

6
А-39

Объединенный Совет Отделения
физико-технических наук
АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

На правах рукописи

Г.Г. Громов

АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО
ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЭЭМ.

05.255 - Техническая кибернетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Диссертация на русском языке

Рига, 1971г.

Объединенный Совет Отделения
Физико-технических наук
АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

На правах рукописи

Г.Г. Громов

АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЯГОВОГО
ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЭЭМ.

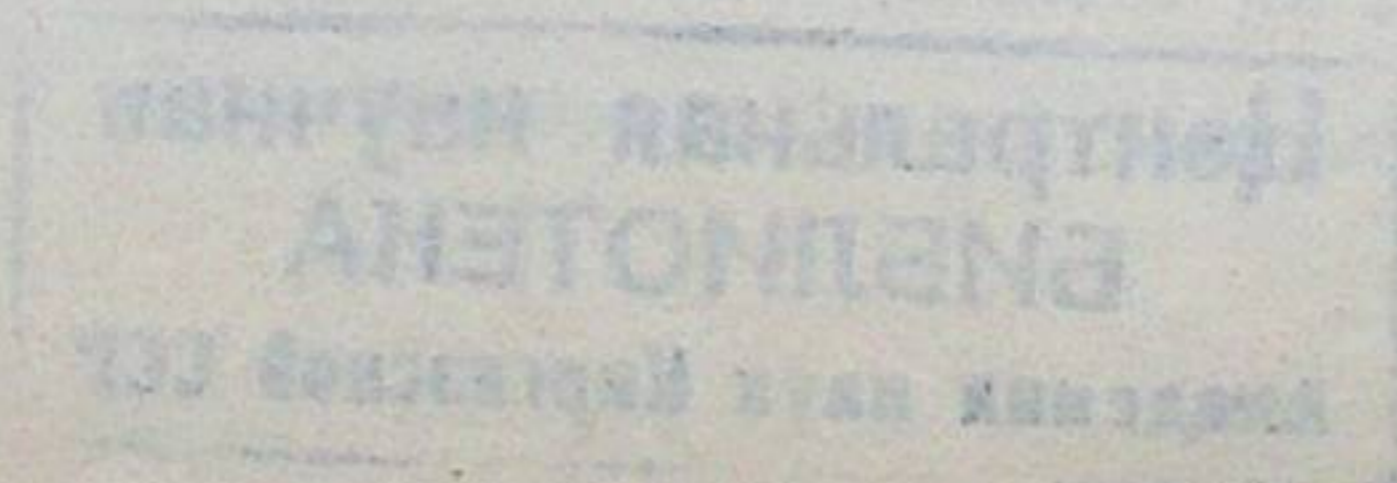
05.255 - Техническая кибернетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Диссертация на русском языке

Рига, 1971г.



Работа выполнена в Институте электроники и вычислительной техники АН Латвийской ССР.

Научный руководитель -
член-корреспондент АН Латвийской ССР
кандидат технических наук В.З. ПИРОГОВ

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор И.Б. МОЦКУС,
кандидат технических наук М.Р. БАРСКИЙ.

Ведущая организация - Рижский ордена Ленина электромашиностроительный завод.

Автореферат разослан " 11 " *ноября* . . . 1971г.
Защита диссертации состоится " " *6 декабря* . . . 1971г.
на заседании Объединенного Совета Отделения физико-технических наук АН Латвийской ССР (г.Рига, ул.Тургенева 19).

Дата защиты будет объявлена дополнительно в газете "Советская Латвия"

Отзывы на автореферат направлять по адресу:
г. Рига, ГСП, ул.Тургенева 19, Объединенный Совет Отделения физико технических наук АН Латвийской ССР.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке АН Латв.ССР (г. Рига, ул. Коммунальная 4).

Ученый секретарь Совета

/ М.П. ЗАКИС /

**Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР**

- 3 -

А 39

ВВЕДЕНИЕ

Директивами XXIV съезда КПСС по новому пятилетнему плану предусматривается дальнейшее улучшение транспортного обслуживания населения на основе повышения эффективности работы и улучшения использования транспортных средств.

Все более широкое применение электрической тяги и повышение требований к качеству обслуживания пассажиропотоков выдвигают на первый план решение задач, направленных на повышение эффективности работы пригородных электрифицированных железных дорог. Дальнейшее улучшение их технико-экономических показателей достигается в основном за счет повышения качества процесса проектирования и интенсификации использования электротягового оборудования.

Основным агрегатом электропоезда является тяговый электродвигатель, рабочие характеристики которого в значительной степени определяют как эксплуатационные качества электропоезда, так и отражаются на экономических и технических результатах транспортного обслуживания.

В связи с этим, одной из важнейших задач при проектировании электропоезда является выбор варианта тягового двигателя, обеспечивающего оптимальный режим движения электропоезда в заданных условиях. Критерием выбора такого режима и соответствующего варианта двигателя обычно выступает комплексный экономический показатель, основной переменной составляющей которого является расход электроэнергии на движение электропоезда.

Однако, наряду с указанной задачей, в процессе оптимального проектирования двигателя возникает не менее важная задача, связанная с обеспечением требуемой работоспособности двигателя

при эксплуатации электропоезда в оптимальном режиме.

Работоспособность двигателя в эксплуатации при прочих равных условиях количественно характеризуется величиной длительной мощности (допустимым по нагреву значением длительной электрической нагрузки) двигателя.

Как правило, оптимальному режиму движения соответствуют максимальные пусковой и тормозной токи двигателя, определяющие его эквивалентную нагрузку. Практическая реализация оптимального режима движения в основном ограничена способностью двигателя длительно работать при эквивалентной нагрузке без перегрева изоляции узлов двигателя свыше установленных норм.

В связи с тем, что в процессе выбора оптимального варианта двигателя значение допустимой длительной нагрузки определяется не максимальным, вышеуказанное ограничение снижает использование мощности двигателя в длительном режиме эксплуатации и ухудшает общий критерий оптимальности электропоезда.

Поэтому вторым критерием выбора оптимального варианта двигателя выступает требование обеспечения максимума длительной электрической нагрузки двигателя при оптимальном режиме эксплуатации электропоезда.

В процессе проектирования электропоезда четко просматривается непосредственная связь между тягово-энергетическими параметрами электропоезда, работоспособностью двигателя и его конструктивными параметрами, которая объединяет вышеуказанные задачи в единую двухкритериальную задачу. Для решения ее в такой постановке требуется разработка формальной процедуры принятия сложного решения, а также создание комплекса алгоритмов технического расчета тягового двигателя и тягово-энергетических расче-

тов электропоезда с помощью ЭВМ.

Вопросам разработки методов расчета и оптимального проектирования электрических машин общего назначения посвящены известные труды М. Видмара, В.А. Трапезникова, М.П. Костенко, В.Т. Касьянова, Г.Н. Петрова, А.И. Бертинова, П.С. Сергеева, И.М. Постникова и др., а тяговых машин - труды А.Е. Алексеева, А.Б. Иоффе, В.Е. Скобелева, И.П. Боляева, М.Д. Находкина, В.С. Хвостова и других авторов.

Качественный сдвиг в решении задач оптимального проектирования электрических машин связан с использованием современных ЭВМ. Первая работа в СССР по оптимальному проектированию электрических машин с использованием ЭВМ была выполнена в ЗНИИЭМ под руководством Б.М. Кагана и Т.Г. Сорокера. В дальнейшем, работы подобного рода были развернуты в филиалах ЗНИИЭМ, Институте электромеханики, МЭИ, МАИ и других организациях. Из зарубежных фирм следует отметить "Westinghouse" (США), "AEG" (ФРГ), "Siemens" (ФРГ), "Brown-Boveri" (Швейцария) и ряд других.

Большая работа в этом же направлении проводится на заводах ЧКД-Поага и МЭЗ - Брно (ЧССР). Что касается работ по оптимальному проектированию моторвагонных тяговых машин с использованием ЭВМ, то в основном они посвящены вопросам расчета отдельных параметров, коммутации или режимов работы двигателя. Решение частных задач проектирования не позволяет построить комплексный алгоритм определения оптимальных параметров и характеристик двигателя с учетом требований эксплуатации электропоезда.

Целью реферируемой диссертационной работы является рассмотрение вопросов автоматизации процесса проектирования тягового двигателя, отвечающего заданным требованиям эксплуатации

электропоезда.

Основными задачами диссертации являются.

1. Создание формальной процедуры взаимодействия процессов оптимизации параметров двигателя, обеспечивающих минимальный расход электроэнергии на движение электропоезда в заданных условиях и максимальную работоспособность двигателя в длительном режиме эксплуатации.

2. Разработка алгоритма, позволяющего с помощью ЭВМ автоматизировать технический расчет тягового двигателя.

3. Построение и экспериментальное исследование возможностей алгоритма оптимизации параметров двигателя, обеспечивающих максимум работоспособности при заданных рабочих характеристиках двигателя и параметрах длительного режима работы.

Решение перечисленных задач позволит повысить качество и сократить сроки процесса проектирования тягового электродвигателя. Вместе с этим появляется реальная возможность создания комплексного алгоритма для определения оптимальных технико-экономических параметров электропоезда.

Работа состоит из введения, четырех глав и пяти приложений.

В первой главе рассматривается задача оптимального проектирования тягового двигателя, которая ставится как задача принятия решения по двум критериям оптимальности. Излагается постановка двухкритериальной задачи и предлагается вычислительная схема ее решения.

В § 1.1 с целью выявления режимов и условий работы тягового двигателя рассматриваются основные элементы системы пригородного электрифицированного сообщения и количественные характеристики взаимосвязей между ними, определяющие характер и ре-

жим движения электропоезда.

Вопрос о выборе оптимального варианта тягового двигателя, отвечающего требованиям эксплуатации, обсуждается в § 1.2. Проводится анализ процесса решения задачи оптимального проектирования двигателя, сущность которой состоит в следующем.

Необходимо найти такие значения независимых конструктивных параметров двигателя $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ из множества допустимых D и соответствующие им рабочие характеристики двигателя (скоростную и к.п.д.), которые минимизируют удельный расход электроэнергии на движение электропоезда

$$\min_{X \in D} Q(X) \quad (1)$$

при заданных технической скорости и длине перегона. Рассматриваются отдельные этапы решения задачи (1), связанные с техническим проектированием тягового двигателя на ЭВМ, выбором режима движения на основе тягово-энергетического расчета и принятием решения об оптимальном варианте двигателя. Приводится структурная схема решения задачи и ее описание.

В § 1.3 излагается обоснование выбора допустимой по нагреву длительной электрической нагрузки $I_{\infty}(X)$ в качестве второго критерия оптимальности двигателя.

Решение задачи (1) позволяет определить значения тягово-энергетических параметров, характеризующие оптимальный режим движения электропоезда, основными из которых являются расход энергии на движение $Q(X)$ и соответствующее значение эквивалентного тока двигателя $I_{\infty}(X)$.

Окончательное решение о работоспособности двигателя в выбранном режиме движения принимается в результате проверки ограничения

$$I_{\infty}(X) \leq I_{\infty}(X), \quad (2)$$

где $I_{\infty}(X)$ - допустимое значение длительной нагрузки двигателя, при котором превышения температур его узлов над температурой окружающей среды соответствуют установленным нормам.

В результате проведенного анализа влияния ограничения (2) на процесс выбора параметров двигателя и тягово-энергетических параметров режима движения выявлено следующее.

а) Значение $I_{\infty}(X)$ в процессе решения задачи (I) определяется не максимальным, и зависит не только от вектора X , но и других параметров двигателя.

Это обстоятельство, в свою очередь, тесно связано со следующими неблагоприятными явлениями, которые имеют место в процессе решения задачи (I).

б) Сокращается область поиска D оптимального варианта двигателя и соответствующего режима движения электропоезда.

в) Уменьшается использование заданной расчетной мощности двигателя $P_{\text{рас}}$, так как с целью выполнения ограничения (2) необходимо уменьшать эквивалентную нагрузку двигателя.

г) Ухудшается общий критерий оптимальности электропоезда $Q(X)$, ввиду уменьшения пускового и тормозного токов двигателя, определяющих $I_{\infty}(X)$.

Проведение в процессе решения задачи (I) дополнительной оптимизации параметров двигателя по критерию максимума длительной нагрузки двигателя $I_{\infty}(X)$, позволяет устранить указанные недостатки, присущие процессу решения задачи (I).

Поскольку определение оптимальных параметров двигателя производится с учетом двух факторов (обеспечение экономического режима движения электропоезда и требуемой работоспособности двигателя) со своими критериями оценки, задача оптимального

проектирования двигателя представляется как двухкритериальная. В связи с этим, в § 1.4 рассматривается задача принятия сложного решения, и предлагается способ ее решения.

Особенностью рассматриваемой двухкритериальной задачи является неравноценность критериев, выражающаяся в том, что критерий $Q(X)$ более предпочтителен по сравнению с $I_{\infty}(X)$ и по нему необходимо достичь абсолютного минимума. Это обстоятельство затрудняет использование метода решения данной задачи, основанного на формировании глобального критерия [4,5], позволяющего принять компромиссное решение.

С целью постановки и выбора метода решения данной двухкритериальной задачи в работе проводится анализ влияния независимых переменных $X \in D$ на поведение критериев $Q(X)$ и $I_{\infty}(X)$.

В результате анализа получены зависимости

$$f_i(x_i) = \max I_{\infty}(X / x_i = \text{const}), \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

позволяющие оценить степень влияния каждой независимой переменной x_i на критерий $I_{\infty}(X)$.

В процессе вычисления $f_i(x_i)$ также определяются относительные отклонения расчетных рабочих характеристик двигателя (скоростной $\delta V(x_i)$ и к.п.д. $\delta \eta(x_i)$) от заданных, характеризующие влияние переменной x_i на критерий $Q(X)$. Значения $\delta V(x_i)$ и $\delta \eta(x_i)$ определяются во всем диапазоне изменения нагрузки и ослабления поля возбуждения двигателя α .

На основании результатов проведенного анализа сформированы два непересекающихся подмножества переменных $Z \in X$ и $Y \in X$, из которых первое определяет критерий $I_{\infty}(X)$, а второе определяет

где $I_{\infty}(X)$ - допустимое значение длительной нагрузки двигателя, при котором превышения температур его узлов над температурой окружающей среды соответствуют установленным нормам.

В результате проведенного анализа влияния ограничения (2) на процесс выбора параметров двигателя и тягово-энергетических параметров режима движения выявлено следующее.

а) Значение $I_{\infty}(X)$ в процессе решения задачи (I) определяется не максимальным, и зависит не только от вектора X , но и других параметров двигателя.

Это обстоятельство, в свою очередь, тесно связано со следующими неблагоприятными явлениями, которые имеют место в процессе решения задачи (I).

б) Сокращается область поиска D оптимального варианта двигателя и соответствующего режима движения электропоезда.

в) Уменьшается использование заданной расчетной мощности двигателя $P_{\text{рас}}$, так как с целью выполнения ограничения (2) необходимо уменьшать эквивалентную нагрузку двигателя.

г) Ухудшается общий критерий оптимальности электропоезда $Q(X)$, ввиду уменьшения пускового и тормозного токов двигателя, определяющих $I_9(X)$.

Проведение в процессе решения задачи (I) дополнительной оптимизации параметров двигателя по критерию максимума длительной нагрузки двигателя $I_{\infty}(X)$, позволяет устранить указанные недостатки, присущие процессу решения задачи (I).

Поскольку определение оптимальных параметров двигателя производится с учетом двух факторов (обеспечение экономического режима движения электропоезда и требуемой работоспособности двигателя) со своими критериями оценки, задача оптимального

проектирования двигателя представляется как двухкритериальная. В связи с этим, в § 1.4 рассматривается задача принятия сложного решения, и предлагается способ ее решения.

Особенностью рассматриваемой двухкритериальной задачи является неравноценность критериев, выражающаяся в том, что критерий $Q(X)$ более предпочтителен по сравнению с $I_{\infty}(X)$ и по нему необходимо достичь абсолютного минимума. Это обстоятельство затрудняет использование метода решения данной задачи, основанного на формировании глобального критерия [4,5], позволяющего принять компромиссное решение.

С целью постановки и выбора метода решения данной двухкритериальной задачи в работе проводится анализ влияния независимых переменных $X \in D$ на поведение критериев $Q(X)$ и $I_{\infty}(X)$.

В результате анализа получены зависимости

$$f_i(x_i) = \max_{I_{\infty}(X/x_i = \text{const})} I_{\infty}(X) \quad (3)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

позволяющие оценить степень влияния каждой независимой переменной x_i на критерий $I_{\infty}(X)$.

В процессе вычисления $f_i(x_i)$ также определяются относительные отклонения расчетных рабочих характеристик двигателя (скоростной $\delta V(x_i)$ и к.п.д. $\delta \eta(x_i)$) от заданных, характеризующие влияние переменной x_i на критерий $Q(X)$. Значения $\delta V(x_i)$ и $\delta \eta(x_i)$ определяются во всем диапазоне изменения нагрузки и ослабления поля возбуждения двигателя α .

На основании результатов проведенного анализа сформированы два непересекающихся подмножества переменных $Z \in X$ и $Y \in X$, из которых первое определяет критерий $I_{\infty}(X)$, а второе определяет

$Q(X)$ и влияет на значение $I_{\infty}(X)$.

Это позволило представить двухкритериальную задачу выбора параметров двигателя в виде двух уровней оптимизации.

Задача верхнего уровня состоит в нахождении вектора $Y \in D_2$, для которого общий критерий оптимальности электропоезда принимает значение

$$Q(Y^*) = \min_{Y \in D_2} [Q(Y) / I_{\infty}(Z, Y) \rightarrow \max] \quad (4)$$

Задача нижнего уровня сводится к определению при заданном Y вектора $Z^* \in D_1$, для которого критерий $I_{\infty}(Z)$ принимает значение

$$I_{\infty}(Z^*) = \max_{Z \in D_1} I_{\infty}(Z, Y) \quad (5)$$

В качестве исходного состояния объекта оптимизации принимаются значения параметров Z_0 и Y_0 эксплуатируемого варианта тягового двигателя.

Алгоритм взаимодействия уровней оптимизации заключается в следующем.

1. В исходном состоянии вначале решается задача (4). Процесс решения продолжается до тех пор, пока выполняется условие (6)

$$I_{\infty}(Z, Y) - I_3(Y) \geq 0; \quad (6)$$

определяющее практическую реализуемость выбранного режима движения электропоезда, характеризующегося текущим значением критерия $Q(Y)$ и параметрами двигателя Y, Z .

2. При невыполнении условия (6) происходит передача управления и текущего вектора Y нижнему уровню. При этом нижнему уровню сообщаются параметры режима движения (маршрутная скорость электропоезда V_m и эквивалентное ослабление поля возбуждения двигателя α), характеризующие длительный режим работы двигателя.

3. При заданном Z_0 и текущем значении вектора Y решается задача нижнего уровня.

4. Найденное в результате решения задачи (5) значение критерия $I_{\infty}(Z^*, Y)$ сообщается верхнему уровню, при котором вновь проверяется условие (6).

5. При выполнении (6) продолжается процесс решения задачи (4).

6. При нарушении (6), выбранный режим движения и соответствующий вариант двигателя исключается из рассмотрения. В пространстве параметров Y делается новый рабочий шаг и этапы (1-6) повторяются.

Многошаговый процесс решения задач (4,5) заканчивается при выполнении определенного условия окончания поиска $Q(Y^*)$, заложеного в алгоритме оптимизации параметров Y .

Во второй главе рассматривается вопрос, связанный с выбором метода и алгоритма оптимизации параметров тягового двигателя на нижнем уровне.

Вопросы, касающиеся постановки, выбора метода и алгоритма решения задачи верхнего уровня, подробно рассмотрены В.Л. Сребным в работе [6].

В § 2.1 излагается постановка задачи.

Состояние объекта оптимизации полностью определяют векторы $Z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ и $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$, принимающие значения в m и k -мерных евклидовых пространствах.

Вектор Z представляет собой совокупность "управляемых" переменными из которых являются:

- плотность тока в обмотках возбуждения главного и
- обмотки полюсов;
- под добавочным полюсом;

b_c - ширина лопатки вентилятора;
 b_A - ширина наконечника добавочного полюса и другие

переменные.

Значения составляющих вектора Y на этапе решения задачи нижнего уровня фиксированы и заданы условиями задачи верхнего уровня. В их число входят:

- D_a - диаметр якоря;
- l_a - длина якоря;
- $\delta_{\text{вз}}$ - воздушный зазор под центром главного полюса;
- $P_{\text{расч}}$ - расчетная мощность двигателя и другие конструктивные

параметры. Множество допустимых значений вектора Z обозначим через D_1 , которое задано ограничениями на переменные

$$z_{j1} \leq z_j \leq z_{j2}, (j=1, 2, \dots, m)$$

и на величины, являющиеся их функциями

$$f_{z1}(Z) \leq f_z(Z) \leq f_{z2}(Z), (z=1, 2, \dots, s).$$

Целевой функцией, определяющей выгодность каждого допустимого варианта двигателя на нижнем уровне, является допустимое значение длительной электрической нагрузки двигателя $I_{\infty}(Z, Y)$. При этом более выгодному состоянию сопоставляется большее значение целевой функции.

Необходимо найти такое допустимое состояние объекта $Z^* \in D_1$ при заданном $Y \in D_2$, для которого значение целевой функции

$$I_{\infty}(Z^*, Y) = \max_{Z \in D_1} [I_{\infty}(Z, Y) / Y \in D_2, Y = \text{const}].$$

В § 2.2. проводится анализ методики электромагнитного и теплового расчетов тягового двигателя, в результате которого выявлены особенности организации целевой функции $I_{\infty}(Z, Y)$, основными из которых является:

- критерий оптимальности $I_{\infty}(Z, Y)$ является неявно заданной

функцией от независимых переменных Z и параметров Y ;
 - процесс вычисления значений целевой функции требует больших затрат машинного времени;

- наряду с непрерывно изменяющимися переменными имеются такие, которые изменяются дискретно.

Кроме этого в результате проведенного анализа, определена общая совокупность оптимизируемых параметров X и допустимая область изменения каждого параметра.

Обзор известных поисковых методов оптимизации сложных многопараметрических систем приводится в § 2.3.

Рассмотрены принципы организации, основные характеристики и свойства (быстродействие, потери на поиск, точность определения экстремума) как регулярных методов поиска (Гаусса-Зайделя, градиента, наискорейшего спуска), так и метода случайного поиска.

Принимая во внимание достаточно высокое быстродействие и простоту программной реализации случайного поиска, а также возможность введения операции обучения в процессе многопараметрической оптимизации, в качестве метода решения задачи нижнего уровня принят метод случайного поиска.

Достижение заданной ϵ -окрестности максимума целевой функции $I_{\infty}(Z, Y)$ осуществляется путем использования алгоритма случайного поиска с непрерывным самообучением.

Построение вычислительной схемы алгоритма и ее описание приводится в § 2.4.

Процесс поиска, организованный на основе принятого алгоритма, является многоэтапным процессом сбора информации и

принятия решений на базе полученной информации. В процессе сбора информации на N -м этапе делается q пробных шагов $Z_N^1, Z_N^2, \dots, Z_N^q$ вокруг точки Z_{N-1} пространства оптимизируемых параметров. Полученная информация о поведении целевой функции $I_\infty(Z, Y)$ в районе точки Z_{N-1} позволяет принять решение о переводе процесса поиска в другую точку $Z_N = Z_{N-1} + \Delta Z_N$. Смещение ΔZ_N определяется в соответствии с выбранной функцией решения $\Delta Z_N = f(W_{N-1}, Z_N^1, Z_N^2, \dots, Z_N^q)$, где W - вектор предистории, определяющий влияние предыдущих шагов поиска на выбор N -го шага. Целенаправленное изменение свойств поиска осуществляется в форме самообучения [7].

Как уже отмечалось выше, критерий оптимальности на нижнем уровне является неявно заданной функцией от оптимизируемых переменных Z и параметров Y .

В связи с этим, в § 2.5 излагается поисковая процедура, с помощью которой определяются значения $I_\infty(Z_N, Y)$ как при пробных, так и рабочих шагах алгоритма поиска.

Предварительное значение $I_\infty(Z_N, Y)$ выбирается из заданного интервала $[I_{\infty 1}, I_{\infty 2}]$, нижняя и верхняя границы которого устанавливаются на основе практики проектирования двигателей. Допустимость выбранного значения проверяется путем определения превышения температур узлов двигателя при заданных классах изоляции, которые должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$\theta_l(Z_N, Y, I_{\infty N}) \leq \theta_l^*, \quad l=1, 2, 3, 4. \quad (7)$$

Левые части неравенств (7) определяют превышения температур обмотки якоря, обмоток главного и добавочного полюсов и коллектора двигателя при заданных Z_N и $I_{\infty N}$. Значение $I_{\infty N}$ в каждом заданном состоянии процесса поиска должно определяться

максимально допустимым, удовлетворяющим соотношениям (7).

С целью выбора алгоритма определения $I_{\infty N}$ в работе проводится анализ зависимостей $\theta_l(Z_N, Y, I_{\infty N})$, в результате которого выявлено, что данные функции являются гладкими, одномерными и имеют один экстремум в интервале $[I_{\infty 1}, I_{\infty 2}]$. При этом каждому новому состоянию $Z_{N+1} \in D_1$ соответствует функции, обладающие теми же свойствами.

В качестве алгоритма определения $I_{\infty N}$ используется метод деления интервала $[I_{\infty 1}, I_{\infty 2}]$ пополам [8], модифицированный с учетом ограничений (7).

Приводится вычислительная схема алгоритма и блок-схема программы поиска.

В третьей главе разработан комплекс алгоритмов, позволяющий с помощью ЭВМ автоматизировать технический расчет тягового двигателя постоянного тока, необходимый для определения значения целевой функции на нижнем уровне и расчета рабочих характеристик двигателя.

В § 3.1 рассматриваются вопросы выбора структуры всей программы расчета и построения вычислительной схемы алгоритма определения основных параметров двигателя.

Программа технического расчета двигателя представляет собой набор отдельных блоков, каждый из которых выполняет определенный этап проектирования. Блочная структура программы создает удобства пользования и позволяет при необходимости легко вводить новые, более точные методы расчета без изменения всей структуры программы.

Алгоритм определения основных параметров двигателя построен на основе методик проектирования тяговых двигателей, приведенных в [1, 2].

Излагается формализация этапов расчета, в процессе которых проектировщик определяет отдельные параметры, используя графическое изображение элементов двигателя. К таким этапам относятся:

- выбор стандартного сечения меди обмотки якоря и определение геометрических размеров паза якоря;
- определение длины средней магнитной линии в остове двигателя;
- определение высоты сердечника добавочного полюса и расстояния между концевиками полюсов.

В § 3.2 рассматривается вопрос о построении вычислительной схемы алгоритма определения магнитных соотношений в слое воздушный зазор-зубцы якоря при холостом ходе и нагрузке двигателя на основе теоретических положений номографического метода [3].

Непосредственная реализация указанного метода на ЭВМ осложняется следующими обстоятельствами.

Во-первых, графически заданные кривые $H_z = H_z(\rho B_o)$, определяющие зависимость средней напряженности магнитного поля в зубце H_z от индукции в его головке B_o , приводятся для строго определенных значений коэффициента ρ , характеризующего клиновидность зубца. В связи с этим, при практическом использовании номограммы необходимо производить вручную построение кривой, соответствующей расчетному значению ρ . Такое построение связано с увеличением погрешности в определении H_z и большой трудоемкостью.

Во-вторых, чтобы непосредственно использовать предложенные кривые номограммы, необходимо все семейство кривых хранить в ЭВМ, что ведет к нерациональному использованию "памяти" машины.

С целью реализации данного метода предлагается формальная процедура построения с помощью ЭВМ единственной кривой $H_z = H_z(\rho B_o)$, соответствующей расчетному значению ρ .

На основании полученной кривой разработана методика определения

потока возбуждения двигателя Φ_b , намагничивающих сил воздушного зазора F_δ и зубца F_z в зависимости от суммарной намагничивающей силы зоны воздушный зазор-зубцы $F_{\delta z}$ и нагрузки двигателя I_a , путем вычисления по длине полюсной дуги θ_p кривых магнитной индукции $B_\delta = B_\delta(x)$, магнитных напряжений в зубце $F_z = F_z(x)$ и в воздушном зазоре $F_\delta = F_\delta(x)$. Полученные кривые используются при определении суммарной намагничивающей силы главного полюса $F_b = F_b(F_{\delta z}, I_a)$ и установлении рабочих характеристик двигателя.

В § 3.3 излагается разработанный алгоритм выбора обмоточных данных катушек полюсов и их размещения в междуполюсном окне двигателя. В процессе расчета двигателя, на этапе выбора обмоточных данных и размещения катушек, предусматривается графическое изображение поперечного сечения магнитной системы двигателя. В результате этой операции определяются размеры свободного пространства, в котором должны быть размещены катушки с учетом способа их крепления и геометрических размеров концевиков полюсов. После проведения этой операции производится выбор высоты и ширины сечений меди проводников, которые должны удовлетворять технологическим требованиям намотки. Получающиеся при этом габариты катушек должны размещаться в заданном пространстве и удовлетворять вентиляционным требованиям.

При заданных числах витков W_r, W_a и сечениях проводников q_r, q_a катушек главного и добавочного полюсов, выбор высоты и ширины сечений, удовлетворяющих указанным требованиям, связан с необходимостью проведения большого числа пробных размещений.

Для решения данной задачи на ЭВМ проводится формализация процессов выбора геометрических размеров сечений проводников и размещения катушек с полученными габаритами.

В основе алгоритмизации процессов лежит итерационная процедура

Центральная Научная Библиотека

выбора высоты и ширины сечений и аналитическое описание конфигурации свободного междупольного пространства в процессе укладки заданных витков катушек.

Алгоритм определения основных и добавочных потерь, а также температур $\Theta_c(Z_N, Y, I_{\infty N})$ построен на основе известного метода теплового расчета двигателя в длительном режиме [2].

В четвертой главе выполнена экспериментальная проверка разработанного алгоритма оптимального проектирования тягового двигателя на нижнем уровне путем моделирования процесса оптимизации на ЭВМ.

На основе принятых алгоритмов расчета двигателя и алгоритма поиска максимума целевой функции на нижнем уровне, в § 4.1 производится формирование подмножеств Z и Y . С этой целью решается экстремальная задача, сводящаяся к отысканию в допустимой области точки $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, для которой

$$I_{\infty}^k(X^0) = \max_{X \in D} I_{\infty}(X/x_i^k = \text{const}), \quad (i = \overline{1, n}; k = \overline{1, p}).$$

В результате решения каждой k -ой задачи определяются также значения скорости вращения n^k и к.п.д. η^k двигателя в режимах полного и минимального поля возбуждения и заданных нагрузках двигателя. Аппроксимируя полученные значения $I_{\infty}^k, n^k, \eta^k$, получим экстремальные кривые, позволяющие судить о принадлежности x_i переменной к подмножеству Z или Y . Критерием исключения переменной x_i из общей совокупности X является относительное отклонение тягового усилия двигателя δF^k от заданного при вышеуказанных режимах работы. В случае, если δF^k превышает заданный порог δF , переменная x_i включается в подмножество Y , в противном случае $x_i \in Z$.

В § 4.2 рассматривается вопрос о выборе значений скорости вращения n_{∞} и ослабления поля возбуждения α_{∞} , характеризующих длительный режим работы двигателя, необходимых для определения

потока возбуждения Φ_{∞} .

В соответствии с вычисленными на верхнем уровне значениями гребных токов обмоток якоря I_{ar} и главного полюса I_{rr} , обеспечивающими маршрутную скорость электропоезда V_M , определяется $\alpha_{\infty} = \alpha_{\infty}(I_{ra}, I_{rr})$ и $n_{\infty} = n_{\infty}(V_M)$ длительного режима работы двигателя. Получены кривые $\max I_{\infty}(\alpha_{\infty}, n_{\infty})$, показывающие, что оптимум критерия в значительной степени зависит от значений $\alpha_{\infty}, n_{\infty}$.

Излагается разработанная методика определения магнитного потока Φ_{∞} , необходимого для вычисления потерь в двигателе при длительном режиме работы. Для заданных α_{∞} и I_{∞} вычисляется значение F_{∞} и соответствующее ему $F_{\delta z \infty}$ по кривой $F_{\delta} = F_{\delta}(F_{\delta z}, I_a)$. В результате реализации алгоритма определения магнитных соотношений в активном слое якоря для найденного $F_{\delta z \infty}$ и заданного I_{∞} определяется кривая $B_{\delta \infty} = B_{\delta \infty}(x)$. Значение Φ_{∞} вычисляется путем численного интегрирования функции $B_{\delta \infty}(x)$.

С целью уменьшения общего времени решения двухкритериальной задачи оптимизации двигателя, в § 4.3 рассматривается вопрос о выборе основных параметров алгоритма поиска.

В качестве оценки быстродействия поиска, в зависимости от длины рабочего шага, принимается изменение среднего значения приращения целевой функции $\Delta I_{\infty \text{ ср}}$ за один рабочий шаг. Приводятся результаты многократного моделирования процесса оптимизации при различных значениях длины рабочего шага и скорости обучения, на основе которых определены параметры алгоритма поиска, обеспечивающие наименьшее время решения задачи.

В § 4.4 излагаются результаты экспериментальной проверки разработанного комплекса алгоритмов, полученные путем моделирования на машине "БЭСМ-4" процесса оптимизации тяговых двигателей типа РТ-113 и РТ-117. Исходные данные для расчета вариантов представ-

выбора высоты и ширины сечений и аналитическое описание конфигурации свободного междуполюсного пространства в процессе укладки заданных витков катушек.

Алгоритм определения основных и добавочных потерь, а также температур $\theta_c(Z_N, Y, I_{\infty N})$ построен на основе известного метода теплового расчета двигателя в длительном режиме [2].

В четвертой главе выполнена экспериментальная проверка разработанного алгоритма оптимального проектирования тягового двигателя на нижнем уровне путем моделирования процесса оптимизации на ЭВМ.

На основе принятых алгоритмов расчета двигателя и алгоритма поиска максимума целевой функции на нижнем уровне, в § 4.1 производится формирование подмножеств Z и Y . С этой целью решается экстремальная задача, сводящаяся к отысканию в допустимой области точки $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, для которой

$$I_{\infty}^k(X^0) = \max_{X \in D} I_{\infty}^k(X/x_i^k = \text{const}), \quad (i = 1, \bar{n}; k = 1, \bar{p}).$$

В результате решения каждой k -ой задачи определяются также значения скорости вращения n^k и к.п.д. η^k двигателя в режимах полного и минимального поля возбуждения и заданных нагрузках двигателя. Аппроксимируя полученные значения $I_{\infty}^k, n^k, \eta^k$, получим экстремальные кривые, позволяющие судить о принадлежности x_i переменной к подмножеству Z или Y . Критерием исключения переменной x_i из общей совокупности X является относительное отклонение тягового усилия двигателя δF^k от заданного при вышеуказанных режимах работы. В случае, если δF^k превышает заданный порог δF , переменная x_i включается в подмножество Y , в противном случае $x_i \in Z$.

В § 4.2 рассматривается вопрос о выборе значений скорости вращения n_{∞} и ослабления поля возбуждения α_{∞} , характеризующих длительный режим работы двигателя, необходимых для определения

потока возбуждения ϕ_{∞} .

В соответствии с вычисленными на верхнем уровне значениями гребных токов обмоток якоря I_{ar} и главного полюса I_{rr} , обеспечивающими маршрутную скорость электропоезда V_M , определяется $\alpha_{\infty} = \alpha_{\infty}(I_{ra}, I_{rr})$ и $n_{\infty} = n_{\infty}(V_M)$ длительного режима работы двигателя. Получены кривые $\max I_{\infty}(\alpha_{\infty}, n_{\infty})$, показывающие, что optimum критерия в значительной степени зависит от значений $\alpha_{\infty}, n_{\infty}$.

Излагается разработанная методика определения магнитного потока ϕ_{∞} , необходимого для вычисления потерь в двигателе при длительном режиме работы. Для заданных α_{∞} и I_{∞} вычисляется значение F_{∞} и соответствующее ему $F_{\delta z \infty}$ по кривой $F_{\delta} = F_{\delta}(F_{\delta z}, I_a)$. В результате реализации алгоритма определения магнитных соотношений в активном слое якоря для найденного $F_{\delta z \infty}$ и заданного I_{∞} определяется кривая $B_{\delta \infty} = B_{\delta \infty}(x)$. Значение ϕ_{∞} вычисляется путем численного интегрирования функции $B_{\delta \infty}(x)$.

С целью уменьшения общего времени решения двухкритериальной задачи оптимизации двигателя, в § 4.3 рассматривается вопрос о выборе основных параметров алгоритма поиска.

В качестве оценки быстродействия поиска, в зависимости от длины рабочего шага, принимается изменение среднего значения приращения целевой функции $\Delta I_{\infty \text{ ср}}$ за один рабочий шаг. Приводятся результаты многократного моделирования процесса оптимизации при различных значениях длины рабочего шага и скорости обучения, на основе которых определены параметры алгоритма поиска, обеспечивающие наименьшее время решения задачи.

В § 4.4 излагаются результаты экспериментальной проверки разработанного комплекса алгоритмов, полученные путем моделирования на машине "БЭСМ-4" процесса оптимизации тяговых двигателей типа РТ-113 и РТ-117. Исходные данные для расчета вариантов представ-

лены в приложении 1.

Полученные в результате расчета на ЭМ конструктивные параметры и параметры процессов исходных вариантов совпадают с параметрами эксплуатируемых двигателей, что подтверждает достоверность разработанных алгоритмов. Результаты расчета исходных вариантов представлены в приложении 2.

С целью определения интегрального влияния вариаций параметров Z в процессе оптимизации на поведение рабочих характеристик двигателя, заданных верхним уровнем, производится расчет скоростной, к.п.д. и тяговой характеристик оптимального варианта, которые представлены в приложении 3.

В приложении 4 приводятся значения относительных отклонений скорости δn , к.п.д. $\delta \eta$ и тяги δF оптимального варианта от заданных значений верхнего уровня. Полученные отклонения не превышают 1% во всем диапазоне изменения нагрузки I_a и ослабления поля возбуждения двигателя α , что подтверждает правомочность принятого метода формирования подмножеств Z и Y и процедуры взаимодействия уровней оптимизации.

В результате проведенной оптимизации на нижнем уровне, значение максимально допустимой нагрузки в длительном режиме возросло на 9,7% для РТ-113 и на 4,6% для РТ-117, что в свою очередь ведет к соответствующему увеличению использования расчетной мощности двигателей P_{42c} в эксплуатации.

Значения параметров длительного режима работы двигателей приняты следующие: $n_{\infty} = 780 \frac{об}{мин}$, $\alpha_{\infty} = 0,5$. Сравнительные данные исходного и оптимального вариантов двигателей приведены в приложении 5.

Рассмотрение промежуточных результатов процесса оптимизации показывает, что допустимость повышенных значений нагрузки двигателя в длительном режиме в основном обеспечивается целенаправлен-

ным изменением сечений проводников обмоток, ведущим к выравниванию превышений температур узлов двигателя. Окончание процесса оптимизации для двигателя РТ-117 обусловлено наступлением ограничений на размещение полученных габаритов катушек, а для варианта РТ-113 - достижением заданной ϵ - окрестности максимума $I_{\infty}(Z, Y)$.

Общее время оптимизации составляет 1,3 часа.

Разработанные алгоритмы технического расчета двигателя на ЭМ и результаты оптимизации использованы при создании комплексной программы определения оптимальных тягово-энергетических параметров электропоезда ЭР-22 на Рижском ордена Ленина электромашиностроительном заводе.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенной декомпозиции общей совокупности независимых переменных, определяющих критерии оптимальности тягового двигателя, предложена методика двухкритериальной оптимизации тягового двигателя, наиболее полно отвечающего требованиям эксплуатации электропоезда в заданных условиях.
2. Проведено обоснование выбора максимума допустимой по нагреву электрической нагрузки двигателя в качестве второго критерия оптимальности, обеспечивающего повышенную работоспособность двигателя в оптимальном режиме эксплуатации электропоезда.
3. Разработан и программно реализован на машине "БЭСМ-4" комплекс алгоритмов, позволяющий автоматизировать технический расчет тягового двигателя постоянного тока, что в свою очередь обеспечивает необходимые условия для построения комплексной модели выбора оптимального варианта тягового электропривода и проведения исследований влияния различных факторов и параметров на поведение выходных показателей и характеристик электропривода.

лены в приложении 1.

Полученные в результате расчета на ЭВМ конструктивные параметры и параметры процессов исходных вариантов совпадают с параметрами эксплуатируемых двигателей, что подтверждает достоверность разработанных алгоритмов. Результаты расчета исходных вариантов представлены в приложении 2.

С целью определения интегрального влияния вариаций параметров Z в процессе оптимизации на поведение рабочих характеристик двигателя, заданных верхним уровнем, производится расчет скоростной, к.п.д. и тяговой характеристик оптимального варианта, которые представлены в приложении 3.

В приложении 4 приводятся значения относительных отклонений скорости δv , к.п.д. $\delta \eta$ и тяги δF оптимального варианта от заданных значений верхнего уровня. Полученные отклонения не превышают 1% во всем диапазоне изменения нагрузки I_a и ослабления поля возбуждения двигателя α , что подтверждает правомочность принятого метода формирования подмножеств Z и Y и процедуры взаимодействия уровней оптимизации.

В результате проведенной оптимизации на нижнем уровне, значение максимально допустимой нагрузки в длительном режиме возросло на 9,7% для РТ-113 и на 4,6% для РТ-117, что в свою очередь ведет к соответствующему увеличению использования расчетной мощности двигателей P_{41c} в эксплуатации.

Значения параметров длительного режима работы двигателей приняты следующие: $n_{\infty} = 780 \frac{об}{мин}$, $\alpha_{\infty} = 0,5$. Сравнительные данные исходного и оптимального вариантов двигателей приведены в приложении 5.

Рассмотрение промежуточных результатов процесса оптимизации показывает, что допустимость повышенных значений нагрузки двигателя в длительном режиме в основном обеспечивается целенаправлен-

ным изменением сечений проводников обмоток, ведущим к выравниванию превышений температур узлов двигателя. Окончание процесса оптимизации для двигателя РТ-117 обусловлено наступлением ограничений на размещение полученных габаритов катушек, а для варианта РТ-113 - достижением заданной ϵ - окрестности максимума $I_{\infty}(Z, Y)$.

Общее время оптимизации составляет 1,3 часа.

Разработанные алгоритмы технического расчета двигателя на ЭВМ и результаты оптимизации использованы при создании комплексной программы определения оптимальных тягово-энергетических параметров электропоезда ЭР-22 на Рижском ордена Ленина электромашиностроительном заводе.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведенной декомпозиции общей совокупности независимых переменных, определяющих критерии оптимальности тягового двигателя, предложена методика двухкритериальной оптимизации тягового двигателя, наиболее полно отвечающего требованиям эксплуатации электропоезда в заданных условиях.
2. Проведено обоснование выбора максимума допустимой по нагреву электрической нагрузки двигателя в качестве второго критерия оптимальности, обеспечивающего повышенную работоспособность двигателя в оптимальном режиме эксплуатации электропоезда.
3. Разработан и программно реализован на машине "БЭСМ-4" комплекс алгоритмов, позволяющий автоматизировать технический расчет тягового двигателя постоянного тока, что в свою очередь обеспечивает необходимые условия для построения комплексной модели выбора оптимального варианта тягового электропривода и проведения исследований влияния различных факторов и параметров на поведение выходных показателей и характеристик электропривода.

4. Создана модель, автоматизирующая процессы выбора обмоточных данных катушек полюсов и размещения катушек в междуполюсном окне при проектировании двигателя постоянного тока с использованием ЭМ.

5. Формализован процесс построения кривой намагничивания стали зубца с заданной клиновидностью, что позволило реализовать на ЭМ универсальный номографический метод определения магнитных соотношений в активном слое якоря тягового двигателя.

6. На базе ЭМ "БЭСМ-4" и разработанного комплекса алгоритмов решена задача оптимизации тяговых двигателей РТ-113 и РТ-117 по критерию максимума допустимой по нагреву длительной электрической нагрузки при заданных рабочих характеристиках и параметрах длительного режима работы двигателя.

При этом получены следующие основные результаты:

а) значение используемой мощности двигателей в длительном режиме работы возросло на 5-10% по сравнению со значением мощности, используемой в существующих режимах эксплуатации электропоезда ЭР-22;

б) превышения температур обмоток главного и добавочного полюсов уменьшаются на 8-15⁰С по сравнению с существующими превышениями, что способствует снижению интенсивности износных отказов и увеличению срока службы изоляции обмоток возбуждения двигателей.

7. На основе результатов многократного моделирования процесса оптимизации определены основные параметры алгоритма поиска, обеспечивающие наименьшее время решения задачи и получены кривые, отражающие характер зависимости критерия оптимальности от скорости вращения и ослабления поля возбуждения в длительном режиме работы двигателя.

8. Произведен анализ влияния совокупности независимых переменных нижнего уровня на поведение рабочих характеристик двигателя, заданных верхним уровнем оптимизации.

Получены оценки частного и интегрального влияния вариаций переменных, подтверждающие правомочность принятого способа декомпозиции переменных и методики двухкритериальной оптимизации тягового двигателя.

Основные результаты работы доложены на II Всесоюзной конференции по аналого-цифровой вычислительной технике (апрель, 1966г., Москва), на Всесоюзной научно-технической конференции по автоматизации технической подготовки производства в машиностроении (апрель, 1968г., Минск), на II Всесоюзной научно-технической конференции "Применение ЭМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов" (октябрь, 1968г., Рига), на III Всесоюзной научно-технической конференции "Применение ЭМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов" (октябрь, 1969, Рига), на IV симпозиуме по экстремальным задачам (июнь, 1969г., Каунас).

По теме диссертации опубликованы следующие работы.

1. Г.Г. ГРОМОВ, В.В. ПИРОГОВ. Конструктивный расчет на ЭЦМ тягового электродвигателя электропоездов. В сб. Автоматика и вычислительная техника, вып. 12, изд-во "Зинатне", Рига, 1966г.
2. Г.Г. ГРОМОВ. Использование цифро-аналогового комплекса для вывода графической информации на электроннолучевую трубку. Автоматика и вычислительная техника, изд-во "Зинатне", Рига, № 1, 1967г.
3. Г.Г. ГРОМОВ. Алгоритмы размещения катушек главного и добавочного полюсов при расчете тягового электродвигателя на ЭЦМ, в сб. Применение ЭМ для проектирования электропоездов, изд-во "Зинатне", Рига, 1968г.

4. Б.А. КИТАЙЧИК, Г.Г. ГРСМОЗ. Использование номографического метода для расчета на ЭЦМ магнитных характеристик тягового электродвигателя постоянного тока, ИВУЗ, "Электромеханика", № 6, 1970г.
5. Г.Г. ГРСМОЗ. Применение метода случайного поиска с обучением при оптимальном проектировании тягового электродвигателя, в сб. Применение ЭМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов, изд-во "Зинатне", Рига, 1970г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. АЛЕКСЕЕВ А.Е. Тяговые электродвигатели, ГЭИ, М., 1951.
2. ИОРДЕ А.Б. Тяговые электрические машины, Энергия, М.Л., 1965.
3. БЕНЕДИКТ О.З. Номографический метод расчета сильно насыщенных магнитных цепей электрических машин, ГЭИ, 1953.
4. ГЕРМЕЙЕР Ю.Б. Игровые концепции в исследовании систем, Известия АН СССР, Техническая кибернетика, № 2, 1970.
5. ВОЛКОЗИЧ В.Л. Многокритериальные задачи и методы их решения. Сб. Сложные системы управления, изд-во "Наукова думка", вып. I, 1969.
6. СРЕБНИЙ В.Л. Автоматизированная система расчета на ЭМ рациональных конструктивных параметров и характеристик тягового электропривода пригородных электропоездов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 1971.
7. РАСТРИГИН Л.А. Статистические методы поиска, изд-во "Наука", М. 1968.
8. КИРИН Н.Е. Вычислительные методы теории оптимального управления, изд-во Ленинградского университета, 1968.