

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

---

*На правах рукописи*

Ш. Ш. Хамитов

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ СЛЕДЯЩЕГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Научный руководитель — доктор технических наук  
М. В. Мееров

Москва — 1959 г.

Неуклонное повышение производительности труда является одним из основных факторов роста промышленного производства. В свою очередь, непременным условием повышения производительности труда является обеспечение наиболее рациональных режимов работы производственных машин.

В связи с этим первостепенное значение имеет исследование законов движения производственных машин с целью определения наиболее рациональных из них при учете ограничений, наложенных на параметры и координаты элементов машины. Электрический привод производственных машин получил весьма широкое распространение. В частности, двигатель постоянного тока, благодаря простоте управления и хорошим регулировочным свойствам, нашел широкое применение во многих отраслях промышленности для привода механизмов с циклическим режимом работы. В качестве примера можно указать на главный привод и привод вспомогательных механизмов прокатных станов, на привод крупных экскаваторов, подъемных кранов и многое другое.

По мере все большего распространения электропривода постоянного тока тем настоятельней становится необходимость наиболее эффективного использования установленных двигателей с целью повышения производительности и улучшения качественных показателей работы. А это предполагает, во-первых, определение оптимальных (например, с точки зрения минимума времени или потребления энергии) переходных режимов электропривода, и во-вторых, — построение системы автоматического управления электроприводом, обеспечивающей оптимальный режим работы последнего. Быстродействие системы электропривода в переходных режимах ограничивается мощностью двигателя, а мощность двигателя лимитируется в первую очередь величиной допустимой температуры нагрева его обмоток. Другими словами, нагрев обмоток двигателя ставит предел увеличению быстродействия в переходных режимах. Очевидно, что существует оптимальный закон движения электропривода в переходных режимах, обеспечивающий максимально возможное быстродействие при полном использовании обмоток двигателя по нагреву.

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

192365

Кроме нагрева могут быть ограничены по тем или иным соображениям и другие параметры или координаты системы. Так, например, ограничена максимально допустимая скорость двигателя, ограничены по условиям коммутации максимальная величина тока якоря и величина управляющего напряжения, приложенного к якорю. Естественно, эти ограничения, наряду с ограничением нагрева, должны учитываться при отыскании оптимального закона движения электропривода. Настоящая работа ставит своей целью определение оптимальных переходных процессов следящего электропривода постоянного тока и построение системы автоматического управления электроприводом, обеспечивающей оптимальный режим его работы.

В связи с этим работа делится на две части.

Первая часть, состоящая из трех глав, посвящена исследованию двигателя постоянного тока как объекта оптимальной системы регулирования (применительно к системе следящего электропривода, имеющего циклический режим работы).

Во второй части, состоящей из трех глав, рассматриваются вопросы построения систем позиционного следящего электропривода, обеспечивающих оптимальную прямолинейную диаграмму тока якоря при неизменном токе возбуждения, и приведены результаты экспериментального исследования.

В вводной части, наряду с постановкой задачи, дается краткий обзор литературы, посвященной исследованию оптимальных в том или ином смысле переходных процессов в системах автоматического регулирования (с.а.р.) и построению оптимальных с.а.р.

В работах А. Я. Лернера, А. А. Фельдбаума и других авторов рассмотрены вопросы о форме кратчайшего переходного процесса в случае ограничения какой-либо производной или нескольких производных регулируемой величины, в случае ограничения входного воздействия и даны методы синтеза оптимальных по быстрдействию с.а.р. В наиболее общей математической постановке теория оптимальных по быстрдействию процессов рассматривается в работах Л. С. Понтрягина и его учеников.

В отдельную группу можно выделить работы К. И. Кожевникова, Е. А. Розенмана, Л. В. Карнюшина и Ю. П. Петрова по исследованию оптимальных процессов в с.а.р. как с учетом только лишь ограниченности мощности исполнительного двигателя, так и с дополнительным учетом ограничений координат системы и различных законов изменения нагрузки. Эти работы по характеру рассматриваемых вопросов особенно близки к содержанию реферлируемой диссертации. К. И. Кожевников и Е. А. Розенман, пользуясь методами вариационного исчисления, показали, что оптимальной по быстрдействию диаграм-

мой тока якоря двигателя постоянного тока при работе в повторно-кратковременном режиме является прямолинейная диаграмма тока. Этот результат опровергал как ошибочное, укоренившееся у проектировщиков и наладчиков стремление обеспечить прямоугольную диаграмму тока с коэффициентом заполнения, равным единице. Следует отметить, что в упомянутой выше группе работ главным образом рассматривались вопросы по определению оптимальных процессов, вопросы же их осуществления или вовсе не рассматривались, или только производилась сравнительная оценка существующих систем управления с точки зрения близости обеспечиваемых ими переходных процессов к оптимальным.

В первой главе рассматриваются различные аспекты вариационной задачи по определению оптимальной диаграммы тока якоря двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, и показывается их тождественность.

Рассмотрим какой-либо цикл включения на участке с установившимся тепловым режимом при работе двигателя в повторно-кратковременном режиме. Время цикла включения  $\tau_p$  состоит из времени работы  $\tau_r$  и паузы. Потери энергии в омическом сопротивлении цепи якоря и превышение температуры обмотки якоря к концу периода работы при пренебрежении теплоотдачей обмотки определяются интегралом (здесь и далее все величины выражены в относительных единицах)

$$\int_0^{\tau_p} i^2 d\tau, \quad (1)$$

где  $i$  — ток якоря. Величина угла  $\alpha_p$ , отработанного за цикл включения, изменение скорости  $v$  за время  $\tau_p$  и уравнение динамики запишутся в виде

$$\alpha_p = \int_0^{\tau_p} v d\tau \quad (2), \quad \int_0^{\tau_p} v' d\tau = 0 \quad (3) \quad \text{и} \quad v' = i(\tau) - i_c(\tau), \quad (4),$$

где  $i_c(\tau)$  — ток статической нагрузки. Поскольку допустимая температура нагрева обмотки якоря ограничена, задача определения оптимальной диаграммы тока якоря формулируется следующим образом: найти закон изменения тока якоря  $i(\tau)$ , минимизирующий функционал (1) при выполнении условий связи (2) — (4). Решением этой задачи является прямолинейная диаграмма тока. Диаграмма тока, минимизирующая нагрев обмотки якоря при отработке заданного угла за фиксированное время, обеспечит максимальное быстрдействие при отработке заданного угла по сравнению с любой другой диаграммой, вызывающей равный нагрев. Действительно, если в формулировке прежней задачи поменять местами функционал (1) и условие связи (2), то задача будет заключаться в

отыскании диаграммы тока (или скорости), обеспечивающей экстремальное (максимальное) значение функционалу (2) при условиях связи (1), (3) и (4). Как известно, на основании принципа взаимности экстремаль при такой замене остается без изменения. А диаграмма тока, обеспечивающая максимум угла отработки за фиксированное время при заданном превышении температуры, является оптимальной в смысле быстрогодействия, так как она, естественно, обеспечит минимальное время отработки заданного угла при заданном превышении температуры.

Далее, при неизменном токе возбуждения, определяется оптимальная диаграмма тока якоря с учетом теплоотдачи обмотки якоря и тока статической нагрузки, являющегося произвольной функцией времени. В этом случае задача заключается в определении диаграммы тока  $j(\tau)$  ( $j$  — динамическая составляющая тока якоря), минимизирующей функционал

$$\int_0^{\tau_p} (2i_c j + j^2) e^{a\tau} d\tau, \quad (5)$$

где  $a = \frac{B_n}{T}$ ,  $B_n = \frac{GD^2 n_n}{375 m_n}$  — электромеханическая постоянная

привода,  $n_n$  и  $m_n$  — номинальные число оборотов и момент,  $T$  — постоянная времени нагрева обмотки якоря, при условиях связи (2) — (4). В результате решения получена оптимальная диаграмма тока якоря (постоянные интегрирования определялись из граничных условий  $v(0) = v(\tau_p) = 0$ )

$$i = i_c + j = -\frac{\lambda_1}{2a} e^{-a\tau} \left( 1 - a\tau + \frac{a\tau_p}{1 - e^{a\tau_p}} \right) - \frac{a\tau_p \cdot i_{cp}}{e^{-a\tau_p} - 1} e^{-a\tau}, \quad (6)$$

где  $\lambda_1$  — постоянный множитель Лагранжа, определяемый из условия (2);  $i_{cp}$  — среднее значение тока нагрузки. При  $a \rightarrow 0$  что соответствует пренебрежению теплоотдачей обмотки якоря, формула (6) дает в пределе прямолинейную оптимальную диаграмму

$$i = i_c + j = i_{cp} + j_0 \left( 1 - \frac{2\tau}{\tau_p} \right), \quad (7)$$

где  $j_0 = -\frac{\lambda_1 \tau_p}{4}$  — максимальный динамический ток. Как вид-

но из формул (6) и (7) оптимальная диаграмма тока как при учете теплоотдачи, так и при пренебрежении ею не зависит от закона изменения во времени тока статической нагрузки. В частности, в случае пренебрежения теплоотдачей, как это следует из формулы (7), оптимальная диаграмма тока, независимо от закона изменения  $i_c(\tau)$  всегда будет прямолинейной. Как показывает анализ формулы (6), при постоянных времени

нагрева  $T$ , значительно больших времени работы  $t_p$ , что и имеет место в реальных системах следящего электропривода, отличие диаграммы (6) от прямолинейной будет весьма незначительным.

Кроме того, в первой главе рассмотрено влияние ограничения скорости двигателя на нагрев обмотки якоря и на производительность для случаев работы с линейной и параболической диаграммами скорости. Даны формулы для подсчета потери производительности при фиксированном нагреве и увеличении нагрева при заданной производительности в зависимости от величины ограничения максимальной скорости.

Во второй главе ставится и разрешается задача по определению оптимальных соотношений между токами якоря и возбуждения при их одновременном изменении как для систем позиционного следящего электропривода, предназначенных для отработки определенных перемещений, так и для систем разгонного электропривода, основным назначением которых является разгон системы до заданной величины скорости.

Так как энергия подводится к двигателю как со стороны якоря, так и со стороны возбуждения и момент двигателя пропорционален произведению токов якоря и возбуждения (при пренебрежении насыщением), то вполне очевидно, что, если закон изменения одного из токов, якоря или возбуждения, известен, то должен существовать один вполне определенный закон изменения второго тока, который в паре с известным первым током обеспечит быстроедействие большее, чем любой другой закон второго тока при равном нагреве. Примером тому служит прямолинейная диаграмма тока якоря при неизменном токе возбуждения. Кроме того, очевидно, существует пара токов, обеспечивающая предельно возможное при заданном превышении температуры быстроедействие. Если закон изменения одного из токов, например, тока возбуждения  $i_a(\tau)$  задан в виде произвольной гладкой функции, то оптимальная по быстроедействию диаграмма тока якоря, независимо от закона изменения во времени момента статической нагрузки  $m_c(\tau)$ , найдется из соотношения

$$i(\tau) = \left( \frac{\lambda_1}{2} \tau + C \right) i_a(\tau), \quad (8)$$

где  $\lambda_1$  — постоянный множитель Лагранжа,  $C$  — постоянная интегрирования. При  $i_a = \text{Const}$  для  $i(\tau)$  получим согласно (8) прямолинейный закон изменения.

При осуществлении процессов желаемой формы посредством применения нелинейных обратных связей (метод, предложенный А. Я. Лернером) при синтезе управляющей части си-

стемы используются соотношения между координатами системы в оптимальном режиме. Поэтому представляет интерес найти оптимальное соотношение между токами якоря и возбуждения для случая, когда экстремали токов ищутся среди класса функций, позволяющих выразить скорость как некоторую функцию токов, т. е. когда  $v = v(i, i_a, C)$ . Это тем более важно, что не при любых законах изменения тока возбуждения  $i_a(\tau)$ , если считать его известным, и момента нагрузки  $\mu_c(\tau)$  можно найти оптимальное соотношение между скоростью  $v$  и током якоря  $i$ , которое можно было бы использовать при осуществлении оптимального процесса. Если же законы изменения  $i_a(\tau)$  и  $\mu_c(\tau)$  не известны, то и вовсе нельзя найти оптимальное соотношение между  $v$  и  $i$ . Если, например, закон изменения тока возбуждения  $i_a(\tau)$  считать известным и искать ток  $j(\tau)$  (при  $\mu_c = 0$ ) среди функций, позволяющих представить скорость в виде  $v = v(j, i_a, C)$ , то оптимальное по быстродействию соотношение между токами и соотношение  $v = v(j, i_a, C)$  будет иметь вид

$$j' = -\frac{\lambda_1}{2} i_a \quad (9) \quad \text{и} \quad v = -\frac{j^2}{\lambda_1} + C. \quad (10)$$

Как видно из (9), оптимальная диаграмма искомого тока находится интегрированием графика заданного тока.

Как показывают примеры расчета, по мере увеличения бросков токов  $j$  и  $i_a$ , находящихся в оптимальном соотношении (9), увеличивается также и быстродействие при условии равного нагрева. Е. А. Розенман показал, что максимальное быстродействие при фиксированном нагреве получается, когда токи  $j$  и  $i_a$  представляют собой импульсивные функции, приложенные в моменты времени  $0$  и  $\tau_p$ , причем полярности токов в одной из точек должны быть различными. При учете нагрузки  $\mu_c(\tau)$  можно получить соотношения, аналогичные (9) и (10).

В некоторых технических задачах может стоять требование скорейшего достижения заданной величины скорости при учете ограниченности допустимой температуры нагрева обмоток двигателя. Это имеет место в так называемых разгонных системах электропривода. В этом случае закон изменения токов якоря и возбуждения должен быть один и тот же, причем любые возможные законы изменения при условии равного нагрева оказываются равносильными, так как величина изменения скорости в относительных единицах определяется величиной потерь в обмотках двигателя за время разгона.

При учете насыщения магнитопровода оптимальные диаграммы токов, обеспечивающие предельно возможное быстро-

действие, могут быть найдены только при той или иной аппроксимации кривой намагничивания  $f = f(i_a)$  из следующих уравнений:

$$\frac{1}{(\lambda_1 \tau + C)^2} = \frac{f}{i_a} \frac{df}{di_a} \quad \text{и} \quad i = (\lambda_1 \tau + C)f, \quad (11)$$

где  $f$  — поток двигателя (реакцию якоря, как и прежде, считаем скомпенсированной). Как указывалось выше, при  $f = i_a$ , что соответствует пренебрежению насыщением, максимальное быстродействие обеспечивается импульсивными функциями токов. При учете же насыщения также существует пара токов, обеспечивающая предельно возможное быстродействие, но она будет отлична от импульсивных функций и будет, при выбранной аппроксимации кривой  $f = f(i_a)$ , определяться уравнениями (11) и заданными граничными условиями.

В третьей главе рассматривается вопрос о потреблении энергии в переходных режимах. Уравнение баланса мощности для исполнительного двигателя постоянного тока, учитывающее основные составляющие общего потребления мощности (энергии) в относительных единицах для случая  $i_a = \text{Const}$  имеет вид

$$p = i^2 + \frac{1}{T_1} \frac{d}{d\tau} (v^2) + \frac{1}{T_1} v i_c, \quad (12)$$

где первый член правой части представляет потери мощности в омическом сопротивлении якоря, второй — мощность, расходуемую на изменение кинетической энергии, третий — мощность полезной нагрузки и  $p$  — мощность, подведенную к якорю двигателя. В главе I при определении оптимальной диаграммы тока учитывалась только одна из составляющих общего количества потребленной энергии — потери в омическом сопротивлении якоря. Аналогично тому, как определялась диаграмма тока якоря, вызывающая минимальный нагрев, может быть определена и диаграмма тока (скорости), обеспечивающая минимум расхода энергии при отработке заданного угла или при разгоне до заданной скорости (при фиксированном времени). Возможна и другая, равнозначная первой, постановка задачи: обеспечить минимум времени отработки заданного угла или разгона до заданной скорости при фиксированном значении подлежащей расходованию энергии. В диссертации получены оптимальные законы движения для позиционных и разгонных систем следящего электропривода для случаев, когда момент нагрузки  $\mu_c$  является произвольной функцией времени, скорости или угла, причем при  $\mu_c = \mu_c(v)$  и  $\mu_c = \mu_c(\alpha)$  подробно исследова-

ны случаи линейной зависимости момента нагрузки от скорости и угла. Проведенное исследование показало, что оптимальные с точки зрения минимума потребления энергии законы движения существенно зависят от закона изменения момента нагрузки, в том числе и в случае  $\mu_c = \mu_c(\tau)$ .

В четвертой главе решается задача синтеза оптимальной по быстрдействию при ограниченном нагреве системы с объектом второго порядка, под которым имеется в виду двигатель постоянного тока. Задача заключается в построении управляющей части системы, которая обеспечила бы при отработке заданного угла оптимальную прямолинейную диаграмму тока и, соответственно, параболический график скорости. Закон изменения напряжения на зажимах якоря можно получить непосредственно из уравнения двигателя, зная оптимальные диаграммы тока и скорости (для простоты считаем  $\mu_c = 0$ )

$$u = \frac{1}{K_1} (T_1 j + v),$$

где  $K_1$  и  $T_1$  — коэффициент усиления и постоянная времени двигателя,  $u$  — напряжение на зажимах якоря. В отличие от оптимальной по быстрдействию системы второго порядка с ограниченным входным воздействием  $|u| \leq M$  где для получения оптимального процесса входное воздействие в любой момент времени должно поддерживаться по модулю на предельном уровне, для осуществления оптимального процесса с учетом ограниченности мощности двигателя нужно обеспечить изменение управляющего воздействия по вполне определенному закону. Как известно из теории электропривода, при работе двигателя в повторно-кратковременном режиме, когда граничные условия по скорости заданы в виде  $v(0) = v(\tau_p) = 0$ , потери в омическом сопротивлении якоря будут тем меньше, чем медленнее отрабатывается угол, и в пределе минимум потерь будет при  $\tau_p \rightarrow \infty$ . Если для случая, когда при отработке заданного угла необходимо минимизировать потери в омическом сопротивлении якоря, синтезировать систему (синтез системы считается осуществленным, если управляющее воздействие удастся представить как функцию координат системы) на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина, то для оптимального управления получим

$$u = \frac{v}{K_1} \left( 1 - \frac{2 T_1}{3} \frac{v}{\varepsilon} \right), \quad (13)$$

где  $\varepsilon = \alpha_p - \alpha$  — ошибка,  $v$  — скорость. Система с управлением (13) не будет работоспособна в повторно-кратковременном

режиме, так как в этом случае граничные условия по скорости заданы в виде  $v(0) = v(\tau_p) = 0$  и потому она не сможет «стронуться с места». Управление (13) является как бы предельным выражением того условия, что минимум потерь в якоре будет при  $\tau_p \rightarrow \infty$ . Отсюда мы приходим к выводу, что оптимальное управление нельзя осуществить, если время работы  $\tau_p$  не фиксировано. Однако, работа с фиксированным временем не всегда допустима, так как в зависимости от начального значения ошибки  $\varepsilon(0) = \alpha_p$  броски тока оптимальной прямолинейной диаграммы тока могут превысить допустимое по коммутации значение. Поэтому более целесообразно фиксировать бросок тока в начальный момент, тогда время работы  $\tau_p$  определится автоматически в зависимости от  $\varepsilon(0) = \alpha_p$ . В диссертации осуществлен синтез оптимального управления как при фиксированном броске тока  $j_0$ , так и при фиксированном времени  $\tau_p$ . Какую бы из упомянутых выше структур мы ни использовали для осуществления оптимального переходного процесса, при подходе к положению равновесия ее необходимо переключить на структуру для отработки малых рассогласований для того, чтобы удерживать систему в равновесии. Необходимость такого переключения объясняется тем, что структуры, призванные обеспечить оптимальную диаграмму тока, не могут при подходе к положению равновесия скачком уменьшить управляющее воздействие до нуля.

Пятая глава посвящена вопросам приближенного осуществления прямолинейной диаграммы тока в системах высокого порядка. На примере системы третьего порядка (генератор-двигатель) с ограниченным управляющим воздействием  $|u| \leq M$  предварительно показывается на основе принципа максимума, что для получения оптимального процесса, минимизирующего омические потери в якоре двигателя, управляющее воздействие должно изменяться по закону  $u = M \cdot \text{Sign } \psi_3$ , где  $\psi_3$  — вспомогательная функция. Однако, до настоящего времени нет инженерного метода, позволяющего довести до конца точное решение задачи синтеза схемы, обеспечивающей оптимальное переключение управляющего воздействия в системах третьего и более высокого порядков. Задача рассматриваемая в пятой главе диссертации — приближенное осуществление оптимальной диаграммы тока якоря при неизменном токе возбуждения — имеет важное практическое значение, так как этот режим работы двигателя является весьма распространенным.

В основу построения управляющей части системы, осуществляющей процесс заданной формы, положена идея А. Я. Лернера, заключающаяся в следующем. Если имеется возмож-

ность замерить пару каких-либо координат системы (такowymi могут быть ошибка и производные от ошибки), то, исходя из желаемого закона изменения их во времени, нужно так подобрать пару функциональных преобразователей, причем ко входу каждого из них подводится одна из выбранных координат, чтобы выходные величины обоих функциональных преобразователей изменялись по одному закону при желаемой форме процесса. Если разность выходных величин функциональных преобразователей подать на вход «неизменяемой» части системы, то такая замкнутая система должна обеспечить с той или иной степенью приближения желаемую форму процесса, поскольку при отклонении процесса от желаемой формы система всякий раз получает корректирующее воздействие, приближающее процесс к заданной форме. При таком способе формирования управляющего воздействия степень приближения процесса к желаемой форме будет тем большей, чем больше будут коэффициент усиления системы и область положительности вещественной частотной характеристики заданной «неизменяемой» части системы. Увеличения области положительности вещественной частотной характеристики «неизменяемой» части можно добиться применением структур, предложенных М. В. Мееровым и допускающих принципиально любую точность воспроизведения. В диссертации при осуществлении прямолинейной диаграммы тока в качестве координат, контролирующих процесс, выбраны ошибка  $\varepsilon$  и ток  $j$  (считаем  $\mu_c = 0$ ). Если функциональный преобразователь ошибки выбрать в виде  $f_1(\varepsilon) = K_\varepsilon \cdot \varepsilon$ , где  $K_\varepsilon$  — коэффициент усиления, обычно принимаемый равным единице, то функциональный преобразователь тока  $f_2(j)$ , определенный из условия  $f_1(\varepsilon) = f_2(j)$ , будет иметь вид

$$f_2(j) = K_\varepsilon \alpha_p \left\{ \frac{1}{2} + \frac{3j}{4j_0} - \frac{1}{4} \left( \frac{j}{j_0} \right)^3 \right\}. \quad (14)$$

На вход системы подается разность  $f_1(\varepsilon) - f_2(j)$ . Если передаточная функция заданной части системы имеет вид  $K_1/W(p)$ , где  $p$  — символ дифференцирования, то уравнением замкнутой системы будет

$$K_y K_\varepsilon K_1 \left[ \frac{1}{2} \alpha_p - \alpha - \frac{3\alpha_p}{4j_0} \frac{d^2 \alpha}{d\tau^2} + \frac{\alpha_p}{4j_0^3} \left( \frac{d^2 \alpha}{d\tau^2} \right)^3 \right] = W(p)\alpha, \quad (15)$$

где  $K_y$  — коэффициент усиления безынерционного усилителя, включенного последовательно с заданной частью системы. При  $K = K_y K_\varepsilon K_1 \rightarrow \infty$  уравнение (15) вырождается в

$$-\frac{\alpha_p}{4j_0^3} \left( \frac{d^2 \alpha}{d\tau^2} \right)^3 + \frac{3\alpha_p}{4j_0} \frac{d^2 \alpha}{d\tau^2} + \alpha = \frac{1}{2} \alpha_p. \quad (16)$$

Вырожденное уравнение (16) полностью определяется характером выбранных обратных связей. Решение его относительно  $\ddot{\alpha} = j$ , полученное на электронной модели, представляет периодическую функцию, составленную из отрезков прямых, причем в первом полупериоде график тока имеет вид желаемой прямолинейной диаграммы. При пренебрежении в (14) — (16) членом  $\frac{1}{4} \left( \frac{j}{j_0} \right)^3$ , который будет особенно мал при малых значениях тока, решением неполного вырожденного уравнения относительно  $\alpha$  будут гармонические колебания.

Для случая, когда заданная часть системы представляет собой последовательное соединение электромашинного усилителя и исполнительного двигателя, выбором достаточно большого « $K$ » можно сколь угодно приблизить решение полного

уравнения (15) (при пренебрежении в нем членом  $\frac{1}{4} \left( \frac{j}{j_0} \right)^3$ )

к гармоническому решению неполного вырожденного уравнения, по крайней мере в первом полупериоде. Следует отметить, что при равном нагреве косинусоидальная диаграмма тока обеспечивает всего на 0,82% меньшее быстродействие, чем прямолинейная диаграмма. Учет в (14) — (16) члена, пропорционального  $j^3$ , спрямляет гармонические колебания неполного вырожденного уравнения и, как показывает моделирование, незначительно сказывается на характере решения полного уравнения (15). Как видно из уравнений (15) и (16), сначала

на вход системы подается половина задания  $\frac{1}{2} \alpha_p$ , подход системы к заданному положению  $\alpha_p$  осуществляется путем придания системе колебательных свойств. Если в момент первого подхода системы к положению равновесия увеличить величину на входе с  $\frac{1}{2} \alpha_p$  до  $\alpha_p$  и включить дополнительные стабилизирующие связи, то получим процесс близкий к желаемой форме.

Независимо от закона изменения тока возбуждения между током якоря и скоростью в оптимальном режиме имеет место соотношение (10), которое также можно использовать для осуществления прямолинейной диаграммы тока якоря при  $i_a = \text{Const}$ . В этом случае система будет иметь обратные связи по скорости  $v$  и квадрату тока  $j^2$ , но не будет иметь главной обратной связи по углу  $\alpha$ . Моделирование полного и вырожденного уравнений показывает, что система с обратными связями по  $v$  и  $j^2$  обеспечивает только процесс разгона. Построить систему, которая позволяет получить переходный процесс,

близкий к заданному и не требует никаких переключений в процессе отработки угла  $\alpha_p$ , можно сочетанием рассмотренных выше структур. Как отмечалось выше, недостатком первой из них является то, что она склонна к колебаниям, недостатком второй — то, что она не может перевести систему в режим торможения и не имеет обратной связи по углу  $\alpha$ . Схема же с обратными связями по  $\alpha$ ,  $j$ ,  $v$  и  $j^2$ , как показывает моделирование, обеспечивает диаграмму тока достаточно близкую к прямолинейной и, кроме того, в конце торможения, когда ток достигает значения  $-j_0$ , система автоматически снижает ток до нуля, так как в конце процесса  $\alpha(\tau_p) = \alpha_p$ ,  $v(\tau_p) = 0$ , а знаки  $j$  и  $j^2$  противоположны.

В шестой главе приведены результаты экспериментального исследования на электронной модели оптимальной по нагреву системы второго порядка для случая фиксированного времени работы и нелинейных структур следящих систем высокого порядка, приближенно осуществляющих оптимальную диаграмму тока якоря. Результаты экспериментального исследования показали, что предложенные в диссертации сравнительно простые нелинейные структуры обеспечивают процессы близкие к оптимальным. Кроме того, в шестой главе, на базе работ М. В. Меерова, проведено теоретическое и экспериментальное (на лабораторном макете) исследование различных структур линейной следящей системы. Необходимость исследования структур линейной следящей системы вызвано тем, что при приближенном осуществлении оптимального процесса посредством введения нелинейных связей целесообразно использовать структуры, устойчивые при сколь угодно большом коэффициенте усиления. И кроме того еще тем, что при приближенном осуществлении оптимальной диаграммы тока в некоторых случаях бывает необходимо при подходе к положению равновесия нелинейную структуру изменить на наиболее рациональную с точки зрения отработки малых рассогласований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Проведено исследование двигателя постоянного тока как объекта оптимальной системы регулирования.

а) Рассмотрены различные аспекты вариационной задачи по определению оптимальной диаграммы тока якоря и установлена их тождественность в смысле получаемого результата решения.

б) При неизменном токе возбуждения и при учете теплоотдачи обмотки якоря и момента статической нагрузки, заданного в виде произвольной функции времени, определена оптимальная диаграмма тока якоря, вызывающая минимум нагрева при отработке заданного угла.

в) Поставлена и решена задача по определению оптимальных диаграмм токов якоря и возбуждения при их одновременном изменении. Получены оптимальные соотношения между токами якоря и возбуждения для систем позиционного следящего электропривода (отработка угла) и для систем разгонного электропривода. Установлено влияние нагрузки и насыщения магнитопровода на оптимальное соотношение между токами.

г) Рассмотрены оптимальные переходные процессы, минимизирующие потребление энергии при отработке заданного угла и при разгоне до заданной скорости для случаев, когда момент нагрузки является функцией времени, скорости или угла.

2. Дано построение оптимальной по быстродействию при ограниченном нагреве системы с объектом второго порядка для случаев работы с фиксированным броском тока или с фиксированным временем.

3. Рассмотрены способы приближенного осуществления оптимальной диаграммы тока якоря в следящих системах высокого порядка посредством введения в систему нелинейных связей. Предложена структура для приближенного осуществления оптимальной диаграммы тока якоря, не требующая никаких переключений в процессе отработки угла.

Основное содержание работы изложено в статьях:

1. Хамитов Ш. Ш. Исследование двигателя постоянного тока как объекта оптимальной системы регулирования, Электричество, № 5, 1958.

2. Хамитов Ш. Ш. К вопросу определения оптимальных диаграмм тока двигателя постоянного тока, ДАН СССР, т. 124, № 2, 1959.

3. Хамитов Ш. Ш. Оптимальные диаграммы токов при работе двигателя постоянного тока в повторно кратковременном режиме, Известия АН УзССР, серия технических наук, № 4, 1959 г.



192365

Центральная научная  
библиотека  
Академии наук Киргизской ССР

Т-00137 от 23.1-60 г.

Зак. 551

Тир. 200

Объем 1 п. л.

Типография Комитета по делам изобретений и открытий  
при Совете Министров СССР