i(0) = y_2(0) = y_3(0) = 0; \quad t \in [0, \infty); \quad \bar{x} \in X, \end{cases} \quad (26)$$

множество X физической реализуемости и устойчивой работы системы задано в виде

$$X = \{ \lambda_1, \lambda_4 - \lambda_2 \lambda_3 < 0; \lambda_5 - \lambda_2 < 0 \}, \quad (27)$$

а критерии качества регулирования координаты y_1 записаны

$$\begin{cases} J_1(X) = \max_{f_1, f_2} \max_{t \in [0, \infty)} \{ f_1 = |y_1(t)|, f_2 = I(t) \}, \\ J_2(X) = \kappa_1 \int_0^{\infty} [y_1(t) - I(t)]^2 dt, \end{cases} \quad (28)$$

где $y_1^2(t) = I(t)$, $\bar{x} = \text{colon} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5 \} \in X$ - вектор оптимизируемых параметров системы (26).

В работе приведена инженерная методика получения элемента $\bar{x}^* \in X$, являющегося оптимальным проектом АВЭС с вектор-критерием (28) по принципу пропорциональных ущербностей, с помощью номограмм для преобразованной по Вышнеградскому системы (26) при соотношениях весовых коэффициентов: $\alpha_1/\alpha_2 = 1/1$; $\alpha_1/\alpha_2 = 1/5$. Методика распространена на двукратно интегрирующие системы ($\lambda_2 = \lambda_5$) и внедрена для проектирования электроприводов грокатных станков в ЧО ТИМПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ. С помощью разработанной методики были рассчитаны параметры регулятора системы подчиненного регулирования нажимных винтов стана П180 ЧМЗ. В результате внедрения оптимизированного регулятора повышено быстродействие технологической операции примерно на 5% без существенного ухудшения других показателей.

Шестая глава посвящена разработке инженерных методов решения и решению конкретных задач многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС по принципу пропорциональных ущербностей.

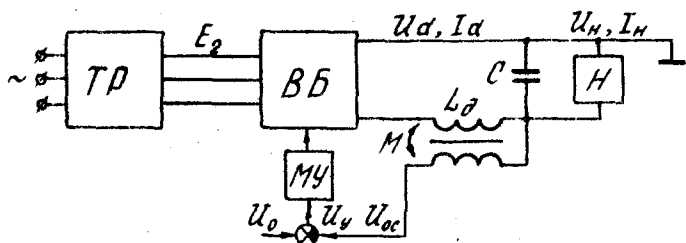
Для АВЭС, функционирование которых описывается системой (24), где $\bar{x} \in X$ представляет собой n -мерную систему действительных чисел, а качество функционирования характеризует вектор-критерий (10), составляющие которого унимодальны и вычисляются на траектории системы (24), причем задано множество $X: \{x_j - x_j^* \leq 0; -x_j + x_j^* \leq 0 \forall j = \overline{1, n}\}$, разработан комплекс вычислительных алгоритмов многокритериальной оптимизации, основанный на применении комбинированного градиентного и ньютоновского численного метода к условиям теоремы 2. Кроме того, в работе получена и внедрена программа однокритериальной параметрической оптимизации, основанная на градиентном методе Э.Полака, с интегральным квадратичным функционалом для случая линеаризованной модели АВЭС.

Для решения задач двухкритериальной двух- или трехпараметрической оптимизации АВЭС в работе предложена и внедрена для проектирования объектов НПО "Автоматика" г. Свердловска инженерная графо-аналитическая методика, основанная на принципе пропорциональных ущербностей. В соответствии с планами НИР, проводимых кафедрой "Автоматика и телемеханика" Челябинского политехнического института совместно с рядом предприятий г. Челябинска, НПО "Автоматика" г. Свердловска (данные НИР утверждены в планах соответствующих отраслевых министерств), в работе решены задачи оптимизации АВЭС, состоящих из генератора постоянного тока и автоматизированного электропривода (фиг. 2, 3), а также управляемого выпрямителя, сглаживающего фильтра (СФ) и нагрузки (фиг. 4).

Основные цели функционирования АВЭС (фиг. 2, 3) и вектор оптимизируемых параметров \bar{x} заданы в первой главе реферируемой работы.

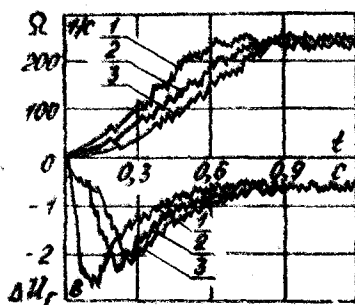
Задача, поставленная в работе, состоит в выборе компромиссного вектора параметров $\bar{x}^* = \text{colon}\{C_1^*, C_2^*\} \in X$, являющегося оптимальным проектом АВЭС с вектор-критерием (I) по принципу пропорциональных ущербностей, причем $X: \{1 \leq C_i \leq 51; i = \overline{1, 2}; K_{cr}(C_1, C_2) > 1500\}$, где C_i измерены в микрофарадах $\forall i = \overline{1, 2}$; $K_{cr}(C_1, C_2)$ - коэффициент сглаживания корректирующего контура по напряжению.

В работе получено решение поставленной задачи на плоскости $\{C_1, C_2\}$ по разработанной графо-аналитической инженерной методике. При этом для случая $\alpha_1/\alpha_2 = 1/1$ компромиссное решение $\bar{x}^* = \text{colon}\{43 \text{ мкФ}; 1 \text{ мкФ}\}$; $\delta_1(\bar{x}^*) = \delta_2(\bar{x}^*) = 19,3\%$. Решение поставленной задачи, полученное в работе из условия (13), где $\rho[\bar{J}(\bar{x}), \bar{J}^0] =$



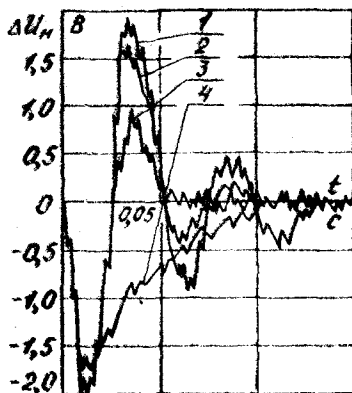
ТР - силовой трансформатор; МУ - магнитный усилитель; ВБ - вентильный блок; C, L_{σ} - емкость и индуктивность рассеяния сглаживающего фильтра; E_2 - действующее значение ЭДС вторичной обмотки ТР; U_d, I_d, U_n, I_n - средние значения выпрямленных напряжения и тока, напряжения и тока нагрузки, соответственно; M - коэффициент взаимной индукции; U_0, U_y, U_{oc} - напряжения уставки, управления, обратной связи.

Фиг. 4



1. $C_1 = 17 \text{ мкФ}; C_2 = 1 \text{ мкФ};$
2. $C_1 = 43 \text{ мкФ}; C_2 = 1 \text{ мкФ};$
3. $C_1 = 51 \text{ мкФ}; C_2 = 1 \text{ мкФ}.$

Фиг. 5



1. $M = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Г};$
2. $M = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Г};$
3. $M = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Г};$
4. $M = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ Г}.$

Фиг. 6

$=\delta_1(\bar{x})+\delta_2(\bar{x})$, не обеспечило желаемого равенства ущербностей; при этом $\bar{x}^*=\text{colon}\{51\text{мкФ}; 1\text{мкФ}\}$; $\delta_1(\bar{x}^*)=27,1\%$; $\delta_2(\bar{x}^*)=0\%$.

На макете АВЭС (фиг.2), собранном из штатного оборудования, сняты и представлены на фиг.5 переходные процессы при разгоне электропривода; причем настройке $\bar{x}^*=\text{colon}\{17\text{мкФ}; 1\text{мкФ}\}$ соответствует $\inf_{\bar{x} \in X} J_1(\bar{x})$, а $\bar{x}=\text{colon}\{51\text{мкФ}; 1\text{мкФ}\} - \inf_{\bar{x} \in X} J_2(\bar{x})$. Количественная оценка качества переходных процессов, полученных экспериментально, примерно совпадает с расчетной.

Основными целями функционирования АВЭС (фиг.4) считаем поддержание среднего напряжения на нагрузке на номинальном уровне и достижение наименьших весо-габаритных показателей СФ. Габариты СФ, качество электроэнергии характеризуют, соответственно, критерии

$$\begin{cases} J_1 = [\alpha(L_g)]^3 \cdot K_3(L_g) + C \cdot \mathcal{E}_c(C) & [g\text{м}^3] \\ J_2 = \int_0^{\infty} (U_H - U_{\text{уст}})^2 dt, & \end{cases} \quad (29)$$

а вес СФ $J_3 = (L_g)^{1/2} \cdot K_{GL} + C \cdot K_{GC}$ [кг], где $\alpha(L_g)$, $K_3(L_g)$, $\mathcal{E}_c(C)$, K_{GL} , K_{GC} - величины, характеризующие конструкцию и материалы дросселя, тип емкостей СФ. Очевидно, что выбор параметров L_g , C , M из условия минимума критерия J_1 не совпадает с выбором из условия минимума J_2 . Задача, поставленная в работе, состоит в выборе компромиссного вектора параметров $\bar{x}^* = \text{colon}\{L_g^*, C^*, M^*\} \in X$, являющегося оптимальным проектом АВЭС с вектор-критерием (29) по принципу пропорциональных ущербностей; причем $X: \{0,2 \cdot 10^{-3} \leq L_g \leq 0,8 \cdot 10^{-3}; 0,03 \leq C \leq 0,13; 0,2 \cdot 10^{-3} \leq M \leq 0,6 \cdot 10^{-3}; K_{cr}(\bar{x}) > 80; J_3(\bar{x}) \leq J_{3\text{доп}}\}$, где L_g , M измерены в генри, C - в фарадах, $J_{3\text{доп}}$ - допустимый вес СФ, $K_{cr}(\bar{x})$ - коэффициент сглаживания СФ по напряжению.

В работе получено решение поставленной задачи на плоскости $\{L_g, C\}$ при $M \in [0,2 \cdot 10^{-3}; 0,6 \cdot 10^{-3}]$ по разработанной графо-аналитической инженерной методике. При этом для случая $\alpha_1/\alpha_2 = 1/1$ компромиссное решение $\bar{x}^* = \text{colon}\{0,31 \cdot 10^{-3} \Gamma; 0,074 \Phi; 0,30 \cdot 10^{-3} \Gamma\}$, $\delta_1(\bar{x}^*) = \delta_2(\bar{x}^*) = 33\%$. Решение поставленной задачи, полученное в работе из условия (13), где $\rho[J(\bar{x}), J^0] = \delta_1(\bar{x}) + \delta_2(\bar{x})$, не обеспечило желаемого равенства ущербностей; при этом $\bar{x}^* = \text{colon}\{0,33 \cdot 10^{-3} \Gamma; 0,069 \Phi; 0,30 \cdot 10^{-3} \Gamma\}$, $\delta_1(\bar{x}^*) = 24,1\%$; $\delta_2(\bar{x}^*) = 40,3\%$. На макете АВЭС, собранного из штатного оборудования, сняты и представлены на фиг.6 переходные процессы при набросе нагрузки в окрестности номинальной. Численный анализ осциллограмм показал, что искомая величина $\bar{x}^* \in X$ является эффективной.

В приложении к диссертационной работе приведено исследование взаимосвязи принципа заданных свойств системы и принципа минимакса, а также программы на языке ФОРТРАН-4 для ЕС ЭВМ

– параметрической оптимизации линеаризованных систем управления по интегральному квадратичному критерию качества с ограничениями на величины оптимизируемых параметров;

– вычисления сетки значений функционалов оптимизации АВЭС, состоящих из взаимодействующих

а) генератора постоянного тока и автоматизированного электропривода;

б) управляемого выпрямителя, сглаживающего фильтра и нагрузки.

Кроме того, приложены акты внедрения основных результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами основные выводы и рекомендации настоящей работы могут быть сделаны следующим образом:

1. Для формирования частных интегральных критериев качества рекомендуется брать за основу выражение (2). При решении задачи выбора предпочтительного способа нормализации частных критериев качества из множества располагаемых способов использование определения I обеспечивает выбор предпочтительного способа из условия лучшей равномерности в окрестности компромиссного решения.

2. Величину параметра ρ в выражении (7), порожденного метрикой (6), рекомендуется выбирать из условия обеспечения повышенной чувствительности суперкритерия (7) к изменению умербностей $\delta_i^i \forall i = 1, m$ по формуле (8) по сравнению с чувствительностью суперкритерия (7) при $\rho = 1$.

3. Принцип заданных свойств системы обеспечивает наилучшее приближение вектор-критерия $\mathcal{J}(\bar{x}^*)$ к \mathcal{J}^0 по метрике ρ . При этом гарантируется строгая обратная пропорциональность мер безразмерных отклонений $\mathcal{J}_i(\bar{x}^*)$ от $\mathcal{J}_i^0 \forall i = 1, N$ весовым коэффициентам.

4. Оптимальный по принципу заданных свойств системы проект АВЭС $\bar{x}^* \in X$ для случая (16), (19) может быть вычислен из выражения (21). Оптимальный по принципу пропорциональных умербностей проект АВЭС

– оптимален по Парето, если выполняются условия теоремы 1;

– может быть вычислен из выражения (22).

5. Если вектор параметров $\bar{x}^* \in X$ является оптимальным проектом АВЭС по принципу пропорциональных умербностей, то $\bar{x}^* \in X$ удовлетворяет условиям теоремы 2.

6. Для решения $\bar{x}^* \in X$ задачи двухкритериальной параметрической оптимизации АВЭС двух классов разработаны и внедрены инженерные методики.

7. Разработан комплекс вычислительных алгоритмов многокритериальной параметрической оптимизации АВЭС.

8. Разработана и внедрена программа однокритериальной параметрической оптимизации АВЭС, применяемая в режиме машинного проектирования.

9. Применение принципа пропорциональных ущербностей к решению задач оптимизации параметров

- регулятора в системе подчиненного регулирования нажимных винтов стана И180 ЧМЗ позволило снизить время выполнения технологической операции примерно на 5% по сравнению с настройкой системы по "техническому оптимуму";

- АВЭС ("генератор - электропривод") позволило достичь настройки, обеспечивающей компромисс между наилучшим качеством поддержания напряжения генератора и наилучшим качеством отработки задания по скорости. При этом для $\alpha_1/\alpha_2 = 1/1$ получено $\delta_1^* = \delta_2^* = 19,3\%$.

- АВЭС ("управляемый выпрямитель - сглаживающий фильтр - нагрузка") позволило достичь настройки, обеспечивающей компромисс между минимальными габаритами сглаживающего фильтра и наилучшим качеством поддержания напряжения на нагрузке. При этом для $\alpha_1/\alpha_2 = 1/1$ получено $\delta_1^* = \delta_2^* = 33\%$.

Кроме того, в работе сформулированы и доказаны соответствующие утверждения и теоремы, формулирующие необходимые и отдельно достаточные условия существования оптимального по принципу заданных свойств системы проекта АВЭС, необходимые условия его парето-оптимальности, а также достаточные условия выпуклости множества Q изменения частных критериев качества.

Для оптимального по принципу пропорциональных ущербностей проекта АВЭС $\bar{x}^* \in X$ в работе получены

- теорема, определяющая достаточные признаки $\bar{x}^* \in X$, являющегося вектором параметров АВЭС;

- теорема, определяющая необходимые признаки $\bar{x}^* \in X$, являющегося вектором управления АВЭС.

Свойства разработанного метода, методик и реализованных систем говорят о возможности их эффективного использования не только для АВЭС, но и при проектировании систем управления и регулирования других классов.

Основное содержание диссертации опубликовано автором
в следующих работах

1. Критерии качества регулирования динамических систем. - "Изв. вузов. Электромеханика", 1976, № 8, с.878-881 (соавторы Каретный О.Я., Яковлев Б.С.).
2. Номограмма двухкритериальной оптимизации. - В сб.: "Автоматизированные системы управления в химической промышленности". Киев, "Знание", 1976, с.10-13 (соавторы Каретный О.Я., Яковлев Б.С.).
3. Метод многокритериального синтеза параметров систем подчиненного регулирования электроприводов с помощью номограмм. Информационный листок № 423-76 Челябинского межотраслевого ЦНИИ (соавторы Каретный О.Я., Малкиель Г.И., Олевский Р.А.).
4. Исследование критериев и вектор-критериев качества динамических систем. - В сб.: "Информационно-управляющие системы и устройства". Челябинск, ЧПИ, 1976, № 183, с.15-19.
5. Алгоритм оптимизации по многокритериальному принципу максимума. В сб.: "Управляющие и информационные элементы и системы". Челябинск, ЧПИ, 1977, № 200, с.10-12 (соавтор Казьмин О.Н.).
6. Синтез регуляторов систем подчиненного регулирования координат с переменными коэффициентами объекта. - В сб.: "Электротехническая промышленность. Электропривод", вып.7(60), М., 1977, с.11-13 (соавторы Алеев Г.Р., Итенберг Б.З., Русаков В.Г.).
7. *Нормування частинних критеріїв якості в задачі векторної оптимізації. - В сб.: „Засоби і системи автоматичного управління виробничими процесами в хімічній промисловості та їх техніко-економічна ефективність.” Київ, „Знання”, 1977, с.6-7 (соавторы Каретный О.Я., Малкиель Г.И.).*
8. Номограммы многокритериальной оптимизации систем управления третьего порядка. - "Изв. вузов. Электромеханика", 1978, № 2, с.148-152 (соавтор Каретный О.Я.).
9. Векторная оптимизация динамических систем. - В сб.: "Электротехническая промышленность. Электропривод". Вып.4(66), М., 1978, с.9-12 (соавтор Каретный О.Я.).