

На правах рукописи

БУРЧАК Олег Трофимович

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ВВОДА-ВЫВОДА ЭНЕРГИИ В
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ СОЛЕНОИД

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и
системы, включая их управление
и регулирование

Специальность 05.13.16 - Применение вычислительной техники,
математического моделирования и
математических методов в научных
исследованиях

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00814618 (S)

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

На правах рукописи

БУРЧАК Олег Трофимович

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ВВОДА-ВЫВОДА ЭНЕРГИИ В
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ СОЛЕНОИД

- Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование
- Специальность 05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993

Ав 26.84

Работа выполнена в Институте проблем
энергосбережения АН Украины

- Научный руководитель - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
А.В.НОВОСЕЛЫЦЕВ
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор
А.Ф.ВЕРЛАНЬ
- кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
В.П.ГУЛЕНКО
- Ведущая организация - Институт электродинамики
Академии наук Украины

Защита диссертации состоится "11" марта 1993 г.
в 14 часов на заседании специализированного Совета К 016.63.01
в Институте проблем энергосбережения АН Украины по адресу:
252070, Киев-70, ул. Покровская, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "10" февраля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
канд. техн. наук

Н.В. Рапшун

Н.В.РАПШУН



В-26,87С-3

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из основных задач, стоящих перед экономикой Украины, является задача создания новых энергосберегающих технологий и оборудования. Широкие перспективы в этом направлении открываются при разработке и внедрении электротехнических систем (ЭТС) и комплексов, функционирование которых основано на использовании явления сверхпроводимости. Применение сверхпроводниковых (СП) ЭТС позволяет обеспечить эффективное и качественное преобразование параметров электрической энергии, а также накопление и сохранение ее с малыми потерями в течение длительного интервала времени. Особую актуальность вопросам развития СП систем и комплексов придает открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости и ведущиеся в этом направлении интенсивные исследования.

В настоящее время наибольшее распространение среди СП устройств получили СП магнитные системы (СПМС). Указанные системы находят широкое применение в различных областях промышленности и науки. В частности, они используются при изготовлении устройств транспортного и энергетического назначения, в медицине, для магнитной сепарации руд и других областях. Для ввода, вывода и регулирования магнитной энергии СП соленоидов (СПС), составляющих основу СПМС, применяются источники постоянного тока, работающие при комнатных температурах, имеющие съемные тоководы (ТВ) в криогенную зону и СП выключатели, шунтирующие СПМС. Такие устройства прямого ввода характеризуются высокой скоростью ввода-вывода магнитной энергии, но обладают большими габаритами и низким КПД.

Более перспективным является применение СП статических преобразовательных ЭТС ввода-вывода энергии в СПС (СП ЭТС), характеризующихся малыми габаритами, высоким КПД криогенной зоны (более 96%), высокой точностью регулирования и стабилизации уровня магнитного поля. Специфика таких систем заключается в том, что часть силовых элементов выполнена из СП материалов и расположена в зоне криогенных температур, а согласование параметров первичного источника питания и СПС осуществляется при помощи "теплого" преобразователя. При этом на несколько порядков снижаются потери энергии в "холодной" зоне системы. Другим перспективным направлением является разработка комбинированных систем питания СПМС, когда быстрый ввод энергии производится с помощью устройств прямого ввода, а регулирование и стабилизация уровня энергии осуществляется посредством СП ЭТС.

Современный этап в развитии СП ЭТС характеризуется повышением и ужесточением предъявляемых к ним функциональных и энергетических требований, постоянным расширением области применения, ростом единичных мощностей устройств. Ввиду этого все большее значение приобретают вопросы выбора оптимальных параметров системы, определения энергетически эконо-

мичных режимов эксплуатации, расчета оптимальных алгоритмов управления, предотвращения аварийных ситуаций. Решение перечисленных вопросов сдерживается их недостаточной теоретической проработкой, что объясняется новизной и сложностью такого рода систем, обладающих иерархической структурой силовых цепей и содержащих нелинейные элементы со скачкообразно изменяющимися параметрами. Эти характерные факторы обуславливают принадлежность СП ЭТС к классу устройств, моделируемых электрическими цепями с переменной структурой (ЭТС с переменной структурой).

В настоящее время разработаны различные методы и алгоритмы параметрической оптимизации таких ЭТС, однако все они основаны на использовании поисковых процедур. В то же время специфика СП ЭТС предъявляет повышенные требования к точности решаемых оптимизационных задач (до 10^{-5} - 10^{-7}), которые могут быть обеспечены только градиентными методами оптимизации. При этом применение указанных методов для СП ЭТС осложнено отсутствием эффективных алгоритмов вычисления градиентов функционалов.

Научные исследования проводились в отделе моделирования и оптимизации систем с полупроводниковыми преобразователями электрической энергии ИПЭ АН Украины. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами НИР Совета министров, ГКНТ и АН Украины по комплексным проблемам "Научные основы электроэнергетики", "Научные основы энергосбережения", а также в рамках международного целевого проекта "Сильноточные устройства с использованием сверхпроводников, работающих при различных температурах" (задание 6.2.4.5), выполненными в рамках темы "Трембита" (1988-1990 г.г. Пост. ГКНТ №27 от 20.07.88 г., № Гос. регистр. 01.89.0024480), темы "Доминанта-2" (1988-1991 г.г. Пост. Президиума АН Украины №402 от 11.12.87 г., № Гос. регистр. 01.88.0019095).

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности процессов ввода-вывода энергии в сверхпроводниковый соленоид путем разработки элементов теории чувствительности для сверхпроводниковых статических электротехнических систем и выбора на этой основе оптимальных параметров их конструкции и управления.

Поставленная цель потребовала решения ряда основных задач: 1. Разработки математических моделей и постановки оптимизационных задач для СП ЭТС. 2. Разработки элементов теории чувствительности ЭТС переменной структуры. 3. Разработки методики решения оптимизационных задач для ЭТС с переменной структурой. 4. Разработки программного комплекса, моделирующего и оптимизирующего процессы ввода-вывода энергии в СП соленоид. 5. Разработки энергетически оптимальных режимов работы и алгоритмов управления СП ЭТС ввода-вывода энергии. 6. Разработки конструктивных решений СП подсистемы (СППС) с оптимальным размещением СП элементов.

Методы исследования. Решение поставленных задач потребовало использования элементов теорий электрических цепей, магнитного поля и СП преобразователей; математического аппарата теорий систем с переменной структурой, дифференциальных уравнений и оптимизации; численно-аналитических методов анализа чувствительности электрических цепей; численных методов и алгоритмов условной и негладкой оптимизации. Достоверность расчетов, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментально.

Основные положения, выносимые на защиту: 1. Математические модели оптимизационных задач для СП ЭЭС. 2. Элементы теории чувствительности ЭЭС с переменной структурой. 3. Алгоритмы вычисления градиентов функционалов, заданных на решении ЭЭС с переменной структурой. 4. Методика решения оптимизационных задач для ЭЭС с переменной структурой. 5. Принципы построения программного комплекса, моделирующего и оптимизирующего работу ЭЭС ввода-вывода энергии в СПС. 6. Энергетически оптимальные режимы и алгоритмы управления СП ЭЭС. 7. Результаты параметрической оптимизации процессов ввода-вывода энергии и их использование при создании устройств различного функционального назначения.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые исследованы вопросы чувствительности сверхпроводниковых статических ЭЭС ввода-вывода энергии к изменению обобщенного вектора параметров конструкции и управления, получены рекуррентные соотношения для вычисления функций чувствительности таких систем;

- предложены новые алгоритмы вычисления градиентов энергетических критериев для СП ЭЭС, использующие решения систем в вариациях, сопряженных систем и инвариантов движения;

- предложена и обоснована оригинальная методика получения оптимальных алгоритмов управления и конструкций СП ЭЭС, основанная на использовании точных штрафных функций, алгоритмов вычисления градиентов и алгоритмов недифференцируемой оптимизации с растяжением пространства;

- доказаны оптимальность по энергетическим критериям режима коммутации ЭЭС и алгоритма управления с постоянной амплитудой изменения тока первичной обмотки СП трансформатора (СПТ) для СП ЭЭС, выполненной по двухполупериодной схеме выпрямления со средней точкой.

Практическая ценность. Использование новых научных положений, обоснованных в диссертационной работе, позволило формализовать процедуры оптимизации ЭЭС переменной структуры и, тем самым:

- разработать единый подход к вычислению функций чувствительности ЭЭС переменной структуры для различных комбинаций варьируемых параметров;

- снизить вычислительные затраты на получение градиентов функционалов, заданных на решении ЭЭС:

-свести задачу условной параметрической оптимизации ЭТС переменной структуры к решению безусловной оптимизационной задачи с негладким функционалом цели и тем самым ограничиться вычислением градиента только одного функционала на каждом шаге итеративного процесса решения задачи;

-разработать и создать программный комплекс, моделирующий и оптимизирующий работу ЭТС ввода-вывода энергии в СПС.

Результаты оптимизации процессов ввода энергии в СПС и конструктивных решений СППС непосредственно использованы при разработке и создании ЭТС ввода-вывода энергии с улучшенными энергетическими показателями.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты работы положены в основу ряда разработок, выполненных при участии автора в 1988-1991 г.г. по х/д с заинтересованными организациями и предприятиями: №52-88, 683-91 (г.Москва, НИИРФ, г.Донецк, ДонФТИ), №05-88, 607-90 (г.Москва, ЭНИН), №26-91 (г.Н.Новгород, НПО "Полет"). Малая серия (7шт.) ППЭС и СПЭС в составе ЭТС для запитки СПМС постоянным током до 120 А изготовлена СКТБ ИПЭ АНУ и используется в радиофизических исследованиях. Всего по теме диссертации имеется 5 актов внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на III Всесоюзном семинаре по численным методам нелинейного программирования, г. Харьков (1979 г.); семинаре "Теория оптимальных решений" Института кибернетики АН Украины (1980г.); VIII Всесоюзной н/т конференции "Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве", г.Челябинск (1989г.); V Всесоюзной н/т конференции "Проблемы преобразовательной техники", г.Чернигов (1991 г.); Всесоюзном семинаре "Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости", г.Яремча (1990 г.); Международной н/т конференции "Комплексные проблемы сверхпроводимости", г.Киев (1992 г.).

Публикации. По результатам работы опубликовано 5 статей, 1 препринт, 6 тезисов докладов, получено 1 авторское свидетельство на изобретение и 1 положительное решение по заявке на изобретение (всего 14 публикаций). По смежным вопросам имеется 7 опубликованных работ (одна монография).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 147 наименований и приложения. содержит 131 страниц основного машинописного текста, 32 страниц рисунков и таблиц, а также 25 страниц приложения.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определена цель работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность, освещены основные результаты диссертации, ее апробация, публикации и структура.

В первом разделе ЭТС ввода-вывода энергии в СПС исследуются как

объекты оптимизации. При этом основное внимание уделяется постановке задачи улучшения энергетических характеристик СП ЭТС и обзору имеющихся подходов к решению оптимизационных задач для такого рода систем.

Современные СП ЭТС обеспечивают ввод, вывод и стабилизацию тока СПС. Функционально они включают следующие подсистемы: полупроводниковую преобразовательную (ПППС), СП преобразовательную (СППС), рефрижерации (ПСР), измерения и защиты (ПСИЗ) (рис.1).

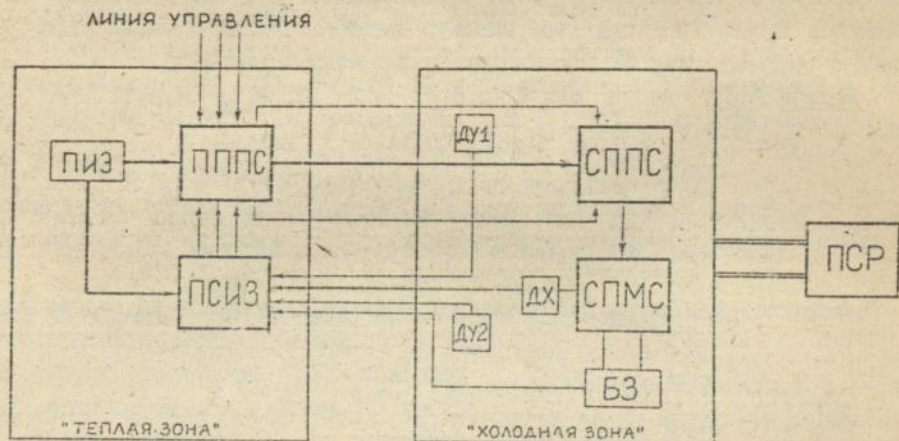


Рис.1

Температурные зоны СП ЭТС связаны между собой СП трансформатором (СПТ), имеющим первичную многовитковую и вторичную многоамперную обмотки.

В разделе анализируются основные особенности СП ЭТС, необходимые для построения ее математической модели и постановки оптимизационных задач. Отмечается, что для повышения энергетической эффективности процессов ввода-вывода энергии в СПС целесообразно учитывать следующие характерные особенности СП ЭТС: тепловую энергию, выделяемую в СППС (компенсируется ПСР с высоким коэффициентом рефрижерации); состояние сверхпроводимости элементов СППС (подвержены одновременному влиянию электрического, магнитного и теплового полей); инерционность тепловых процессов в криотронах. При этом особое внимание уделяется режимам коммутации, алгоритмам работы и управления, а также размещению СП элементов системы.

В подразделе 1.2 приведена постановка задачи оптимизации режимов работы и алгоритмов управления СП ЭТС по энергетическим критериям.

Непроизводительные затраты энергии СП ЭТС (W_{Π}) включают в себя потери в "теплой зоне" ($W_{т.з.}$), "холодной зоне" ($W_{х.з.}$) и затраты энергии в ПСР ($W_{\text{реф}} = k_p \cdot W_{х.з.}$, где k_p - коэффициент рефрижерации). Высокие затраты на рефрижерацию (k_p для гелиевых установок изменяется от 400 до 1500

Вт/Вт) объясняют значение снижения $W_{\text{к.з.}}$ для повышения эффективности работы СП системы в целом. В свою очередь $W_{\text{к.з.}}$ определяется теплопритоками через токовводы и тепловыделениями на элементах СППС ($W_{\text{т}} = W_{\text{в}} + W_{\text{к}}$, где $W_{\text{в}}$ - потери от "обратных токов" на интервалах ввода, а $W_{\text{к}}$ - коммутационные потери). Перечисленные величины зависят от вектора параметров СП ЭТС, который можно условно разбить на три компонента: конструктивные параметры (α); электромагнитные параметры (β) и параметры системы управления (γ). Требуется за время $T_{\text{зап}}$, не превосходящее $T_{\text{зап}}^*$, ввести в СП ток, близкий к $I_{\text{н}}$, затратив при этом минимум энергии. После формализации приходим к следующей задаче нелинейного программирования (НЛП).

Задача P_{спс}: найти $\min W_{\text{т}}(\alpha, \beta, \gamma)$ или $\min W_{\text{к.з.}}(\alpha, \beta, \gamma)$
при $T_{\text{зап}}(\alpha, \beta, \gamma) \leq T_{\text{зап}}^*$, $|I_{\text{р}}(\alpha, \beta, \gamma)| \leq I_{\text{рmax}}$,
 $I_{\text{н}} \cdot (1 - \varepsilon) \leq I_{\text{н}}^{\text{к}}(\alpha, \beta, \gamma) \leq I_{\text{н}} \cdot (1 + \varepsilon)$, $(\alpha, \beta, \gamma) \in \Omega \in \mathbb{R}^{k \times m \times n}$,
где ε - точность стабилизации тока СПС. Неравенства задают ограничения на время запитки, точность стабилизации тока и мощность тепловыделений на токовводах, а включение - ограничения на параметры СП ЭТС.

Конкретные выражения для введенных понятий получаются на основе ана-

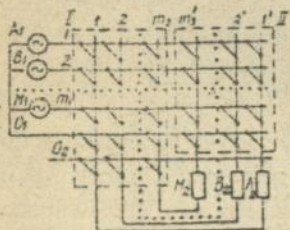


Рис.2

лиза переходных электромагнитных процессов в СППС. Рассмотрим обобщенную схему СП вентиляльного устройства, работающего на СП нагрузку (рис.2). В этом случае СППС состоит из m_1 контуров первичных обмоток СПТ (индекс p) и m_2 контуров вторичных обмоток (индекс s), а электромагнитные процессы в СП ЭТС описываются следующей системой дифференциальных уравнений (СДУ)

$$\frac{dI_p}{dt} = A_{pp} \cdot \text{diag}(R_p) \cdot I_p + A_{ps} \cdot \text{diag}(R_s) \cdot I_s + B_p \cdot U_p$$

$$\frac{dI_s}{dt} = A_{sp} \cdot \text{diag}(R_p) \cdot I_p + A_{ss} \cdot \text{diag}(R_s) \cdot I_s + B_s \cdot U_p \quad (1)$$

где U_p, I_p, R_p, I_s, R_s - вектора напряжений, токов и сопротивлений в контурах обмоток СПТ; $A_{pp}, A_{ps}, A_{sp}, A_{ss}$ - матрицы коэффициентов; B_p, B_s - матрицы коэффициентов свободных членов; $\text{diag}(R_p), \text{diag}(R_s)$ - диагональные матрицы с элементами векторов R_p и R_s на главной диагонали. Коэффициенты и свободные члены системы являются функциями параметров (α, β, γ) .

Каждый цикл работы СП ЭТС состоит из функциональных интервалов, характеризующихся длительностью (t^1) и структурой СППС. Моменты t^1 определяются из условий переключения структуры (восстановление СП состояния,

завершение процесса коммутации и др.). В силу сказанного $P_{\text{СПС}}$ можно отнести к классу задач параметрической оптимизации ЭТС переменной структуры с ограничениями на переменные состояния и управляющие параметры.

В подразделе 1.3 приведена постановка задачи оптимального размещения элементов СПС. Отмечается, что взаимовлияние СП элементов усиливается в виду того, что СПС и СПС находятся в ограниченном объеме "холодной зоны" системы. При этом воздействие магнитного фактора может быть существенно ослаблено путем оптимального размещения СП элементов.

При исследовании магнитных полей СПС рассматривается как система из $m_1 + m_2 + 1$ СП катушек: первичных и вторичных обмоток СПТ и обмотки СПС. Например, однофазная СПС состоит из 4 СП катушек (СПС, первичной и 2-х вторичных обмоток СПТ), а трехфазная - из 7 (СПС, 3-х первичных и 3-х вторичных обмоток СПТ). Через катушки протекают токи $I_{p_i}(t)$ $i=1, \dots, m_1$, $I_{s_i}(t)$ $i=1, \dots, m_2$ и $I_H(t)$ (изменение токов описывается СДУ (1)).

Согласно принципа суперпозиции вектор индукции магнитного поля в точке $P \in K$, где K -объем криостата, равен векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых отдельными катушками. При этом величина поля каждой СП катушки пропорциональна величине протекающего через нее тока.

Пусть СП ЭТС рассматривается на интервале времени $[t_H, t_K]$. Требуется найти точку P^* и параметры α^* , при которых влияние магнитного поля минимально. В данном случае нельзя ограничиться каким-нибудь одним моментом времени, так как векторы токов I_p и I_s изменяются во времени. Задача состоит в минимизации самого сильного воздействия суммарного магнитного поля на исследуемую точку. Таким образом, для рассматриваемой задачи лучше всего подходит равномерная чебышевская норма. При этом задача оптимального размещения элементов СПС формулируется следующим образом.

Задача $P_{\text{СПС}}$: найти $\min_{(x,y,z) \in K} \max_{t \in [t_H, t_K]} \|B(P, t, \alpha, \beta, \gamma)\|$

при $(\alpha, \beta, \gamma) \in \Omega$, $(x, y, z) \in K$. Величина $\|B(t)\|$ определяется нормой в трехмерном пространстве, а токи $I_p(t), I_s(t)$ - решениями ЭТС с переменной структурой. Функционал цели задачи, как функция максимума, является негладким. Таким образом $P_{\text{СПС}}$ относится к классу задач условной параметрической оптимизации ЭТС переменной структуры с негладким функционалом цели.

В подразделе 1.4 дается обзор методов и алгоритмов оптимизации СП ЭТС. При этом отмечается, что такие системы обладают рядом специфических свойств, связанных с наличием СП элементов. Это малое сопротивление отдельных контуров системы (10^{-10} - 10^{-16} Ом), высокая чувствительность СП элементов (магнитное поле в 1 Тл снижает величину критического тока на 20 %, а перегрев криотрона на 5 % увеличивает время восстановления СП

свойств в 2 раза). Эти и другие особенности СП ЭТС требуют повышенной точности решения задач моделирования и оптимизации протекающих физических процессов. Причем для оптимизационных задач необходимая точность (10^{-5} - 10^{-7}) может быть обеспечена только градиентными методами. В оставшейся части подраздела приводится обзор методов НЛП и обосновывается целесообразность использования точных штрафных функций для учета ограниченной оптимизационной задачи в случае СП ЭТС.

Во втором разделе приводятся результаты исследования чувствительности ЭТС переменной структуры к изменению ее параметров. Предполагается, что ЭТС состоит из N структур, т.е. исходный интервал $[t_n, t_k]$ разбит на N подинтервалов моментами времени $t^i, i=1, \dots, N$. В этом случае математическое описание ЭТС переменной структуры включает в себя:

уравнения динамики структур

$$\dot{x}^i = f^i(x^i, \lambda), \quad t \in [t^{i-1}, t^i], \quad i = 1, \dots, N, \quad x^i \in E^{n_i}, \quad \lambda \in E^m, \quad (2)$$

начальные условия

$$x_n^1 = x^1(t^0) = \Phi^0(\lambda), \quad t_n = t^0 = t^0(\lambda), \quad (3)$$

условия окончания работы

$$t_k = t^N = t^N(\lambda) \quad \text{или} \quad t_k = t^N = t : \Phi^N(x^N(t), \lambda) = 0, \quad (4)$$

условия переключения структур

$$t^i = t^i(\lambda) \quad \text{или} \quad t^i = t : \Phi^i(x^i(t), \lambda) = 0 \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

условия связи структур

$$x_n^{i+1} = x^{i+1}(t^i) = \Phi^i(x^i(t^i), \lambda) \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (6)$$

где λ - обобщенный вектор варьируемых параметров. Верхний индекс указывает на номер структуры, нижний - на номер компоненты вектора. Нижние индексы "н" и "к" указывают на начальные или конечные моменты работы ЭТС или некоторой ее структуры. Нижний буквенный индекс обозначает частную производную функции по указанному буквой аргументу. Для обозначения сложных функций используется внешняя функциональная зависимость этой функции с указанием соответствующего аргумента.

В подразделе 2.2 доказывается, что для $t \in (t^0, t^1)$ функция чувствительности равна

$$x_\lambda^1(t, \lambda) = X^1(t, t^0) \cdot [\Phi_\lambda^0(\lambda) - f^1(x_n^1, \lambda) \cdot t_\lambda^0(\lambda)] + Y^1(t, t^0), \quad (7)$$

а при $t \in (t^i, t^{i+1}) \quad i=1, \dots, N-1$ справедливо соотношение:

$$x_\lambda^{i+1}(t, \lambda) = X^{i+1}(t, t^i) \cdot [\Phi_\lambda^i(x_k^i, \lambda) + \Phi_x^i(x_k^i, \lambda) \cdot x_\lambda^i(t^i - 0, \lambda) + \Delta^i f \cdot t_\lambda^i(\lambda)] + Y^{i+1}(t, t^i), \quad (8)$$

где $\Delta^i f = \Phi_x^i(x_k^i, \lambda) \cdot f^i(x_k^i, \lambda) - f^{i+1}(x^{i+1}, \lambda), \quad i = 1, \dots, N-1.$

Замечание. Через $X^i(t, t^{i-1})$ и $Y^i(t, t^{i-1})$ обозначаются решения систем в вариациях для i -ой структуры, соответственно, решение системы

доставляющих минимум функционалу цели $F_0(x, \lambda)$ и удовлетворяющих ограничениям (9). В подразделе 3.1 показано, что при постановке оптимизационных динамических задач возможно ограничиться рассмотрением только терминальных функционалов Майера, а градиенты функционалов цели и ограничений задачи могут быть получены из соотношения

$$F_{1,\lambda}(x, \lambda) = F_{1,x}(x, \lambda) \cdot x_\lambda(\lambda) + F_{1,\lambda}(x, \lambda). \quad (10)$$

Производные $F_{1,x}(x, \lambda)$ и $F_{1,\lambda}(x, \lambda)$ находятся непосредственно из функциональной зависимости $F_1(x, \lambda)$, а функции чувствительности $x_\lambda(\lambda)$ могут быть вычислены на основании результатов раздела 2.

Далее предложен подход, основанный на редукции исходной задачи условной параметрической оптимизации ЭТС переменной структуры к решению безусловной оптимизационной задачи с негладким функционалом цели вида

$$P(\lambda, \mu) = F_0(\lambda) + \mu \cdot \left[\sum_{i=1}^S |F_i(\lambda)| + \sum_{i=S+1}^{S+R} \max(0, F_i(\lambda)) \right]. \quad (11)$$

Для редукцированной задачи обоснован выбор алгоритма негладкой оптимизации с растяжением пространства в направлении разности двух последовательных градиентов, обладающего повышенной скоростью сходимости к решению (точке минимума) в условиях овражности и недифференцируемости функционала цели (11), а также разработаны процедуры выбора и изменения штрафных коэффициентов в процессе решения задачи.

В подразделе 3.2 предложены три алгоритма вычисления градиентов функционалов для ЭТС с переменной структурой и обосновано их использование в различных ситуациях. Первый и второй алгоритмы основаны на решении систем в вариациях и формуле (10). Они требуют для своей реализации интегрирования $n \cdot (n + m) + n$ скалярных дифференциальных уравнений (n - размерность переменных состояния ЭТС, m - размерность вектора варьируемых параметров). Третий алгоритм основан на решении сопряженных систем.

В этом случае градиент функционала $G(\lambda) = G(x^N(t^N(\lambda), \lambda), \lambda)$ равен

$$G_\lambda(\lambda) = G_x(x_K^N, \lambda) + \varphi^N(t_K) \cdot r_K^N \cdot t_\lambda^N(\lambda) - \varphi^1(t_H) \cdot r_H^1 \cdot t_\lambda^O(\lambda) + \varphi^1(t_H) \cdot \sigma_\lambda^O(\lambda) + \sum_{i=1}^{N-1} \varphi^{i+1}(t^i) \cdot \left[\Phi_\lambda^i(\lambda) + \Delta^i r \cdot t_\lambda^i(\lambda) \right] + \sum_{i=1}^N \int_{t^{i-1}}^{t^i} \left[\varphi^1(\tau) \cdot r_\lambda^1(x(\tau), \lambda) \right] d\tau, \quad (12)$$

где $\varphi^i(t)$ $i = 1, \dots, N$ решения сопряженных систем

$$\dot{\varphi}^i = - \varphi^i \cdot r_x^i(x^i(t, \lambda), \lambda) \quad i = 1, \dots, N, \quad (13)$$

такие что $\varphi^N(t^N) = G_x(x_K^N, \lambda)$ и $\varphi^i(t^i) = \varphi^{i+1}(t^i) \cdot \Phi_x^i(x_K^i, \lambda)$ $i = 1, \dots, N-1$.

Для ЭТС с переключениями на сигнальных поверхностях справедливо

$$G_\lambda(\lambda) = G_x(x_K^N, \lambda) + \varphi^N(t_K) \cdot r_K^N \cdot t_\lambda^N(\lambda) - \varphi^1(t_H) \cdot r_H^1 \cdot t_\lambda^O(\lambda) + \varphi^1(t_H) \cdot \sigma_\lambda^O(\lambda) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{N-1} \varphi^{i+1}(t^i) \cdot B^i + \sum_{i=1}^N \int_{t^{i-1}}^{t^i} \left[\varphi^i(\tau) \cdot r_{\lambda}^i(x(\tau), \lambda) \right] d\tau, \quad (14)$$

где $\varphi^i(t)$ $i = 1, \dots, N$ решения сопряженных систем (13), такие что

$$\varphi^N(t^N) = G_x(x_K^N, \lambda) \quad \text{и} \quad \varphi^i(t^i) = \varphi^{i+1}(t^i) \cdot A^i \quad i = 1, \dots, N-1,$$

$$A^i = \Phi_x^i(x_K^i, \lambda) - \Delta^i r \cdot \left[\Phi_x^i(x_K^i, \lambda) \cdot r^i(x_K^i, \lambda) \right]^{-1} \cdot \left[\Phi_x^i(x_K^i, \lambda) \right],$$

$$B^i = \Phi_{\lambda}^i(x_K^i, \lambda) - \Delta^i r \cdot \left[\Phi_x^i(x_K^i, \lambda) \cdot r^i(x_K^i, \lambda) \right]^{-1} \cdot \left[\Phi_{\lambda}^i(x_K^i, \lambda) \right].$$

Для реализации алгоритма необходимо интегрирование $k \cdot (n + m) + n$ скалярных дифференциальных уравнений (k - количество функционалов, для которых необходимо вычислять градиенты). Из сравнения трудоемкости алгоритмов вычисления градиентов функционалов следует, что при $k < n$ необходимо применять третий алгоритм, а при большом числе рассматриваемых функционалов ($k > n$) более эффективными являются алгоритмы один и два.

Таким образом, предложенная методика решения оптимизационных задач для ЭТС переменной структуры позволяет, в сочетании с разработанными алгоритмами вычисления градиентов, ограничиться решением только $2 \cdot n + m$ дифференциальных уравнений на каждом шаге процесса решения задачи.

В четвертом разделе приведены результаты моделирования и оптимизации конкретных СП ЭТС ввода-вывода энергии в СПС.

Сложность и трудоемкость разработки и изготовления СП ЭТС, высокая стоимость СП материалов и проведения экспериментальных исследований при криогенных температурах потребовали разработки комплекса моделей, адекватно описывающих и оптимизирующих функционирование ЭТС. В подразделе 4.1 приводится описание программного комплекса моделирования СП ЭТС, включающего блоки моделирования электромагнитных процессов; оптимизации СП ЭТС по энергетическим критериям; моделирования нестационарных тепловых процессов в криотронах; расчета динамики магнитного поля и оптимального размещения СП элементов системы; расчета и оптимизации индуктивных элементов ЭТС; моделирования аварийных ситуаций. В настоящее время комплекс состоит из 27 программ, написанных на языках программирования Си и Фортран, и работает под управлением операционной системы MS DOS.

Для проверки адекватности предложенных моделей был разработан и изготовлен лабораторный макет низкотемпературной СП ЭТС на токи до 110 А, параметры конструкции и управления которого определялись с помощью программного комплекса. Проведенные натурные эксперименты показали высокую степень совпадения рассчитанных и измеренных характеристик СП ЭТС (от 85 до 97 %). На рис.3 приведены результаты исследования скорости ввода энергии от точности проведения процесса коммутации. Кривая I характери-

зует работу СП ЭТС в режиме точной коммутации ЭДС; кривая 2 - смешанный режим с 50%-й коммутацией ЭДС; кривая 3 - режим коммутации сопротивлений. При этом рассчитывалась также величина потерь энергии (рис.4).

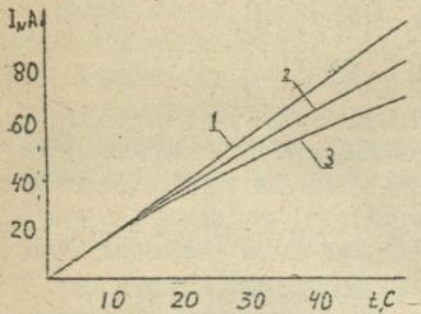


Рис.3

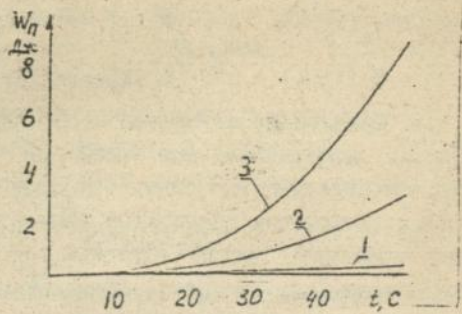


Рис.4

Из рисунков видно, что для повышения надежности и эффективности работы СП ЭТС необходимо высокоточное проведение коммутации ЭДС и поддержание нулевого напряжения на первичной обмотке СПТ на интервалах восстановления криотронов. Далее дается классификация аварийных ситуаций, приводятся результаты их анализа, разрабатываются модели контактов СП проводов.

В подразделе 4.2 решается задача повышения КПД СП ЭТС, выполненной на основе двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой. Согласно алгоритму работы СП ЭТС вектор управления $\gamma = (U_p, t_{B1}, t_{K1}, \dots, t_{BN}, t_{KN})$, где N - число циклов работы ЭТС. Кроме ограничений на положительность величин, имеются ограничения на частоту работы ЭТС $t_{\Pi}^{\min} \leq t_{\Pi} \leq t_{\Pi}^{\max}$ и на амплитуду тока в первичной обмотке СПТ: $\max \|I_p(t)\| \leq \bar{I}_p$. Сформулированная задача решается согласно методике раздела 3. При этом

$$P(\gamma) = \eta(\gamma) - C_{pen} \cdot \sum_{j=1}^{2N} \max \{0, -\bar{I}_p - I_{pj}(\gamma), -\bar{I}_p + I_{pj}(\gamma)\} - C_{bar} \cdot \left[\frac{1}{U - U_{\min}} + \frac{1}{U_{\max} - U} + \sum_{j=1}^{2N} \left(\frac{1}{t_B^j} + \frac{1}{t_K^j} + \frac{1}{t_{\Pi}^j - t_{\Pi}^{\min}} + \frac{1}{t_{\Pi}^{\max} - t_{\Pi}^j} \right) \right],$$

где C_{pen} - коэффициент штрафа, C_{bar} - коэффициент барьера. Экстремум функции $P(\gamma)$ находится с помощью алгоритма с растяжением пространства. Результаты работы алгоритма максимизации в зависимости от числа k вычислений $P(\gamma)$ приведен на рис.5,6,7. Здесь $I_{c,2}^{1,2}$ - остаточные амплитуды тока коммутации для четного и нечетного циклов работы, ΔI_p - амплитуда изменения тока первичной обмотки СПТ, k - число вычислений функции $P(\gamma)$.

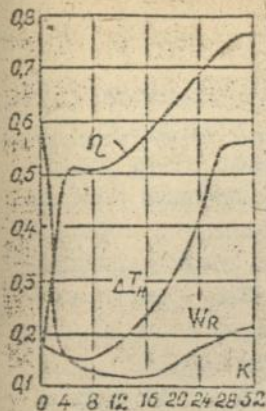


Рис.5

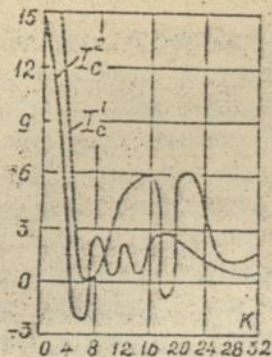


Рис.6

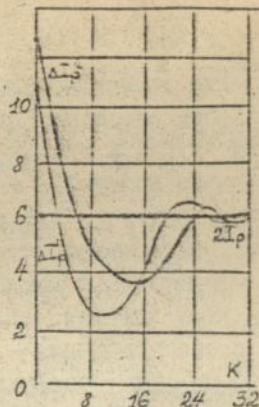


Рис.7

Из рис.5 видно, что R-алгоритм уже на 9-ой итерации (всего за 30 вычислений $P(\gamma)$) достиг 97% конечного результата, что показывает его высокую эффективность для данного класса задач. Из рис.6 и 7 видно, энергетически оптимальными для данной СП ЭТС являются коммутация ЭДС и алгоритм управления с постоянной амплитудой изменения тока первичной обмотки СПТ. Использование оптимальных параметров управления позволило снизить потери энергии в "холодной зоне" на 40-50 % и повысить ее КПД до 98 %.

В подразделе 4.3 исследуется перспективная СП ЭТС, выполненная на основе трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом. С помощью вычислительных экспериментов был разработан новый алгоритм управления ЭТС, удовлетворяющий условию оптимальности и позволяющий вводить ток на интервалах коммутации и остывания криотронов. Это позволило значительно сократить время запитки СПС и уменьшить скважность питающего напряжения.

При изучении магнитных полей трехфазная СП ЭТС рассматривается как система из 7 СП катушек (3 СПТ и СПС). На рис.8 и 9 представлены картины

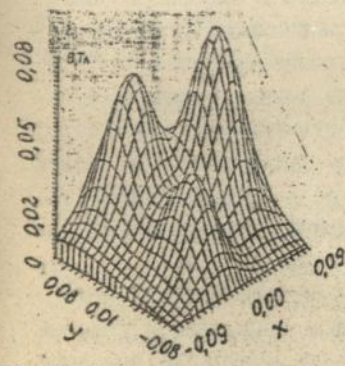


Рис.8

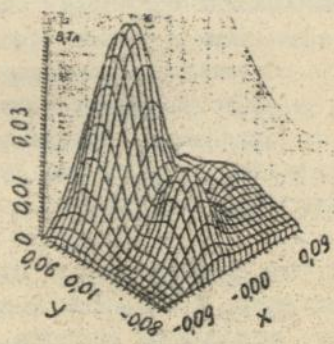


Рис.9

распределения величины индукции магнитного поля внутри криостата (для горизонтальной плоскости, разделяющей СП трансформаторы и нагрузку). Ток в нагрузке - 100 А. Рис.8 соответствует моменту окончания ввода тока в нагрузку через контур 1, а рис.9 - моменту окончания коммутации тока из контура 2 в контур 3. При оптимальном размещении СП элементов трехфазной подсистемы, выполненном согласно разработанной методики, удалось снизить на 37 % отрицательное воздействие совокупного (СППС и СПМС) магнитного поля, которому клапаны теплоуправляемых криотронов подвергаются на интервалах остывания и ввода, что повысило надежность работы ЭТС.

В приложении содержатся листинги программ и акты внедрений результатов диссертационной работы.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате анализа электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в подсистемах СП ЭТС, выявлены основные источники потерь электрической и тепловой энергии. Показано, что проблема повышения энергетической эффективности процессов ввода-вывода энергии в СПС может быть в значительной степени решена путем снижения тепловых потерь в "холодной зоне" системы на интервалах коммутации и от обратных токов на интервалах ввода энергии посредством выбора оптимальных параметров алгоритма управления СППС, а также оптимального размещения элементов СППС. Проведена формализация перечисленных оптимизационных задач.

2. На основе полученных теоретических результатов в области чувствительности ЭТС с переменной структурой предложен единый подход к вычислению функций чувствительности для такого рода систем и разработаны алгоритмы определения градиентов функционалов цели и ограничений, что позволило применить при решении задач параметрической оптимизации ЭТС быстроходящиеся градиентные методы.

3. Выполненный обзор известных поисковых методов и алгоритмов оптимизации ЭТС переменной структуры показал их ограниченную применимость для ЭТС с СП элементами и узлами. Предложена и обоснована методика оптимизации СП ЭТС, сочетающая использование негладких точных штрафных функций и методов недифференцируемой оптимизации с растяжением пространства. В результате исходная задача условной оптимизации редуцируется к задаче безусловной оптимизации с негладким функционалом цели, что позволяет ограничиться интегрированием только $2 \cdot n + m$ скалярных дифференциальных уравнений на каждом шаге итеративного процесса решения задачи.

4. Разработан алгоритм вычисления градиентов энергетических критериев функционирования СП ЭТС, основанный на решении сопряженной системы и использовании инвариантов движения, гарантирующий получение значения

градиентов при интегрировании не более чем $(2 \times n + m)$ дифференциальных уравнений (n - размерность переменных состояния ЭТС, m - размерность вектора варьируемых параметров).

5. На основе изучения специфики построения СП ЭТС и исследования электрических, магнитных и тепловых процессов, протекающих в цепях СПЭС, сформулированы принципы построения и разработан программный комплекс, моделирующий и оптимизирующий работу СП ЭТС ввода-вывода энергии. Проведение вычислительных экспериментов и расчет параметров с помощью программного комплекса позволили значительно сократить время разработки новых СП ЭТС, а также повысить надежность и эффективность их работы.

6. В результате решения задачи параметрической оптимизации ЭТС ввода-вывода энергии в СПС с СПЭС, выполненной по двухполупериодной схеме выпрямления со средней точкой, доказаны оптимальность по энергетическим критериям режима коммутации ЭДС и алгоритма управления с постоянной амплитудой изменения тока первичной обмотки СПТ.

7. В результате проведения вычислительных экспериментов для трехфазных СП ЭТС разработаны новый алгоритм управления, позволяющий вводить ток на интервалах коммутации и остывания криотронов, что значительно сократило время запитки СПС и уменьшило скажность питающего напряжения, а также конструкция с оптимальным размещением СП элементов, что позволило снизить на 87 % отрицательное воздействие совокупного (СПЭС и СПМС) магнитного поля, которому клапаны теплоуправляемых криотронов подвергаются на интервалах остывания и ввода.

8. Энергетически оптимальные алгоритмы работы и схемы с оптимальным размещением СП элементов, рассчитанные посредством предложенной методики, легли в основу разработки ЭТС, используемой в радиофизических исследованиях. Конкретные результаты оптимизации использованы при изготовлении малой серии (7шт.) ППЭС и СПЭС в составе ЭТС для запитки СПМС постоянным током до 120 А.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Бурчак О.Т. Опыт применения г-алгоритма к решению задач условной оптимизации // Численные методы нелинейного программирования: Тез. докл. III Всесоюз. семинара, Харьков, сент. 1979 г. - Харьков, 1979. - С.48-50.

2. Бурчак О.Т., Мирзоахмедов Ф. Управление процессами с разрывными траекториями // Автоматика. - 1981. - № 2. - С.43-54.

3. Бурчак О.Т. Разрывные процессы с управляемыми скачками // Теория оптимальных решений. - Киев : ИР АН УССР, 1980. - С.53-59.

4. Бурчак О.Т. Ступенчатое управление процессами с разрывными траекториями // О некоторых алгоритмах негладкой оптимизации и дискретного

программирования.- Киев, 1981.- С.16-24.- (Препр./АН УССР. Ин-т кибернетики; № 81-6).

5. Бурчак О.Т., Попадинец В.И. О выборе рационального способа определения градиента функции качества управления динамическим процессом// Кибернетика.- 1987.- № I.- С.39-41.

6. Бурчак О.Т., Сизоненко В.П., Марченко М.И. Применение универсального и специального программных комплексов для анализа сверхпроводниковых преобразователей //Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве.- Челябинск, 1989.-С.136-137.

7. Бурчак О.Т., Марченко М.И. Расчет оптимального размещения ключевых элементов сверхпроводникового преобразователя//Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости: Тез. докл., Яремча, сент. 1990.- Киев, 1990.- С.11.

8. Бурчак О.Т. Оптимизация режимов и алгоритмов работы сверхпроводниковых преобразователей по энергетическим критериям //Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости.- Киев: ИПЭ АН УССР, 1990.- С.12-22.

9. Непогодьев С.В., Бурчак О.Т. Энергетически эффективный сверхпроводниковый преобразователь //Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости.- Киев: ИПЭ АН УССР, 1990.- С.27-32.

10. Васильев А.П., Бурчак О.Т. Математическая модель электрических контактов в статических сверхпроводниковых преобразователях//Проблемы преобразовательной техники : Тез. докл. V Всесоюз. научн.- техн. конф. Чернигов, сент 1991 г.- Киев, 1991.- Ч.2.- С.218-221.

11. Бурчак О.Т., Марченко М.И. Моделирование рабочих и аварийных режимов статических сверхпроводниковых преобразователей//Проблемы преобразовательной техники : Тез. докл. V Всесоюз. научн.- техн. конф. Чернигов, сент 1991 г.- Киев, 1991.- Ч.2.- С.208-211.

12. Tonkal V.E., Novoseltsev A.V., Skobar'khin Y.V., Burchak O.T., Nepogoduev S.V. Cryotron converters for the supply superconducting magnet winding // Комплексные проблемы сверхпроводимости: Тез. докл. Междунаро. научн.-техн. конф., Киев, июнь, 1992 г.-С.83.

Личный вклад автора в работах опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: (2,5) - получены соотношения для вычисления функций чувствительности; (6,7,10,11) - выполнена постановка и построены математические модели исследуемых процессов; (9) - выполнены расчеты на ПЭВМ и предложен алгоритм работы с улучшенными энергетическими характеристиками; (12) - исследование отдельных элементов СП ЭТС.

Соискатель

Оку

Подписано к печати 15.01.93

Формат 60x84/16

Бумага офсетная №2. Усл. печ. л. I.O. Усл.-кр. отт. I.O

Уч.-изд. л. I.O. Тираж 150 экз. Заказ № 2 . Бесплатно

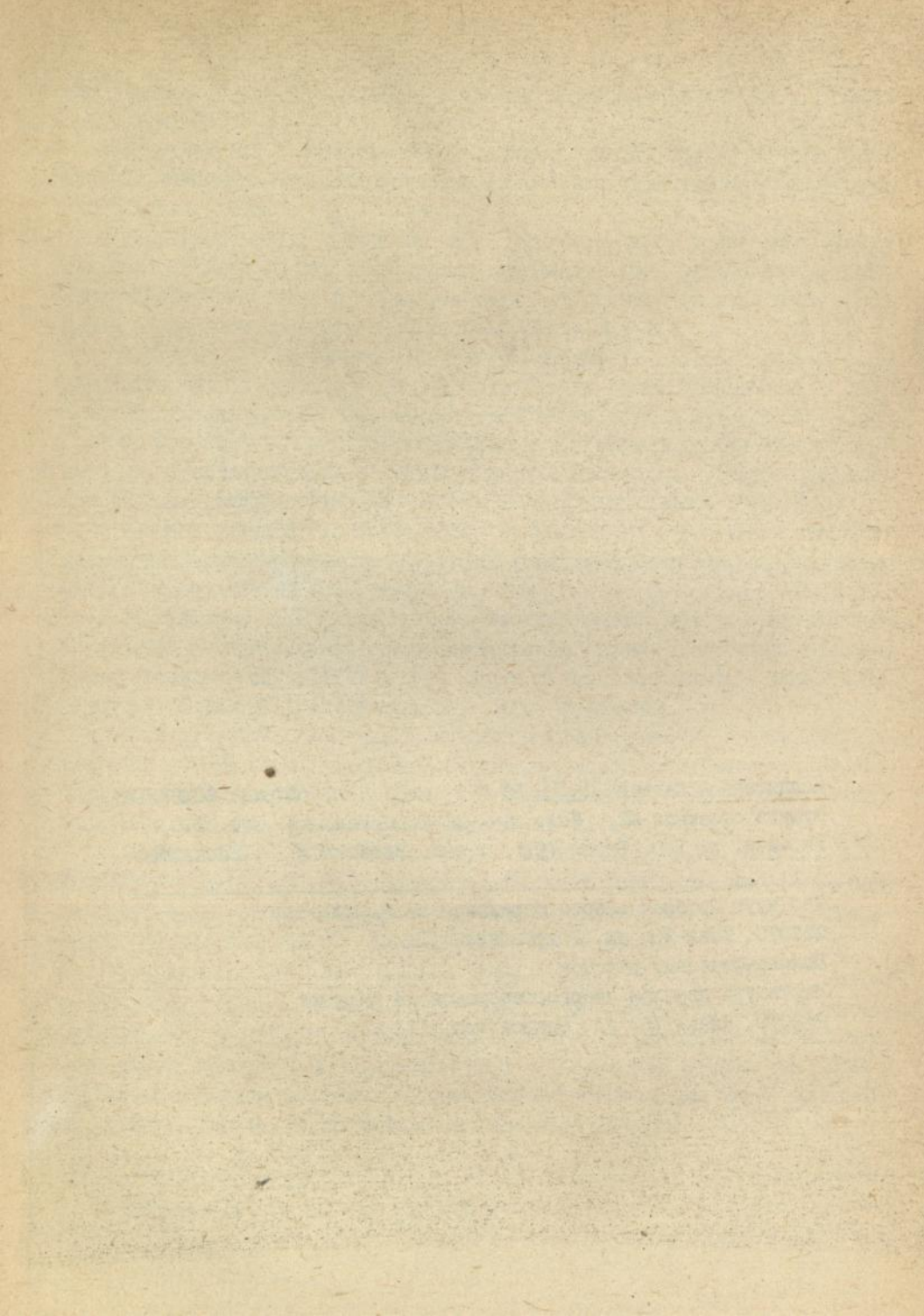
Институт проблем энергосбережения АН Украины

252070, Киев-70, ул. Покровская, II.

Полиграфический участок

Института проблем энергосбережения АН Украины

252070, Киев- 70, ул. Покровская, II



47111

AB 26.840