

Министерство высшего и среднего специального образования  
Белорусской ССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

А.Л.Галкин

На правах рукописи

СИНТЕЗ ВЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОЗИЦИОННЫХ  
СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ  
СОВОКУПНОСТЕЙ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 05-232 Электрооборудование

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

М и н с к - 1 9 7 1

Работа выполнена на кафедре электрооборудования и автоматизации промышленных установок Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент О.П.Ильин.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор П.И.ЧИНАЕВ.

Кандидат технических наук, доцент П.В.ПОЛЗИК.

Ведущее предприятие - Конструкторское бюро точного электронного машиностроения (г.Минск).

Автореферат разослан "10" ноября 1971 г.

Защита диссертации состоится "11" декабря 1971 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям Белорусского политехнического института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: гор.Минск - 27, Ленинский проспект, 65, БПИ, Ученому секретарю Совета по энергетическим специальностям.

Дата защиты будет объявлена дополнительно в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА -  
кандидат технических наук

(Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ)

## Д В Е Л Е Н И Е

Рост уровня механизации и автоматизации процессов в различных отраслях промышленности значительно увеличил число автоматизированных электроприводов и, в частности, позиционных следящих приводов (ПСП), предназначенных для управления перемещением тех или иных производственных механизмов. Одним из основных показателей качества работы этих механизмов являются точность и производительность, которые главным образом зависят от быстродействия ПСП. Последнее определяется параметрами ПСП и закладываемых в них законов управления.

Исследованию законов управления, обеспечивающих предельное (оптимальное) быстродействие электропривода посвящен большой ряд работ Л.В.Кармишина, К.И.Кожевникова, Ю.П.Петрова, Е.А.Роченмана, В.А.Святославского, Сун-Цзянь, В.П.Чистова, Ш.Ш.Хамитова и др. Круг вопросов, рассматриваемых в этих работах в основном ограничивается определением на основе методов теории оптимального управления (ТОУ) качественных характеристик оптимальных законов изменения токов якоря и возбуждения двигателя применительно к двум наиболее характерным случаям:

- 1) при минимуме потерь мощности в цепи якоря двигателя,
- 2) без учета потерь мощности в цепи якоря двигателя.

В значительной мере сужается число работ, связанных с проблемой проектирования и реализации как оптимальных, так и квазиоптимальных систем приводов. Среди них можно выделить работы А.Я.Лернера, Л.П.Смоляникова, В.Д.Пышкало. Хотя в настоящее время именно эти вопросы представляют собой наиболее актуальную задачу для инженерной практики. Решению этих вопросов и посвящена реферируемая диссертационная работа, основные задачи которой сформулированы следующим образом:

1. Разработать инженерный аппарат расчета быстродействующих ПСП с электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения;

2. Разработать некоторые принципы построения квазиоптимальных по быстродействию систем ПСП, реализуемых на основе простых технических средств;

3. Разработать и исследовать некоторые структуры квази-оптимальных по быстродействию ПСП как с одним так и с двумя управляющими воздействиями.

Рассматриваемые системы имеют передаточные функции (ПФ) от второго до пятого порядка включительно как с комплексно-сопряженными так и с действительными отрицательными корнями характеристического полинома (ХП). Они отнесены к линейным непрерывным системам, управляемым как по одному, так и по двум входам двигателя, имеют детерминированные входные воздействия, ограничения на фазовые координаты и управления. Задачи решались на основе математического аппарата принципа максимума Понтрягина, принципа последовательного выведения ограниченных координат на предельные значения, некоторых положений об обобщенных функциях, методов операционного исчисления, методов фазовой плоскости, аналогового и физического моделирования разработанных систем.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений.

ГЛАВА I посвящена общим вопросам исследования и построения оптимальных по быстродействию систем автоматического регулирования (САР). В ней были исследованы методы оптимизации САР, в частности, такие как метод классического вариационного исчисления, метод фазового пространства А.А.Фельдбаума, метод областей изохрон А.Я.Лернера, метод моментов Н.Н.Красовского, принцип максимума Л.С.Понтрягина, метод динамического программирования Р.Беллмана.

Результаты исследований этих методов показали, что их применение для решения практических задач с одной стороны наталкивается на определенные математические трудности, с другой стороны приводит к структурам технически трудно реализуемым. Положение еще более усугубляется при попытках осуществления на их основе синтеза оптимальных систем с ограниченными фазовыми координатами. Наиболее удобное использование этих методов и, в частности, метода принципа максимума оказывается при его применении для исследований качественных характеристик оптимальных законов управления. В особенности

это касается систем, порядок уравнения движения которых не превышает второго. В связи с этим возникает необходимость в разработке инженерных методик синтеза оптимальных по быстродействию систем отступающих от классических, но дающих удовлетворительные результаты. При этом показано, что за исходную точку расчета оптимальных по быстродействию САР с ограниченными фазовыми координатами целесообразно принимать не ограничение на управляющее воздействие, как это имеет место в классических задачах оптимального быстродействия, а ограничения фазовых координат, которые в каждом конкретном случае определяют единственным образом некоторые предельные диаграммы оптимального изменения координат системы, доставляющих максимальную эффективность применяемому критерию оптимальности. Тогда, учитывая, что любую электромеханическую САР можно представить в виде двух частей - исполнительного двигателя и усилительно-преобразовательной части, оказывается возможным оптимизацию всей системы осуществлять через оптимизацию этих её частей, принимая за цель управления усилительно-преобразовательной частью максимальное приближение реальных законов изменения токов якоря и возбуждения двигателя к их предельным оптимальным законам. Для чего токи якоря и возбуждения двигателя могут быть приняты за управляющие воздействия некоторой фиктивной системы, представляющей собой двигатель, у которого электромагнитные постоянные времени равны нулю, и на основе принципа максимума найдены их предельные оптимальные законы изменения. Такой прием позволил, во-первых, представлять оптимизируемую на первом этапе функцию дифференциальным уравнением не выше второго порядка, во-вторых, выявлять максимальную эффективность "потоков", оптимальной системы и, следовательно, в начале расчета определять возможность при выбранном исполнительном двигателе удовлетворять поставленным перед проектируемой системой требованиям. В соответствии с сформулированной целью управления, оптимальный алгоритм управления на входе усилительно-преобразовательной части, а следовательно и на входе всей системы, определяется условием вывода за кратчайшее время ограниченных координат на свои предельные значения и соответ-

ственно может определяться на основе принципа последовательного выведения фазовых координат на предельные значения. При этом показано, что определение характера оптимального алгоритма управления САР на основе принципа последовательного вывода фазовых координат на предельные значения наиболее успешно может быть осуществлено при представлении динамического поведения САР не одним уравнением, а совокупностью уравнений всех ее фазовых координат. В этом случае важно знать число интервалов управления по выводу координат на свои предельные значения, что в свою очередь требует правильного выбора и учета основных ограничений фазовых координат. В связи с этим в главе был осуществлен анализ видов ограничений в плане их влияния на характер оптимального по быстродействию управления, представленные следующими случаями:

I. Ограничение управления вида:

$$|u| \leq 1 \quad (I)$$

В этом случае имеет место ограничение линейной комбинации производных

$$\left| \frac{d^n x}{dt^n} + \alpha_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + \alpha_{n-1} \frac{dx}{dt} + \alpha_n x \right| = |u| \leq 1 \quad (2)$$

Откуда следует, что если корни ХП САР действительные и отрицательные, то число интервалов управления, в соответствии с теоремой "об  $n$  интервалах" не превышает порядка ее дифференциального уравнения движения. Если корни ХП комплексно-сопряженные, то число интервалов управления в общем случае неопределенно и зависит не только от порядка уравнения движения САР, но и от начальных условий. Исследования, проведенные в этой главе показали, что и в случае комплексно-сопряженных корней ХП может выполняться теорема "об  $n$  интервалах" но в отличие от первого случая она выполняется не во всем фазовом пространстве, а в некоторой его области, лежащей вблизи начала координат фазового пространства. Причем в большинстве практических случаев эта область включает в себя наиболее вероятные состояния системы, в особенности это ка-

счета позиционных следящих приводов.

2. Ограничена высшая производная

$$\left| \frac{d^n x}{dt^n} \right| \leq M \quad (3)$$

3. Ограничена не только высшая производная, но и ряд низших производных

$$\left| \frac{d^n x}{dt^n} \right| \leq M_1; \quad \left| \frac{d^k x}{dt^k} \right| \leq M_2; \quad \left| \frac{d^l x}{dt^l} \right| \leq M_3 \quad (4)$$

4. Ограничено управление и  $K$ -ая производная

$$\left| \frac{d^n x}{dt^n} + \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + \frac{d^{k+1} x}{dt^{k+1}} \right| \leq M_1 \quad (5)$$

$$\left| \frac{d^k x}{dt^k} \right| \leq M_2 \quad (6)$$

5. Ограничено управление и ряд производных, т.е. к ограничениям (5), (6) добавляется ограничение

$$\left| \frac{d^l x}{dt^l} \right| \leq M_3 \quad \text{и т.д.}$$

При этом показано, что в случаях 2 + 5 количество интервалов управления ( $m$ ) практически не зависит от вида корней XII системы и оно может определяться следующим образом соответственно для случаев:

2.  $m$  - равно порядку ограниченной производной

3.5.

$$m = (k+1)(j-k+1) \dots (n-j+1) - 1 \quad (7)$$

где  $K, j, n$  порядок дифференциальных уравнений, связывающих управляемую величину с ограниченными координатами (управляющее воздействие в (7) также принимается за ограниченную координату).

$$4. \quad m = (n-K)(K+1) + K \quad (8)$$

где  $m_p = (n-K)(K+1)$  общее число релейных интервалов  
 $K$  - число участков стабилизации ограниченной координаты.

Далее в главе приводится методика нахождения общих выражений фазовых координат, позволяющих получать численные характеристики совокупностей оптимального изменения координат системы (СОИКС) на основе некоторых понятий об обобщенных функциях и, в частности, исходя из их векторного представления. При этом показано, что общие выражения координат системы могут представляться в виде суммы реакций на выходе передаточных функций по каждой координате на отдельные входные воздействия и передаточной функции на входе которой действует  $\delta$ -функция, характеризующей начальное состояние системы. Затем показана принципиальная возможность построения на основе СОИКС совокупностей оптимальных траекторий в фазовом пространстве и требуемых характеристик преобразователей фазовых координат.

ГЛАВА II посвящена разработке аппарата расчета оптимальных по быстродействию процессов управления ПСП при неизменном потоке возбуждения двигателя и, в частности, выводу общих выражений фазовых координат и нахождению алгоритмов управления ПСП. При этом в главе рассматривался ряд наиболее распространенных на практике ПСП, разделяемых по уравнениям динамики усилительно-преобразовательной части следующим образом: безынерционный преобразователь мощности (ПМ) -двигатель, одноинерционный ПМ -двигатель, двухинерционный ПМ -двигатель, электромашинный усилитель - двигатель (ЭМУ -Д). Применяемые в работе структурные схемы имели вид как например на Рис. I для системы двухинерционный ПМ -двигатель. На основании такого рода схем были найдены передаточные функции относи-



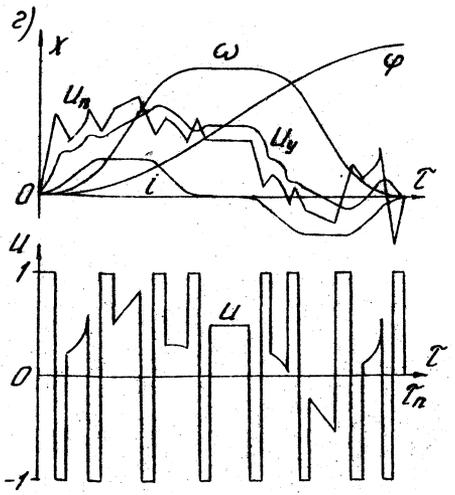
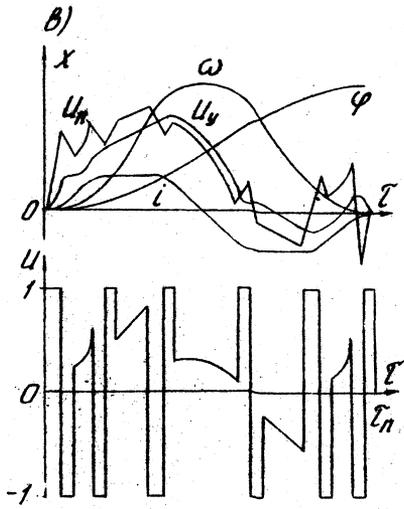
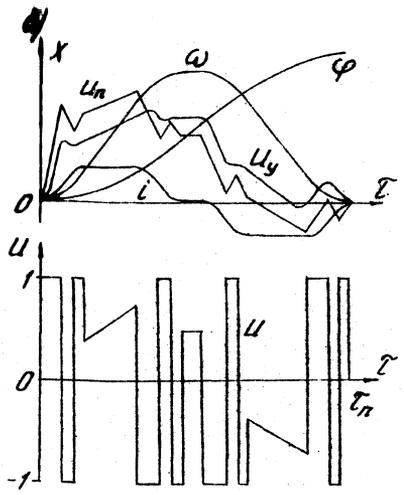
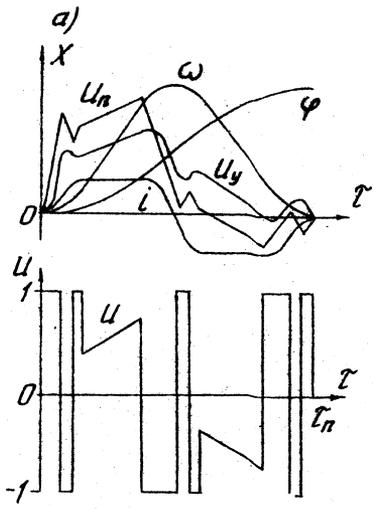


Рис. 2.

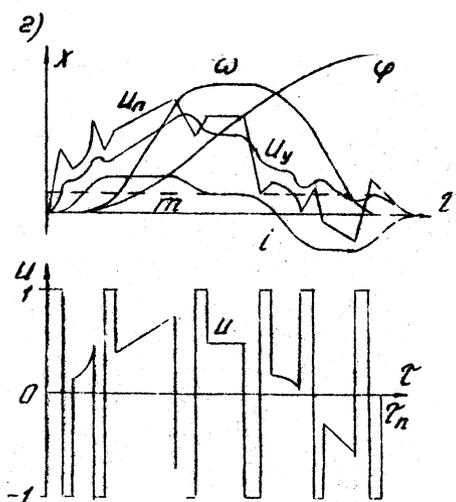
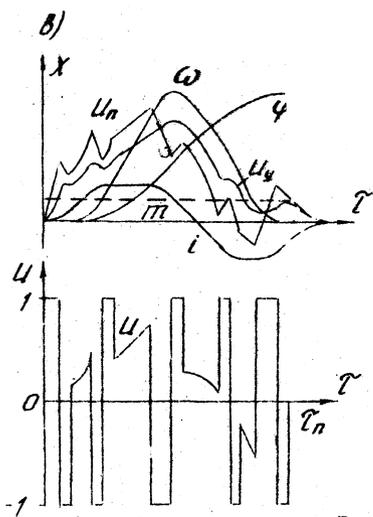
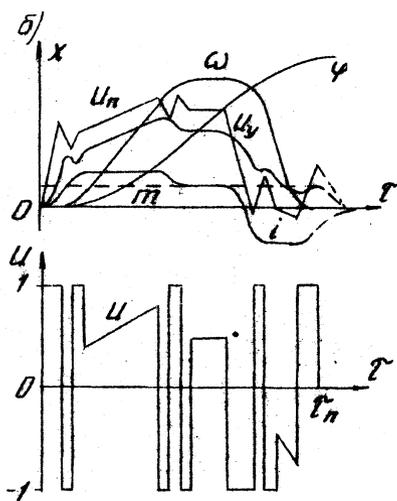
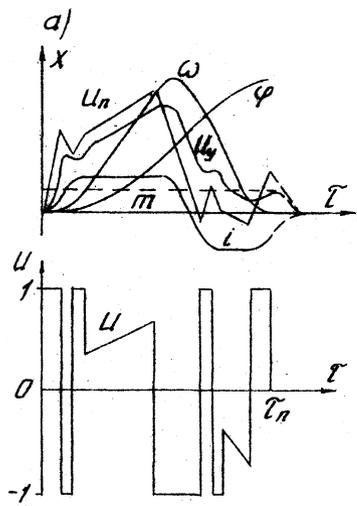


Рис. 3.

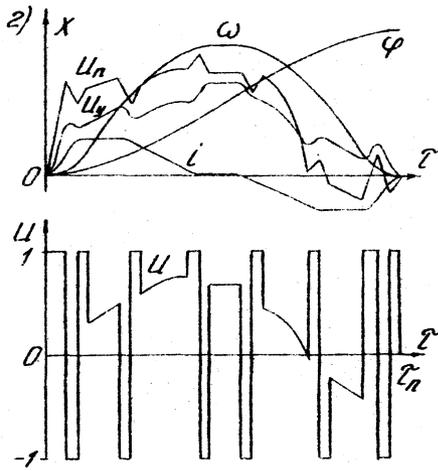
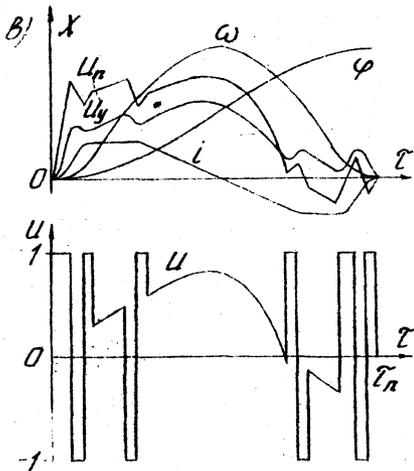
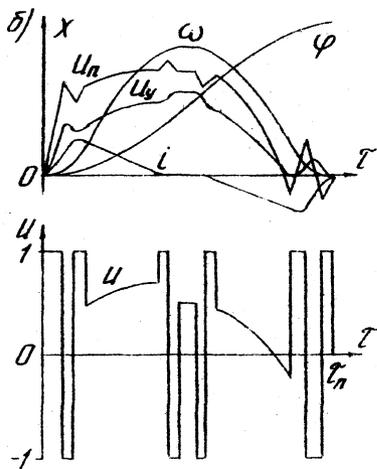
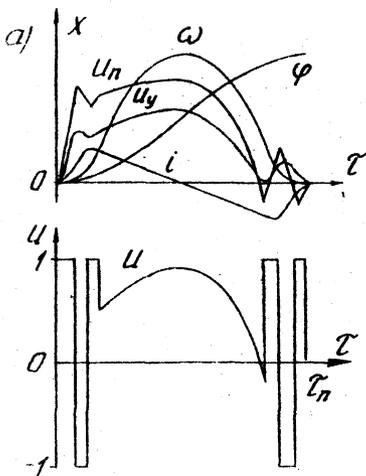


Рис. 4.



где  $T_{\theta}$  - постоянная времени обмотки возбуждения,  
 $K_{\theta}$  - передаточный коэффициент обмотки возбуждения,  $\theta T$  -  
 электромеханическая и электромагнитная постоянные времени,  
 $T_{\text{инт}}$  - постоянная времени интегрирования двигателя при  
 управлении со стороны потока возбуждения.

В соответствии с линеаризованными уравнениями были  
 получены выражения фазовых координат для расчета участков  
 переходных процессов, связанных с максимальными управляющи-  
 ми воздействиями. Затем в данной главе были получены выра-  
 жения координат ПСП для экстремальных участков управления.  
 Следует отметить, что законы управления на этих участках  
 отличаются сложностью, например при поддержании режима  
 постоянства производной тока якоря  $i' = \alpha' = \text{const}$  выражение  
 изменения напряжения возбуждения должно иметь вид:

$$U_{\theta} = \frac{U_{\theta} - i_{\theta} - \alpha_i' \beta + \alpha_i' \tau}{\omega} \left\{ 1 + \frac{\beta_{\theta} \alpha_i'}{U_{\theta} - i_{\theta} - \alpha_i' \beta + \alpha_i' \tau} - \right. \\ \left. - \frac{\beta_{\theta}}{\omega^2} \left[ (U_{\theta} - i_{\theta} - \beta \alpha_i') i_{\theta} - (U_{\theta} - \beta \alpha_i' - 2i_{\theta}) \alpha_i' \tau - \alpha_i'^2 \tau^2 \right] \right\}; \quad (9)$$

где  $\beta = \frac{T}{\theta}$ ;  $\beta_{\theta} = \frac{T_{\theta}}{\theta}$ ;  $\tau = \frac{t}{\theta}$ ; (10)

Далее в главе были получены СОИКС для рассматриваемых  
 ПСП, аналогичные приведенной на Рис.5. На этом рисунке при-  
 ведена СОИКС двухинерционный ПМ-двигатель, для следующих  
 систем ограничений

- а)  $|i'| \leq \alpha_i$ ;  $|e| \leq \alpha_e$ ;  $|\phi| \leq \alpha_{\phi}$ ;    б)  $|i'| \leq \alpha_i$ ;  $|e| \leq \alpha_e$ ;  $|\phi| \leq \alpha_{\phi}$ ;  $|\omega| \leq \alpha_{\omega}$ ;  
 в)  $|i'| \leq \alpha_i$ ;  $|i| \leq \alpha_i$ ;  $|e| \leq \alpha_e$ ;  $|\phi| \leq \alpha_{\phi}$ ;    г)  $|i'| \leq \alpha_i$ ;  $|i| \leq \alpha_i$ ;  $|e| \leq \alpha_e$ ;  $|\phi| \leq \alpha_{\phi}$ ;  $|\omega| \leq \alpha_{\omega}$ ;

При этом отмечено, что поскольку в общем случае порядок  
 передаточных функций (ПФ) по каждому управляющему воздейст-  
 вию не одинаков, то числа интервалов по приводимой в работе  
 методике должны определяться отдельно для каждого управляю-  
 щего воздействия. Кроме того отмечено, что в пределе обеспе-

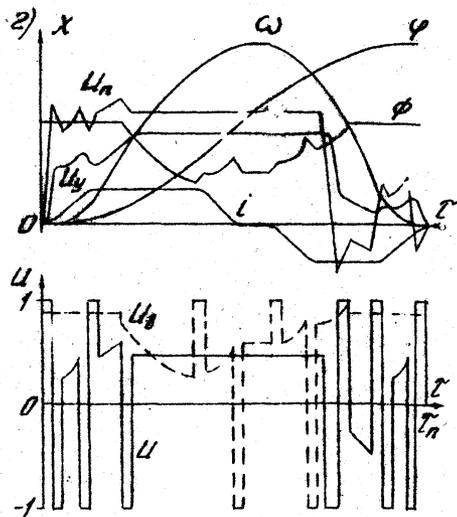
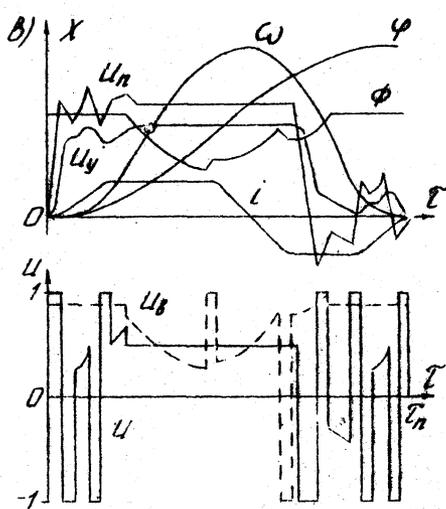
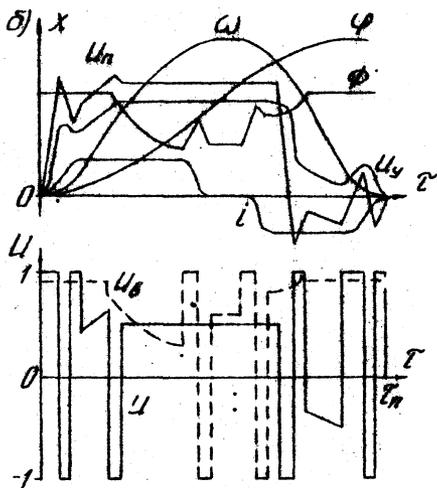
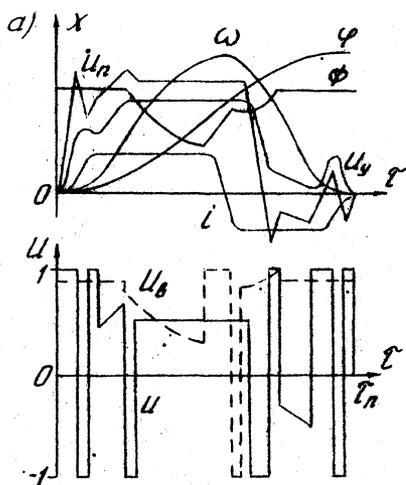


Рис. 5.

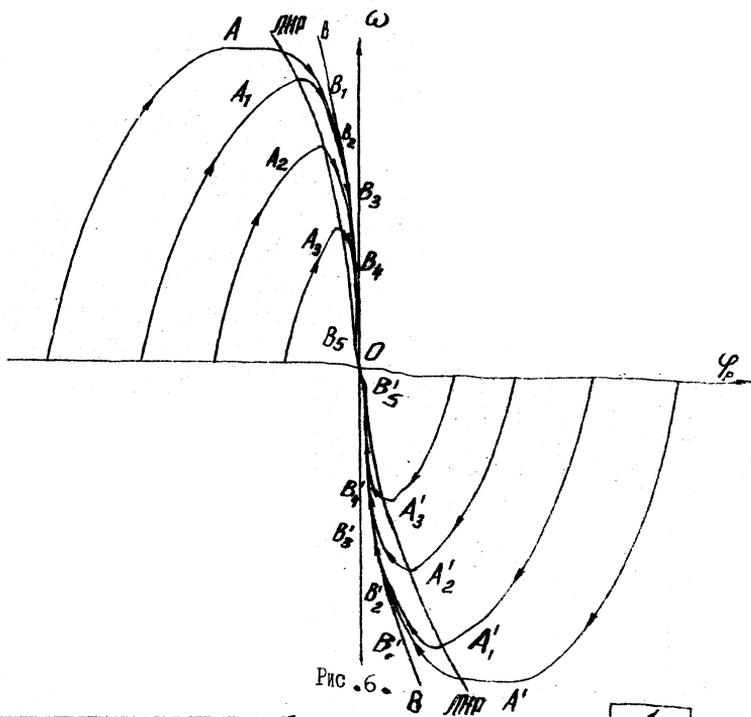


Рис. 6. B ЛНР A'

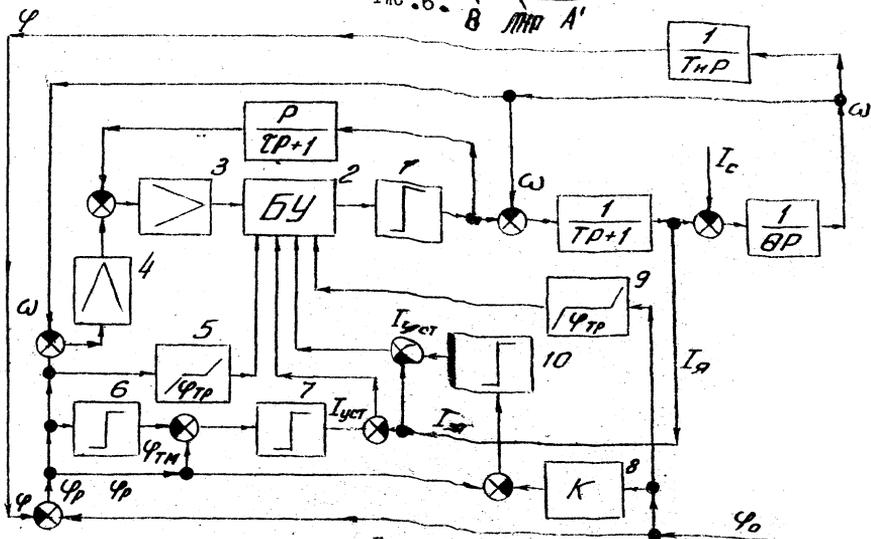


Рис - 7.

го числа интервалов оптимального по быстродействию управления ПСП с двумя управляющими воздействиями по формуле (7) производить не следует, так как в этом случае она дает неверный результат. Его целесообразно пользоваться лишь при определении числа интервалов управления теми координатами, вывод которых в заданное значение осуществляется одним управляющим воздействием. В данном случае такими координатами являются ток якоря -  $i$ , его производная -  $i'$  и более высокие производные.

ГЛАВА IV посвящена вопросам построения квазиоптимальных по быстродействию ПСП. Первоначально в ней исследованы общие принципы построения оптимальных по быстродействию САР, в результате чего показано, что независимо от их принципа построения получаемые структуры чрезвычайно сложны и могут быть рекомендованы лишь в отдельных случаях. Это в свою очередь показывает, что наиболее технико-экономически обоснованными являются квазиоптимальные по быстродействию САР, динамические свойства которых близки к оптимальным при простой и технически легко реализуемой структуре. Простые структуры быстродействующих САР в большинстве практических случаев могут быть получены при формировании двухинтервальных квазиоптимальных процессов. В этом случае оптимальные законы изменения координат на участках разгона, торможения и на участках движения системы с установившейся скоростью должны обеспечиваться соответствующим построением ее структуры, в частности, введением отрицательных задержанных обратных связей, "отсечек" или организацией скользящих режимов. На фазовой плоскости были выявлены и исследованы требуемые условия для осуществления необходимых законов изменения фазовых координат на основе этих способов. Для случая формирования двухинтервальных процессов управления в главе выявлена так называемая линия начала полного изменения вращающего момента (реверса) двигателя или сокращенно ЛНР. При этом показана целесообразность наличия вблизи положения согласования системы линейного режима работы. Рассмотрены вопросы выбора условий переключения режимов работы ПСП с релейного на ли-

нейный. Показано, что в случае формирования оптимального по быстродействию управления в функции двух координат целесообразно выводить траекторию схемы больших отклонений в некоторую точку фазового пространства, лежащую вблизи начала координат и определяемую из расчета структуры системы, соответствующей линейному режиму работы. Переключение режимов в этом случае осуществляется по фиксированному значению рассогласования в момент времени, когда  $\varphi = \varphi_0$ ;  $\omega = \omega_0$ ; или  $\omega = \dot{\omega} = 0$ . В последнем случае оказывается, что схема малых отклонений обрабатывает позиционный скачок и, вследствие этого, наиболее просто может рассчитываться методом квадратичного корневого годографа.

При построении характеристик ВУ быстродействующих ПСП в соответствии с ЛНР независимо от порядка их дифференциальных уравнений движения управление формируется в функции двух координат (рассогласования и его производной). При этом формирование соответствующих законов изменений координат ПСП на участках разгона движения с установившейся скоростью (если система выходит на этот участок) и торможения должны формироваться за счет "отсечек", скользящих режимов и т.д., а расчет управляющей части сводится к расчету ВУ, переключающего систему в тот момент, когда ее фазовая траектория достигает точки фазового пространства, с которой должно начинаться полное изменение (тока якоря) момента двигателя. В соответствии с этим рассмотрены вопросы построения характеристик управляющих устройств ПСП на основе ЛНР и методика ее построения на основе СМЖС аналогичных Рис.2 + 5. Соответствующая приведенной на Рис.2 СМЖС линия начала реверса имеет вид Рис.6, где приведены оптимальные процессы согласования в плоскости: рассогласование  $\varphi_p$  - скорость  $\omega$ . Затем в главе были исследованы влияния нагрузки на характеристику ЛНР, в результате которых было выявлено, что наличие неизменного реактивного момента нагрузки не влияет на общий характер закона ЛНР, что в этом случае закон изменения соответствует окончанию переходных процессов при токе якоря двигателя равному статическому току нагрузки. Наличие активного момента нагрузки неизменно по величине и знаку делает характеристику ЛНР

несимметричной относительно оси  $\varphi$ , что делает необходимым предусматривать в ВУ устройство, учитывающее знаки скорости и момента нагрузки. Далее в главе рассмотрены вопросы учета влияния момента нагрузки при построении быстродействующих ПСП. При этом были исследованы возможности и области применения целого ряда путей учета влияния момента нагрузки. Основное внимание было уделено таким способам как:

1. Введение в ВУ дополнительных устройств, корректирующих моменты переключения.

2. Одновременное введение компенсационной обратной связи по возмущению, компенсирующей его произвольные изменения только на участке торможения и дополнительных устройств, корректирующих моменты переключения от изменений возмущающих воздействий, имеющих место от задания к заданию, или на участках разгона и движения с установившейся скоростью.

Отмечено, что основным недостатком известных в литературе способов, связанных с коррекцией моментов переключения является то, что они используют информацию получаемую на этапе разгона (ускорение разгона, путь разгона). В связи с этим в главе приведен способ коррекции моментов переключений на основе сигналов статического тока нагрузки. При этом показано, что такой способ коррекции при наличии компенсационной обратной связи по возмущению, включаемой только на участке торможения, дает возможность достаточно простыми средствами формировать оптимальные процессы при произвольном законе изменения момента нагрузки во времени. Для случаев, когда возмущения в ПСП вызываются не только моментами нагрузки, но и изменениями параметров системы, например: нестабильностью крутизны датчика скорости, величины полного тока якоря двигателя, изменениями момента инерции нагрузки - в главе предлагается формировать диаграмму тока на участке торможения за счет отслеживания предельной параболической траектории ведущей в начало координат фазового пространства.

ГЛАВА У посвящена вопросам практической реализации принципов построения быстродействующих ПСП, рассмотренных в предыдущей главе.

Исполнительные элементы быстродействующих приводов выполнены по схеме полупроводниковый преобразователь двигателя. Преобразователь в цепи якоря двигателя выполнен по схеме тиристорного моста с искусственной емкостной коммутацией. Управление по цепи возбуждения осуществлялось через типовой усилитель постоянного тока. Применение тиристорного мостового преобразователя (ТМП) обусловлено тем, что в системе следящего привода он позволяет иметь достаточно простые схемы управления, позволяющие создавать системы со многими входами. Последнее является существенным, так как в быстродействующих ПСП зачастую во время движения необходимо менять управления в функции как выходной так и промежуточных координат. Исследования ТМП в системе ПСП выявили тот недостаток, что в виду релейности его характеристики в ПСП вблизи положения согласования возникают автоколебания, которые сопровождаются низкочастотными колебаниями тока якоря большой амплитуды, что нежелательно. При рассмотрении способов подавления низкочастотных колебаний систем показано, что в данном случае наиболее приемлемым способом является возбуждение в системе вынужденных колебаний высокой частоты, создаваемых некоторым дополнительным источником периодических сигналов. В рассматриваемых схемах дополнительное воздействие высокой частоты создается включением тиристорного моста по схеме самовозбуждения, в которую введен запускающий генератор, выполненный по схеме мультивибратора. Эффект самовозбуждения ТМП достигается введением интенсивной упругой обратной связи в виде емкости, охватывающей ТМП с последовательно соединенным согласующим усилителем. При этом характеристика ТМП становится релейно-линейной. Ширина линейной зоны может регулироваться в зависимости от величины насыщения сигнала обратной связи, охватывающей ТМП. Далее для механизмов, работающих в режимах установочных перемещений, т.е. при постоянном или отсутствующем моменте нагрузки разработана структура быстродействующего ПСП, управляемого в функции выходной координаты. Структурная схема этого ПСП приведена на Рис.7 где 1-ТМП, 2-блок управления, служащий для подключения к схеме управления ТМП соответствующих входных сигналов

ПСП, 3- согласующий усилитель (СУ), 4- предварительный усилитель (ПУ), 5 - элемент с зоной нечувствительности, соответствующей рассогласованию с которого возможна работа ПСП в линейной зоне, 6- релейный элемент (РЭ) с выходным сигналом, соответствующим тормозному пути с максимальной скорости  $\varphi_{ТН}$ , 7 - РЭ с выходным сигналом соответствующим максимальному току якоря двигателя, 8- элемент с передаточным коэффициентом - К

$$K = \frac{1}{1 + \frac{z M + M_c}{z M - M_c}} \quad (II)$$

где  $M$  момент двигателя,  $M_c$  - момент нагрузки,  $z$  - передаточное число редуктора; 9- элемент с зоной нечувствительности, соответствующей заданию, при котором ограничение по скорости не наступает, 10- РЭ с выходным сигналом, соответствующим максимальной величине тока якоря. Отличительной особенностью приведенного ПСП является отсутствие нелинейных функциональных преобразователей и высокая стабильность схемы регулятора.

Для случая, когда работа управляемого механизма сопровождается изменениями его момента инерции и кроме того в ПСП имеют место изменения таких параметров как крутизна датчика скорости, номинальная величина измерительного сопротивления в цепи токовой отсечки и т.д. Разработана структура ПСП приведенная на Рис.8, где 1- ТМЦ, 2- блок управления, 3- СУ, 4-РЭ, с выходным сигналом, соответствующим максимальной величине тока якоря, 5- нелинейный функциональный преобразователь с характеристикой соответствующей выражениям:

$$\omega = \begin{cases} -K\varphi; & \text{при } |\varphi_p| \leq \varphi_{pn}; \\ -\sqrt{2 \frac{z M \pm M_c}{z^2 J_d + J_n}}; & \text{при } |\varphi_p| > |\varphi_{pn}|; \end{cases} \quad (I2)$$

где 
$$\varphi_{пр} = \frac{2 \frac{z M \pm M_c}{z^2 J_2 + J_M}}{K^2};$$
 точка излома предельной параболической траектории, определяемой коэффициентом усиления

линейной части ПСП.

6- РЭ, на выходе которого неоявляется сигнал с момента наступления замедления ПСП. Отличительной особенностью приведенной на Рис.8 схемы ПСП является то, что она позволяет скомпенсировать на участке торможения отклонения процесса от заданного, появляющиеся на участке разгона.

Для механизмов позиционного управления, связанных с большими значениями обрабатываемых перемещений разработан быстродействующий ПСП, приведенный на Рис.9, где: 1-ТМП, 2- СУ, 4- нелинейный функциональный преобразователь (НФП), характеристика которого соответствует ЛНР на участке движения от основной скорости до нуля, 5- НФП, характеристика которого соответствует ЛНР на участке движения ПСП от максимальной скорости до основной, 6- РЭ, выходной сигнал которого по модулю равен величине тока задания  $I_z$ , 7- РЭ с зоной нечувствительности равной величине сигнала, соответствующего основной скорости вращения двигателя, 8- РЭ с зоной нечувствительности, соответствующей максимальной скорости вращения двигателя, 9- усилительный элемент задержанной отрицательной обратной связи по току, действующей в цепи якоря двигателя, 10- ключ, прерывающий поступление сигнала на усилитель -9 при появлении сигнала на выходе блока -7, 11 - элемент с зоной нечувствительности, равной току уставки, 12- ключ, замыкающий цепь поступления сигнала регулятора тока в цепь возбуждения при появлении сигнала на выходе РЭ-7, 13- ключ, прерывающий поступление сигнала регулятора тока в цепь возбуждения при появлении сигнала на выходе РЭ-8, 14- усилитель регулятора тока. Отличительной особенностью разработанного ПСП является достаточно простая схема реализации квазиоптимальных по быстродействию процессов с двумя управляющими воздействиями и независимость режима поддержания постоянного значения

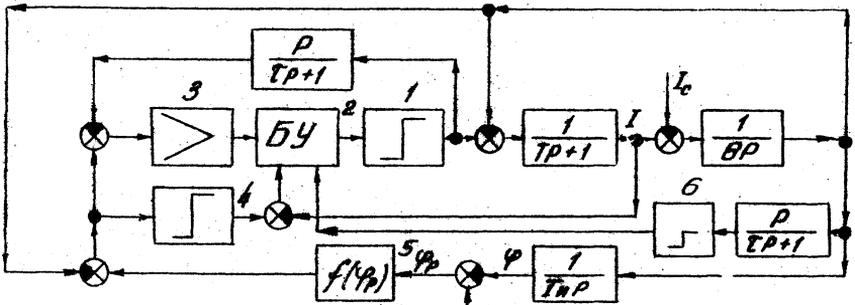


Рис. 8.

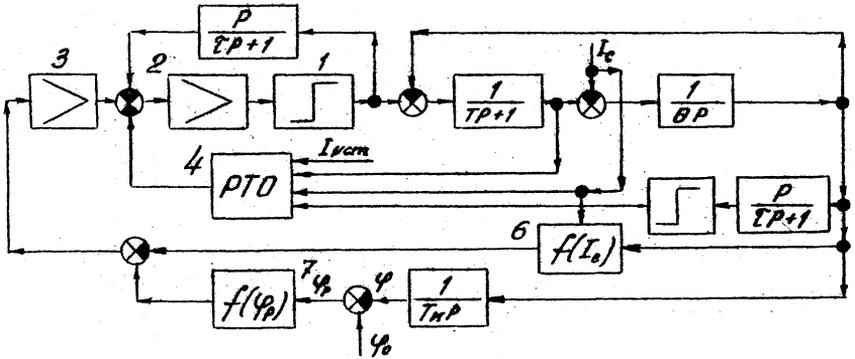


Рис. 10.

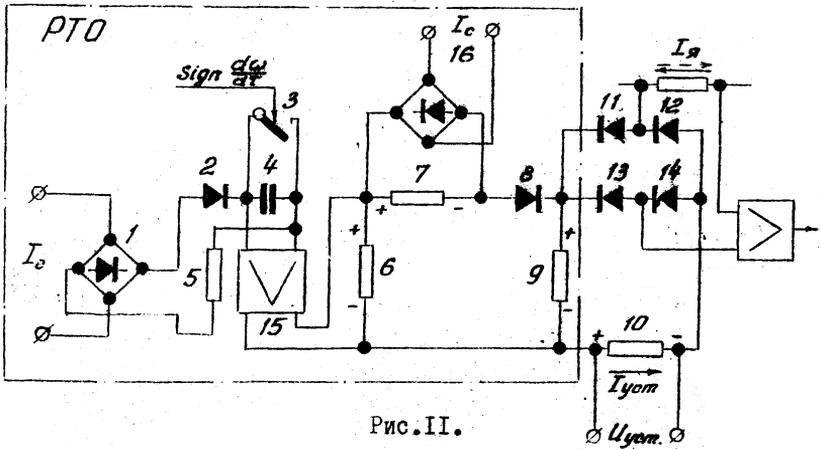


Рис. 11.

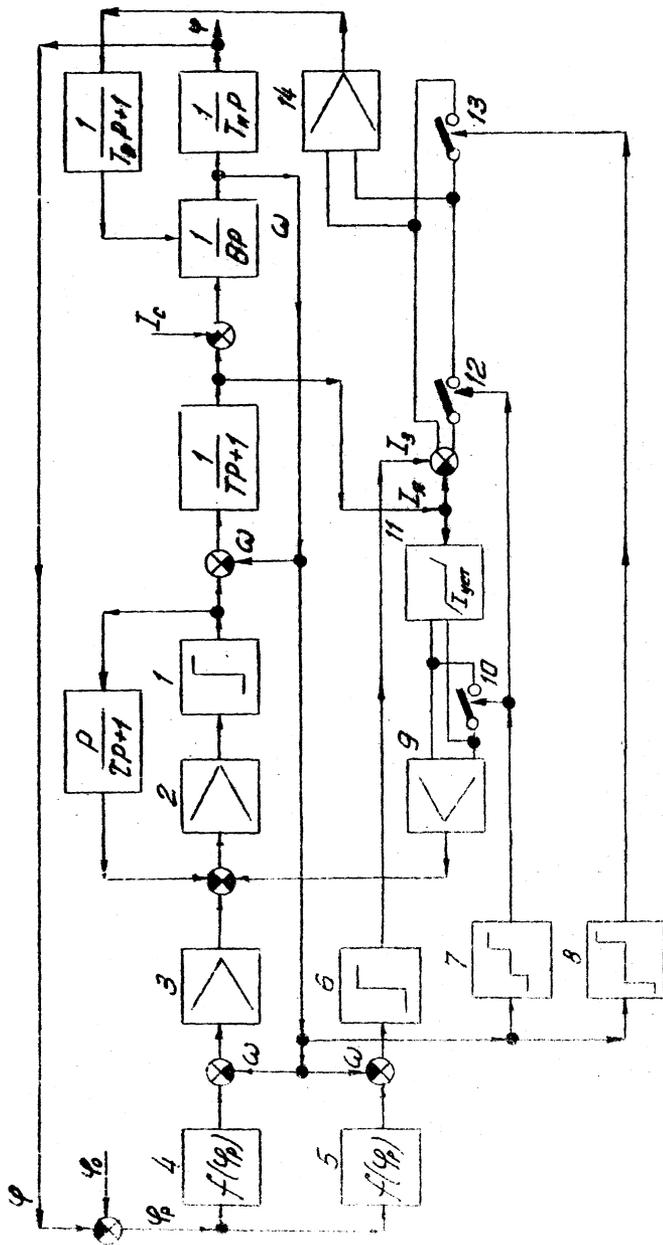


Рис. 9.

максимальной скорости от параметров системы. Последнее достигается за счет формирования движения на участке с максимальной установившейся скоростью в скользящем режиме.

Для механизмов позиционного управления, связанных с произвольными изменениями момента нагрузки разработан ПСП приведенный на Рис.10, 1-ТМЦ, 2-СУ, 3-ПУ, 4- регулятор токовой отсечки (Рис.11), 5- РЭ, выдающий сигнал знака ускорения, 6- функциональный преобразователь, характеристика, которого устанавливает соответствие между статическим током нагрузки и изменением коэффициента обратной связи по скорости, 7-НФП, характеристика которого соответствует ЛНР. Отличительной особенностью разработанного ПСП является то, что он, во-первых, имеет устройство подстройки ЛНР, управляемое сигналами пропорциональными статическому моменту (току) нагрузки, а, во-вторых, имеет приведенный на Рис.11 блок компенсации уменьшения момента нагрузки, имеющего место на участке торможения, где 1,16- мостиковые выпрямители на входы которых подаются текущие значения статического тока нагрузки. Параллельно мостиковому выпрямителю (МВ)-1 включены последовательно соединенные между собой диод-2, конденсатор-4, резистор-5, образующие цепь заряда конденсатора-4. Параллельно конденсатору-4 включены ключ-3 и усилитель-15. Нагрузкой усилителя-15 является низкоомный резистор-6. Ключ-3 управляется сигналом датчика знака ускорения таким образом, что при разгоне (положительном знаке ускорения) он разомкнут, а при торможении (отрицательном знаке ускорения) он замкнут. Диод-2 служит для предотвращения разряда конденсатора-4 при разомкнутом ключе-3. Напряжение заряда конденсатора-4 подается на резистор-6 через усилитель-15. Параллельно резистору-6 включены последовательно соединенные между собой резистор-7, диод-8, резистор-9. На резистор-9 через диод-8 поступает разность напряжений резисторов-6,7. При этом включение диода-8 имеет такую полярность, что он открывается и замыкает электрическую цепь только в том случае, когда напряжение на резисторе-6 больше напряжения на резисторе-7. Резистор-9 стоит в цепи управления величиной токовой отсечки. Узел токовой отсечки

состоит из резистора-10, к которому прикладывается напряжение установки  $U_{уст.}$  соответствующее некоторой заданной величине тока якоря двигателя, мостика на диодах-11 + 14.

В ПРИЛОЖЕНИЯХ приведены подробные описания принципов работы разработанных схем и результаты их экспериментальных исследований.

В приложении также рассмотрены вопросы рационального выбора параметров быстродействующих ПСП, при которых достижимые значения критерия оптимальности достигают экстремальных значений. Параметры силовых частей ПСП определялись на основе единого с управлением критерия оптимальности. При этом показано, что определение оптимальных параметров ПСП таких как электромеханическая постоянная времени и постоянная времени интегрирования сводится к определению соответствующего передаточного числа редуктора. Далее кратко изложен метод принципа максимума для процессов с параметрами и возможные в этом случае постановки задачи оптимального управления. На основе принципа максимума для процессов с параметрами найдены выражения для передаточных чисел редуктора при которых, значения постоянных времени  $\theta$  и  $T_n$  доставляют максимальную эффективность оптимальному закону управления. Затем исследованы влияния электромагнитной постоянной времени цепи якоря и инерционности усилительно-преобразовательного тракта ПСП на эффективность оптимального управления. Показано, что снижение эффективности оптимального управления при наличии инерционных ПМ зависит главным образом не от величины инерционности ПМ и электромагнитной постоянной времени, а от соотношений между электромагнитной и электромеханической постоянными времени. При этом рациональные величины электромагнитной постоянной времени не должны превышать величины электромеханической постоянной времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования показали, что проблема синтеза оптимальных по быстродействию ЦСП связана с необходимостью получения их уравнений динамики и выбором основных ограничений, определением оптимальных по быстродействию процессов управления ими, нахождением структур, реализующих наилучшим с точки зрения технико-экономических показателей образом оптимальные законы управления.

При решении этих вопросов были получены следующие основные результаты:

1. Показано, что характер оптимального по быстродействию управления системами с ограниченными фазовыми координатами практически зависит только от порядка их дифференциальных уравнений движения и выбранных ограничений и, вследствие этого, его определение можно не связывать с видом корней характеристического полинома системы.

2. Предложено представлять переходные процессы оптимальных по быстродействию ЦСП в виде совокупностей оптимальных изменений их координат (СОИКС), что позволило по разработанной в работе методике достаточно простым путем находить и рассчитывать соответствующие алгоритмы управления. Получены общие выражения координат рассматриваемых в работе систем приводов, позволяющих в соответствии с СОИКС без применения вычислительных машин определять численные характеристики приемов, приемлемыми для инженерной практики.

3. Выявлена так называемая линия начала реверса (ЛНР) полного вращающего момента двигателя, позволяющая с учетом практических схем ЦСП, значений их параметров и ограничений фазовых координат сводить процессы управления ими, формируемых в функции фазовых координат, к двум основным интервалам. Разработана методика построения ЛНР и определения на ее основе соответствующих характеристик функциональных преобразователей координат системы. Показано, что реализация ЛНР дает возможность независимо от порядка дифференциального уравне-

ния ПСП формировать квазиоптимальное управление им в функции двух координат - выходной величины и ее производной. Это в свою очередь позволило решить задачу построения быстродействующих ПСП простыми техническими средствами.

4. Предложено при синтезе быстродействующих ПСП с учетом статического момента нагрузки, осуществлять коррекцию моментов переключения управляющего воздействия путем изменения месторасположения ЛНР на фазовой плоскости в функции статического тока нагрузки.

5. Показано, что управление ПСП по двум каналам двигателя обеспечивает увеличение быстродействия и наиболее эффективно при незначительных или вообще отсутствующих моментах нагрузки. При этом для получения максимального быстродействия при управлении по двум каналам двигателя выходное напряжение преобразователя мощности в цепи якоря должно проектироваться как можно ближе к предельно допустимой величине э.д.с. двигателя, а управление по току возбуждения должно иметь место при перемещениях при которых э.д.с. двигателя достигает максимальной величины и его закон изменения должен обеспечивать поддержание величины э.д.с. на максимальном уровне.

6. Показано, что оптимизацию ПСП целесообразно связывать не только с нахождением соответствующего алгоритма управления, но и параметров его силовой части, в частности таких как электромеханическая постоянная времени и постоянная времени интегрирования, которые практически зависят от передаточного числа редуктора. Для получения рациональных величин этих постоянных времени передаточное число редуктора должно определяться на основе одного и того же критерия оптимальности, что и закон управления. При этом строгое решение такой задачи возможно на основе принципа максимума для "оптимальных процессов с параметрами", в соответствии с которым получены выражения для передаточных чисел редуктора, доставляющих максимальную эффективность принятому критерию оптимальности.

7. Разработаны и исследованы схемы быстродействующих ПСП, отличающиеся простыми и легко реализуемыми управляющими частями:

- а) быстродействующий ПСП, управляемый в функции выходной координаты;
- б) быстродействующий ПСП, построенный на принципе формирования оптимальной токовой диаграммы участка замедления путем отслеживания предельной параболической траектории, ведущей в начало координат фазового пространства;
- в) быстродействующие ПСП с одним и двумя управляющими воздействиями построенные на принципе формирования ЛНР;
- г) быстродействующий ПСП, имеющий подстройку ЛНР в функции статического тока нагрузки и устройство компенсации уменьшения на участке торможения статического момента нагрузки;

Разработано устройство компенсации уменьшения статического момента нагрузки соответствующим увеличением вращающего момента двигателя.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и исследовании быстродействующих ПСП.

Основные результаты доложены:

1. На XXIV научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности, Минск, 1970.

2. На III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике, Минск, 1970.

3. На Всесоюзном научно-техническом совещании по современным системам автоматического управления электроприводами. Ленинград, 1971.

4. На XXVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности. Минск, 1971.

5. На IV Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем. Ташкент, 1971.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Ильин О.П., Галкин А.Л. О синтезе систем оптимального управления электроприводами постоянного тока. *Электромеханика*, № 12, 1970.

2. Ильин О.П., Галкин А.Л. Синтез оптимальных по быстродействию позиционных следящих приводов с ограниченными фазовыми координатами. *Приборостроение*, № 8, 1971.

3. Ильин О.П., Галкин А.Л. О быстродействии позиционного электропривода с двумя управляющими воздействиями. *Энергетика*, № 1, 1971.

4. Ильин О.П., Галкин А.Л. О быстродействии позиционного электропривода с инерционным усилителем. *Энергетика*, № 6, 1971.

5. Ильин О.П., Галкин А.Л. Следящий привод. Изобретение по заявке № 1444226/18-24, кл.21с,46/50. Решение от 8.9.1971.

6. Ильин О.П., Галкин А.Л. О квазиоптимальном управлении позиционным электроприводом. Материалы к XXVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности, Минск, 1970.

7. Ильин О.П., Галкин А.Л. К вопросу реализации оптимальных процессов в позиционных следящих приводах при учете чувствительности САУ. Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике. Минск, 1970.

8. Ильин О.П., Галкин А.Л. Вопросы реализации оптимального по быстродействию процесса в электроприводе при помощи задержанных обратных связей. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания "Современные системы автоматического управления электроприводами", Ленинград, 1971.

9. Ильин О.П., Галкин А.Л. Вопросы реализации оптимального управления позиционной следящей системой с электродвигателем постоянного тока. Тезисы докладов IV Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем. Ташкент, 1971.