

Министерство высшего и среднего специального  
образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

---

Анхимюк Вячеслав Леонтьевич

ТЕОРИЯ И ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ  
СКОРОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА  
(05.09.03. Электрооборудование)

Диссертация на русском языке

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

М и н с к    1 9 7 3

Работа выполнена на кафедре "Электрооборудование и автоматизация промышленных установок" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

И.И. Петров,

доктор технических наук, профессор

Ю.А. Сабинин,

доктор технических наук, профессор

П.И. Чинаев

Ведущее предприятие: ЭИММС.

Автореферат разослан " " мая 1973 г.

Защита состоится 8 июня 1973 г. в 9 час. 30 мин. на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте, ауд. 317, корп. 2.

Зверенный и скрепленный печатью отзыв на автореферат в двух экземплярах просим направлять по адресу: г. Минск, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт. Ученному секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БИИ.

Ученый секретарь Совета,  
канд.техн.наук, доцент

Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ

Технической основой автоматизации производственных механизмов является автоматизированный электропривод. Современный этап развития электропривода характеризуется созданием рациональных систем регулируемого электропривода постоянного и переменного тока. Развитию этого направления способствует разрабатываемая в течение многих лет фундаментальная теория автоматического управления и регулирования. В промышленных электроприводах находят все большее применение системы оптимального управления.

Для резкого увеличения темпов внедрения автоматизированного электропривода, как одной из наиболее важных для народного хозяйства автоматических систем управления технологическими процессами, необходимо решение ряда задач.

Одним из важных направлений в решении этих задач является дальнейшее развитие теории автоматизированного электропривода. Современный автоматизированный электропривод представляет собой электромеханическую систему, предназначенную для осуществления процессов управления, обеспечивающих высокую точность отработки заданных законов движения, перемещений рабочих органов, а также стабилизацию координат системы.

В ряде производственных механизмов и, в частности, металлорежущих станках используется регулируемый электропривод, требующий высокой степени стабилизации скорости при возмущающих воздействиях. В связи с этим возникает необходимость в построении совершенных регуляторов, обеспечивающих требуемые динамические характеристики системы электропривода (повышение быстродействия и стабильность его работы). Развитию и совершенствованию регулируемого электропривода способствовали работы таких научно-исследовательских, проектных и учебных институтов как ВНИИэлектропривод, ЭНИМС, Тяжпромэлектропроект, МЭИ, ЛЭТИ, ЛПИ и др. В литературе большое количество работ посвящено построению и исследованию систем регулируемого в широких пределах электропривода постоянного тока с различного рода преобразователями.

**Анализ работ, ведущихся по созданию систем стабилизации регулируемого электропривода в СССР и за рубежом показывает большое разнообразие структурных решений, методов построения структур и определения параметров регуляторов этих систем. Единным подходом к структурному синтезу рациональных систем стабилизации непрерывного и дискретного действия могли бы служить методы оптимизации структуры и параметров электропривода, основанные на вариационных методах с учетом ограничения фазовых координат. Эти методы не получили еще должного развития применительно к построению систем, процессы которых определяются главным образом возмущающим воздействием нагрузки.**

Между тем, использование этих методов при построении структур автоматизированного электропривода в этом случае приводит к возможности получения принципиально новых рациональных решений для статических, астатических и комбинированных (инвариантных) систем с регуляторами непрерывного действия и релейными регуляторами, работающими в скользящем (автоколебательном) режиме. Особенностью этих систем является высокая точность воспроизведения заданных законов движения при приложении возмущающих воздействий, стабильность и в ряде случаев более простая, по сравнению с известными системами, реализация структурных решений.

К числу недостатков многих промышленных электроприводов относится их высокая чувствительность к изменению параметров объекта управления, "расчетные" значения которых проектировщик вынужден выбирать еще в начальной стадии синтеза систем. Значения этих параметров могут отклоняться от "расчетных" и в процессе эксплуатации системы. Подобные отклонения могут привести к значительным искажениям процесса регулирования, а в некоторых случаях и к потере системой устойчивости. Попытки решения задачи понижения чувствительности системы к вариациям параметров путем введения контуров самонастройки приводят к сложным, не оправдывающим себя решениям. Поэтому перспективным является создание таких систем, нечувствительность к вариациям параметров которых является их структурным свойством. В этом аспекте представляет интерес исследование структурной чувствительности различных систем автоматизированного электропривода, а также разработка принципов построения малочувствительных систем.

Важной задачей является построение систем, обладающих необходимой помехозащищенностью. Основным источником помех, проникающих в цепь основного воздействия по каналу главной обратной связи являются измерительные устройства (датчики), которые генерируют эти помехи вследствие несовершенства их конструкции и передают в цепь обратной связи помехи, обусловленные дискретностью преобразователя. Одним из путей решения этой задачи является ограничение частоты среза системы и введение в закон регулирования независимого от состояния координат управления, позволяющего оптимизировать переходный процесс при неизменном значении частоты среза системы относительно тракта главной обратной связи. Представляет интерес наиболее простой процесс формирования дополнительного управления. Поэтому целесообразно рассмотреть задачу оптимизации управления как в классе кусочно-непрерывных, так и в классе непрерывных функций на базе методов оптимального управления.

Ряд актуальных проблем, связанных с дальнейшим совершенствованием регулируемого электропривода обуславливает постановку в работе следующих основных задач:

1. Развитие теории и построение рациональных систем регулируемого электропривода в режиме автоматической стабилизации скорости при возмущающих воздействиях, на базе методов оптимального управления.

2. Разработка методов структурного синтеза, построение и исследование малочувствительных систем автоматизированного электропривода к изменению в широких пределах параметров объекта управления.

3. Построение помехозащищенных систем автоматизированного электропривода высокого быстродействия и точности в режиме автоматической стабилизации скорости.

Помимо решения поставленных задач в работе нашли отражение такие важные вопросы, как развитие частотных и аналитических методов применительно к синтезу систем электропривода при возмущающих воздействиях, исследование коммутации в глубокорегулируемом электродвигателе при изменении тока якоря и вопросы, связанные с оценкой и анализом процессов движения систем электропривода.

## Г л а в а I

### ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ИХ ОЦЕНКА

Система автоматической стабилизации скорости представляет собой совокупность объекта управления (электропривод совместно с механизмом) и регулятора. Электропривод состоит из электродвигателя постоянного тока, регулируемого по цепи якоря и преобразователя. В качестве силовых преобразователей переменного тока в постоянный могут быть использованы электромашинные, вентильные и магнитно-вентильные преобразователи. Основное внимание в работе уделяется построению систем с вентильными преобразователями, выполненными на транзисторных элементах, либо тиристорах, с импульсным и фазовым управлением.

В работе обосновывается возможность рассмотрения, при структурном синтезе, вентильного преобразователя совместно с системой управления как инерционного звена, а двигателя совместно с преобразователем как линейной модели третьего порядка. В случае применения в качестве преобразователя электромашинного усилителя объект рассматривается как линейная модель четвертого порядка.

При построении современных систем автоматизированного электропривода стремятся к максимальному использованию ресурсов установленного электрооборудования. В связи с этим процессы, связанные с обработкой заданных законов движения должны протекать при предельных значениях физических величин, допустимых по условиям нормального функционирования объекта управления. Для систем автоматической стабилизации скорости двигателя характерна задача формирования переходного процесса приложении внешнего возмущающего воздействия (нагрузки). В этом случае формирование процесса регулирования должно производиться с учетом ограничений фазовых координат объекта, исходя из условий коммутации в двигателе, возможных перенапряжений пре-

образователя и ускорений производственного механизма. Для обеспечения нормальной коммутации в двигателе необходимо ограничение тока главной цепи  $i$  и его производной  $\frac{di}{dt}$ . Ограничение ускорения механизма эквивалентно ограничению динамического тока и, следовательно, тока главной цепи. Поэтому, при рассмотрении в данной главе предельных диаграмм переходных процессов и в дальнейшем учитывается три вида ограничений — тока главной цепи  $i$ , его производной  $\frac{di}{dt}$  и э.д.с. преобразователя  $e_n$ . В работе рассмотрены предельные диаграммы фазовых координат для конкретного электропривода, представляющие собой функции времени.

Для количественной оценки ограничения  $\frac{di}{dt}$  в работе исследована коммутация в регулируемом двигателе при изменении тока якоря. Чрезмерное увеличение  $\frac{di}{dt}$  может вызвать нарушение коммутации, так как вследствие наличия вихревых токов в дополнительных полюсах машины магнитный поток коммутирующей э.д.с. отстает от тока якоря.

Большинство работ, рассматривающих вопросы коммутации при изменениях тока якоря ограничивается случаями, когда электродвигатель работает при номинальной, либо повышенной угловой скорости. В работе рассмотрено влияние изменения тока якоря на процесс коммутации при регулировании скорости двигателя вниз от основной. Для упрощения анализа принято, что ток якоря в период коммутации изменяется по прямолинейному закону.

Падение напряжения под сбегающим краем щетки может быть представлено в виде

$$U^* = \frac{i_K^* + I_{ao}^* + K_i T_K \tau}{1 - \tau}, \quad (I)$$

где  $i_K^*$  — относительное значение тока коммутируемой секции, определяемое из решения дифференциального уравнения, составленного для контура коммутации;

$I_{ao}^*$  — относительное начальное значение тока параллельной ветви;

$K_i$  — коэффициент, характеризующий скорость изменения тока в  $I_H/c$ ;

$T_K$  — период коммутации;

$\tau$  — относительное значение времени  $\tau = \frac{t}{T_K}$ .

**Выражение (I)** справедливо до тех пор, пока  $u < 25B$ . Когда напряжение  $u$  становится равным  $25B$ , оно, согласно исследованиям М.П.Костенко, остается в дальнейшем до конца периода коммутации неизменным, а ток  $i_k^*$  изменяется по закону, определяемому новым дифференциальным уравнением.

Качество коммутации удобно оценивать по типовым графикам, представляющим собой зависимость степени искрения  $S_n$  от фактора искрения  $\varphi_n$ . Последний рассчитывается по приведенной в работе формуле и зависит от конструктивных данных машины и значения разрываемого тока, равного разности величин тока якоря и коммутируемой секции в конце периода коммутации ( $\tau = 1$ ). Анализ результатов, полученных при исследовании коммутации в двигателе показывает, что процесс при заданной величине тока якоря в конце периода коммутации зависит как от угловой скорости двигателя, определяющей продолжительность периода коммутации, так и от скорости изменения тока якоря  $k_i = \frac{1}{I_n} \frac{di}{dt}$ . Однако, влияние угловой скорости значительно больше влияния  $k_i$ . Если принять, что предельное допустимое значение  $k_i$  при номинальных значениях скорости и тока двигателя составляет для крупных двигателей 15-20  $I_n/c$ , а для двигателей малой мощности 30-40  $I_n/c$ , то при диапазоне регулирования скорости вниз в пределах  $D \leq 5$  значения  $k_i$  могут быть повышены приблизительно пропорционально диапазону регулирования скорости. При уменьшении скорости двигателя в диапазоне  $D > 5$  удовлетворительное качество коммутации может быть достигнуто при любом практически достижимом  $k_i$ .

В работе предложен косвенный метод оценки качества переходных процессов статических и астатических систем при возмущающих воздействиях непосредственно по передаточной функции (п.ф.) системы. Метод позволяет оценить переуправление (динамический выброс скорости) и время регулирования по интерполяционным соотношениям и разработанным типовым графикам, приведенным в работе. Погрешность в определении показателей качества регулирования этим методом не превышает 5-7%.

## Г л а в а П

### СИНТЕЗ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Одним из наиболее распространенных методов классического синтеза одноконтурных систем автоматического управления электроприводами является метод логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ). При синтезе регуляторов многоконтурных систем целесообразно применять аналитические методы. Эти методы в достаточной мере разработаны для случая, когда основным воздействием системы является задающее воздействие. В работе предложены методы ЛЧХ и аналитические методы для расчета корректирующих устройств систем автоматической стабилизации скорости, основным воздействием которых является возмущение.

В этом случае в качестве расчетной рассматривается структурная схема электропривода, с отрицательной обратной связью по скорости при задающем воздействии  $U_{\text{з}} = 0$ , входным воздействием которой является возмущение.

Процесс регулирования скорректированной системы при возмущающем воздействии существенно зависит от желаемой передаточной функции или ЛАХ, положенных в основу синтеза. Поэтому их выбор производится в соответствии с требованиями к статической точности, качеству процесса регулирования и фильтрующим свойствам системы. При выборе желаемых п.ф. или ЛАХ следует учитывать и ограничения фазовых координат.

Выбор желаемой ЛАХ связан с определением допустимой частоты среза системы  $\omega_c$ . Высокий уровень частоты среза может привести к значительному расширению полосы пропускания частот и, следовательно, прохождению через регулятор и систему искажающих помех, вызванных конструктивным несовершенством элементов системы и, кроме этого, к уменьшению запаса устойчивости по фазе  $\gamma$ , из-за наличия незначительных инерционностей в системе, неучтенных расчетом.

При ограничении  $\omega_c$ , желаемая ЛАХ, имеющая наклон в среднечастотной зоне 20 дБ/дек, характеризуется двумя изломами левее частоты среза.

П.ф. замкнутой статической системы, соответствующая желаемой ЛАХ может быть записана в виде

$$\varphi_f = \frac{\gamma_c (T_2 p + 1)}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (2)$$

где

$$T_2 = \frac{1}{\mu \lambda \omega_c}; \quad a_2 = \frac{1}{\lambda \omega_c^2}; \quad a_1 = \frac{1 + \mu \lambda}{\lambda \omega_c}; \quad \mu = \frac{\omega_2}{\omega_1} < 1; \quad \lambda = \frac{\omega_1}{\omega_c} < 1.$$

Здесь:  $\omega_1, \omega_2$  - частоты, соответствующие точкам излома желаемой ЛАХ левее частоты среза  $\omega_c$ ;

$T_2$  - постоянная времени, соответствующая частоте  $\omega_2$ ;

$\lambda$  и  $\mu$  - параметры желаемой ЛАХ;

$\gamma_c = \frac{\Delta \theta}{I_c R_0} = \frac{1}{1 + \beta}$  - относительное статическое отклонение э.д.с. (угловой скорости) двигателя замкнутой системы;

$\beta$  - коэффициент усиления системы.

Из (2) видно, что переходный процесс характеризуется перерегулированием  $\sigma$ , которое увеличивается с уменьшением  $\omega_c$ .

Для упрощения инженерных расчетов при проектировании систем стабилизации электропривода в работе построен ряд номограмм  $\sigma = f(\lambda)$ ;  $t_p = f(\lambda)$ ;  $i = f(\lambda)$ ;  $\frac{di}{dt} = f(\lambda)$ ;  $f_c = f(\lambda)$  при различных значениях  $\mu$ , которые позволяют найти распределение коэффициентов полиномов желаемой п.ф. замкнутой системы при заданных показателях качества регулирования и ограничениях тока главной цепи и его производной, частоты среза разомкнутой системы и запаса устойчивости по фазе допустимыми по условиям нормального функционирования системы значениями. Аналогичные номограммы построены для случаев технического оптимума и кратных корней характеристического уравнения желаемой п.ф.

Предложены расчетные эквивалентные структурные схемы, соответствующие желаемой п.ф. статической и астатической систем электропривода, существенно упрощающие их анализ и синтез.

Рекомендуемый в работе подход к решению задачи синтеза корректирующих устройств независимо от места их включения исключает необходимость проверочных расчетов переходных процессов,

так как благодаря учитываемым ограничениям, позволяет получить процесс регулирования, близкий к оптимальному. Метод универсален по отношению к системам электропривода с любым диапазоном регулирования и заданной статической точностью.

Для получения астатической системы следует структуру статической системы дополнить контуром интегрирования. Желаемая п.ф. астатической системы имеет вид

$$\Phi_f = \frac{\nu_c p (T_2 p + 1)}{\nu_c \theta T_2 p^3 + (\nu_c \theta + T_1) p^2 + (1 + \alpha_n T_1) p + \alpha_n}, \quad (3)$$

где  $T_1$  - постоянная времени, соответствующая частоте  $\omega$ , (точке излома желаемой ЛАХ);

$\theta$  - электромеханическая постоянная времени привода;  
 $\alpha_n = \frac{1}{T_n}$  - величина, обратная постоянной времени контура интегрирования.

Синтез астатической системы производится в два этапа. Сначала синтезируется контур статического регулирования аналогично предыдущему. Затем определяется значение  $\alpha_n$ , исходя из наиболее благоприятного распределения корней характеристического уравнения п.ф. (3). Наиболее благоприятным распределением полюсов функции (3) будет такое, при котором вещественная часть комплексно-сопряженных корней равна мнимой, а вещественный корень близок по своему значению к вещественной части комплексно-сопряженных корней. В этом случае может быть получено минимальное динамическое отклонение угловой скорости при максимальном быстродействии. Предложен метод решения поставленной задачи, основанный на использовании поля корней.

Экспериментальные исследования показывают, что 1) динамический выброс скорости в астатической системе при  $\nu_c = 0,1$  составляет  $\nu_{ма} = 0,716 \nu_{мс}$ , а при  $\nu_c = 0,01$ ,  $\nu_{ма} = 0,71 \nu_{мс}$ , где  $\nu_{мс}$  - динамический выброс в статической системе, что согласуется с расчетом; 2) быстродействие астатической системы практически на 10-20% меньше быстродействия статической системы. Эта разница уменьшается по мере увеличения коэффициента усиления системы.

Предлагаемые в работе аналитические методы синтеза систем стабилизации основываются на сопоставлении действительной п.ф. системы относительно возмущающего воздействия и желаемой п.ф.

**Иванову п.ф.** предложено находить исходя из минимума интегральной квадратичной оценки. Она представляет собой экстремаль второго порядка. При использовании аналитического метода расчета задается структура и место включения корректирующих устройств. Дальнейшая процедура сводится к определению параметров корректирующих звеньев. Рассмотрено два случая - метод синтеза систем с последовательным корректирующим устройством, когда требуемый по условиям статизма коэффициент усиления сравнительно невелик ( $\beta = 10-20$ ) и метод синтеза систем с последовательно-параллельной коррекцией, обладающих свойством сохранять устойчивость при бесконечно большом коэффициенте усиления. В обоих случаях в качестве корректирующих элементов используются разработанные автором дифференциаторы, позволяющие благодаря неглубокой положительной обратной связи осуществить дифференцирование, близкое к идеальному. Дифференциаторы могут быть выполнены на базе элементов УБСР.

### Г л а в а   Ш

#### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ С НЕЗАВИСИМОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЦЕПЬЮ

Замкнутые системы управления электроприводом характеризуются наличием помех, генерируемых измерительными устройствами в цепи обратной связи, которые могут существенно повлиять на процесс регулирования. Одним из способов ограничения их влияния является уменьшение частоты среза системы за счет введения корректирующих контуров.

Для уменьшения максимального динамического отклонения скорости и уменьшения времени регулирования при снижении частоты среза предложено вводить в закон регулирования независимое от состояния координат управление, формируемое в момент приложения нагрузки. Благодаря тому, что это управление не связано с измерением координат системы, прохождение инструментальных и других помех, возникающих в элементах объекта управления по каналу данного воздействия исключено.

В работе разработаны методы определения структуры и параметров корректирующих (функциональных) элементов в цепи независимого управляющего воздействия. Для получения закона движе-

ния системы при возмущающем воздействии близкого к оптимальному, задача решается в классе кусочно-линейных и непрерывных управлений.

В работе показано, что при определении управления в классе кусочно-линейных функций целесообразно исходить из предельных диаграмм, определяемых заданными ограничениями фазовых координат. Если в качестве ограничиваемых координат принять  $i \leq I_m$ ,  $k_i \leq a$  и  $e_n \leq E_{nm}$ , то траектория изображающей точки будет лежать на поверхности, ограничивающей область допустимых состояний объекта по соответствующим координатам. Поэтому, целесообразно искать управление исходя непосредственно из законов движения системы, определяемых операторным уравнением при принятых ограничениях. Решение поставленной задачи рассматривается для системы, объект которой описывается и.ф. (2). Операторное уравнение системы в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 1,а

$$\Delta \bar{e} = \frac{\bar{u}(T_1 p + 1) - \bar{f}(T_2 p + 1)}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (4)$$

где  $\Delta e$  - приращение э.д.с. (скорости) двигателя;

$u$  - независимое управление;

$f = \frac{I_c R_0}{T + \beta}$  - возмущающее воздействие;  $T_1 = \frac{1}{\lambda \omega_c}$ .

В работе найдены законы движения системы  $\Delta e = f(t)$ ;  $\Delta e_n = f(t)$ ;  $i = f(t)$  при различных видах ограничений: 1)  $\frac{di}{dt}$ ; 2)  $\frac{di}{dt}$ ,  $i$ ; 3)  $\frac{di}{dt}$ ,  $e_n$  и 4)  $\frac{di}{dt}$ ,  $i$  и  $e_n$  и определены моменты переключений.

Операторное изображение независимого управления в общем виде может быть определено из (4) и представлено зависимостью

$$\bar{u} = \frac{u(-0)T_1 + \Delta \bar{e}(a_2 p^2 + a_1 p + 1) - \Delta e'(-0)(a_2 p + a_1) - \Delta e'(-0)a_2}{T_1 p + 1} + \frac{\bar{f}(T_2 p + 1) - f(-0)T_2}{T_1 p + 1}, \quad (5)$$

где  $u(-0)$ ,  $\Delta e(-0)$ ,  $\Delta e'(-0)$ ,  $f(-0)$  - предельные значения величин при  $t = -0$ .

Формула (5) позволяет получить операторные выражения управлений и зависимостей  $u = f(t)$  для процессов при перечис-

ленных видах ограничений. Реализация законов управления состоит в формировании сигнала, являющегося кусочно-непрерывной функцией времени. При этом формирующее устройство (релейного типа) должно обеспечивать найденный закон изменения управления на каждом интервале и автоматически производить переключения в требуемые моменты времени.

Анализ ограничений, накладываемых на систему при возмущающих воздействиях показывает, что в подавляющем большинстве случаев основным является ограничение по  $\frac{di}{dt}$ . Действительно, при работе двигателя без ослабления потока возбуждения и при отсутствии персгрузок ( $i \leq I_H$ ) ограничение по току  $i$  для большого класса электроприводов не имеет существенного значения. Что касается э.д.с. преобразователя, то расчеты показывают, что при выборе допустимых значений  $a$  при практически используемых параметрах электропривода ( $T = 0,0005-0,05$  с и  $\frac{\theta}{T} = 5-20$ ) перенапряжения преобразователя не превосходят 20% от его номинального значения. Следовательно, если предположить, что зарегулированному на 20% по отношению к номинальному режиму вентильного преобразователя соответствует номинальное напряжение двигателя, то специального ограничения  $e_n$  можно не рассматривать. Возможны два способа реализации закона управления при ограничении  $\frac{di}{dt}$  - при помощи схемы, осуществляющей управление в функции состояния координат системы и схемы с "независимым" формированием управления.

В работе рассмотрены оба способа и показано, что наиболее простым является второй. Для формирования требуемого алгоритма управления вторым способом на вход функционального блока формирователя подается сигнал пропорциональный воздействию. Этот сигнал поступает от дифференциатора, на выходе которого в момент приложения ступенчатого возмущающего воздействия возникает напряжение, пропорциональное производной э.д.с. (скорости) двигателя и, следовательно, значению  $f$ . Сигнал  $f$  фиксируется в запоминающем устройстве до окончания процесса регулирования. Разработанное логическое устройство, генерирующее импульсы в требуемые моменты переключений и соответствующие функциональные блоки обеспечивают формирование управления, оптимизирующего переходный процесс.

Более простым получается регулятор непрерывного управления. Отыскание оптимальной структуры и параметров регулятора

при введении некоторых ограничений, накладываемых на систему, производится методом вариационного исчисления в области операторов. Введем в операторное уравнение (\*) обозначения:  $\bar{u}(T_0 p + 1) = S$ ;  $\bar{f}(T_2 p + 1) = Q$ ;  $a_2 p^2 + a_1 p + j = W$ . Задача оптимизации состоит в приближении к процессу, выражаемому оператором цели преобразования

$$\varphi_0 = \frac{\Delta \bar{e}}{-\bar{f}} = \frac{\alpha T_0 p + 1}{T_0 p + 1} \quad (6)$$

при соблюдении ограничений тока главной цепи  $i = I_M$  и его производной  $a$ . В качестве критерия оптимизации используется условие  $J_1 + K^2 J_2 = \min$ , где  $J_1$  - интегральная квадратичная ошибка скорости (э.д.с. двигателя):

$$J_1 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \left( -\varphi_0 \bar{f} - \frac{S-Q}{W} \right) \left( -\varphi_0^* f^* - \frac{S^*-Q^*}{W^*} \right) dp = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \psi_1 dp, \quad (7)$$

$J_2$  - интегральное квадратичное значение динамического тока, характеризующее ограничение тока главной цепи

$$J_2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \frac{S-Q}{W K_0} \frac{S^*-Q^*}{W^* K_0^*} dp = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \psi_2 dp, \quad (8)$$

$K$  - множитель лагранжа.

Условие экстремума  $\frac{\partial \psi_1}{\partial S^*} + K^2 \frac{\partial \psi_2}{\partial S^*} = N(p)$  дает возможность получить п.ф. формирователя в цепи управления в виде

$$K_u = \frac{\bar{u}}{\bar{f}} = \frac{T_3 p (T_1 p + 1)}{(k \theta p + 1)(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (9)$$

Параметры  $T_3$ ,  $T_1$ ,  $k$  и  $T_0$  определяются исходя из условий отсутствия в момент  $t=0$  скачка тока и ограничения  $\frac{1}{I_M} \frac{di}{dt}$  значением  $a$ , предложенным в работе методом. Формирование алгоритма управления в этом случае осуществляется в функции величины  $f$ , пропорциональной возмущающему воздействию, а сам формирователь реализуется с помощью активных или пассивных корректирующих элементов.

**Сопоставление методов формирования процессов управления** в классе кусочно-непрерывных и непрерывных управлений показывает целесообразность использования второго метода, позволяющего реализовать алгоритм управления с помощью более простых технических средств.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования и полученные результаты позволяют рекомендовать практическое использование оптимизирующих регуляторов с независимым управлением в промышленных электроприводах, где нежелательны большие динамические отклонения скорости в процессе наброса (сброса) нагрузки при необходимости ограничения частоты среза системы допустимым значением с целью фильтрации помех, распространяющихся по каналам регулирующих обратных связей.

## Г л а в а I V

### ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ С ЛИНЕЙНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

При оптимизации систем автоматической стабилизации скорости электропривода в работе применен метод динамического программирования, который базируется на минимизации интегрального квадратичного функционала качества. Метод позволяет сравнительно просто осуществить аналитическое конструирование регулятора, т.е. найти на первом этапе проектирования его структуру.

Вторая часть задачи заключается в определении параметров регулятора, обеспечивающих оптимальность управления в смысле минимума функционала. При этом, для получения необходимых показателей качества регулирования должны быть введены в рассмотрение дополнительные уравнения связи, отражающие зависимость между весовыми множителями функционала  $\lambda_i$  и коэффициентами передачи регулятора  $K_i$ . При больших порядках уравнения объекта управления решение этой задачи представляется сложным, вследствие своей неоднозначности.

Несмотря на значительное количество работ по оптимальному управлению, они в большинстве случаев ограничиваются рассмотрением систем с объектами второго порядка, для которых зави-

симости между  $\lambda_i$  и  $K_i$  определяются достаточно просто. Между тем, при оптимизации рассматриваемых в работе систем электропривода приходится иметь дело с объектами, описываемыми уравнениями третьего и более высоких порядков, для которых методы определения параметров оптимального регулятора разработаны недостаточно. В литературе мало внимания уделено оптимизации систем электроприводов статического, комбинированного и астатического регулирования. В связи с этим в диссертации решаются следующие задачи: 1) создание единого подхода к оптимизации структур регуляторов статических, комбинированных и астатических систем с объектами третьего и более высоких порядков; 2) установление зависимостей между коэффициентами передачи обратных связей и весовыми множителями функционала, позволяющих оптимизировать переходный процесс при возмущающих воздействиях; 3) разработка программы решения нелинейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов квадратичной формы на ЦВМ "Минск-22"; 4) разработка упрощенных методов определения коэффициентов передачи квазиоптимального регулятора.

Уравнения объекта составляются в преобразованной системе координат, начало которой совпадает с точкой фазового пространства, характеризующей конечное установившееся состояние системы. Это дает возможность получить общий вид управления при регулировании по отклонению и возмущению. При статическом регулировании объект с преобразователем  $n$ -го порядка (рис. 1б) описывается уравнениями

$$\dot{z}_1 = \theta_{12} z_2; \quad \dot{z}_2 = \theta_{21} (-z_1 - z_2 + z_3); \quad \dots; \quad \dot{z}_n = -\theta_{nn} z_n + m u', \quad (10)$$

где  $\theta_{12}, \theta_{21}, \theta_{33}$  - величины, обратные постоянным времени  $\theta, T$  и  $T_n$ ;  $z_1 = x_1 + \nu_c F$ ;  $z_2 = x_2 - F$ ;  $z_{n+1} = x_n - F(1 - \nu_c)$  - преобразованные координаты;  $x_1, x_2, x_3$  - исходные координаты;  $F$  - возмущение;  $m = \frac{\beta_n}{T_n}$ ;

$$u' = u - \frac{F(1 - \nu_c)}{\prod_{k=1}^{n-3} \beta_k} = u - \frac{F(1 - \nu_c)}{\beta_n};$$

$u$  - управление,  $\beta_k$  - коэффициент усиления элементов преобразователя;  $\nu_c$  - относительное статическое отклонение скорости двигателя. Управление  $u'$  должно переводить систему

из начального состояния  $t = 0$  ;  $z_1 = v_c F$  ;  $z_2 = -F$  ;  
 $z_n = \frac{(1-v_c)F}{\beta_n}$  в начало координат. Алгоритм управления, минимизирующего функционал

$$J = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^n (\lambda_i z_i^2 + cu'^2) dt, \quad (II)$$

в исходной системе координат имеет вид

$$u = - \sum_{i=1}^n K_i x_i + \left[ -K_1 v_c + K_2 + K_3 (1-v_c) + \dots + \frac{1-v_c}{\beta_n} \right] F. \quad (I2)$$

Из выражения (I2) видно, что в зависимости от способа формирования управления возможно построение двух различных систем электропривода: системы с регулированием по отклонению и комбинированной системы с регулированием по отклонению и возмущению. При регулировании по отклонению выражение в скобках  $n$  следует положить равным нулю. Полученное соотношение  $u = - \sum_{i=1}^n K_i x_i$  позволяет построить регулятор с полным числом измеряемых координат (рис. I а). Коэффициенты передачи обратных связей  $K_i$  могут быть найдены на основании функционального уравнения Беллмана. Однако определение численных значений  $K_i$  представляет трудности, так как они существенно зависят от весовых множителей функционала  $\lambda_i$ , которые, вообще говоря, не заданы.

Для выбора весовых множителей предложен метод последовательной оптимизации контуров системы путем постепенного усложнения функционала. При этом весовые множители, найденные для более простого случая, используются в последующем, более сложном виде функционала. Такой путь упрощает решение задачи, хотя и приводит к квазиоптимальному, по отношению к желаемому процессу, решению. В рассматриваемом случае целесообразно поставить выбор весовых множителей в зависимость от качества процесса регулирования при возмущающем воздействии. Сначала оптимизируется простейший контур с координатами  $x_1$  и  $x_2$  (без учета инерционности преобразователя), описываемый уравнением второго порядка. Задавшись желаемым процессом регулирования, который, например, должен удовлетворять условиям технического оптимума и ограничению  $\frac{1}{I_H} \frac{di}{dt} = a$ , можно легко определить весовые множители функционала  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Значения

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  используются для определения коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  при оптимизации системы с объектом третьего порядка. Для их определения необходимо составить шесть нелинейных алгебраических уравнений. Варьируя в некоторых пределах весовой множитель  $\lambda_3$ , выбирается такой вариант распределения коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , который в наибольшей степени приближает процесс к желаемому и т.д. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений может быть выполнено на ЦВМ по разработанной в диссертации программе для машины "Минск-22". Подбор наиболее благоприятного распределения коэффициентов обратных связей производился на аналоговой вычислительной машине. Полученный в результате аналитического конструирования регулятор содержит в цепях отрицательных обратных связей по скорости, току и э.д.с. преобразователя лишь безынерционные усилители и прост в реализации и наладке.

В вентильном глубокорегулируемом электроприводе с фазовым управлением осуществление обратной связи по координате  $x_3$ , вследствие значительных пульсаций э.д.с. преобразователя, может представить трудности. В этом случае можно заменить обратную связь по координате  $x_3$  другой, эквивалентной обратной связью, не требующей измерения выходной э.д.с. преобразователя. Следовательно, при постановке задачи об оптимальном управлении должно быть учтено ограничение числа измеряемых координат. Заменяя обратную связь по координате  $x_3$  обратной связью по производной тока ( $\dot{x}_2$ ) и используя, например, для объекта третьего порядка соотношения  $z_1 = x_1 + \nu_c F$ ;  $z_2 = x_2 - F$ ;  $z_3 = \frac{\dot{x}_2}{b_{21}} = -x_1 - x_2 + x_3$ , получим уравнения объекта в преобразованной системе координат

$$\dot{z}_1 = b_{12} z_2; \quad \dot{z}_2 = b_{21} z_3; \quad \dot{z}_3 = -b_{33} z_1 - b_{22} z_2 - b_{32} z_3 + m u'. \quad (13)$$

В работе приведены основные соотношения, позволяющие оптимизировать структуру и параметры регулятора в соответствии с изложенной методикой и в этом случае. Аналогично решается задача и для объекта четвертого и более высокого порядка. Приводятся особенности конструирования регулятора в случае, когда преобразователь представляет собой колебательное звено.

В целях упрощения расчетов коэффициентов обратных связей оптимальной структуры системы электропривода разработан более

простой инженерный подход к решению этой задачи. Важным свойством полученной в результате оптимизации структуры является способность сохранять устойчивость при бесконечном увеличении коэффициента усиления системы  $\beta_n$ . При достаточно большом  $\beta_n$  действительная п.ф. системы относительно возмущающего воздействия может быть заменена вырожденной п.ф., порядок характеристического уравнения которой на единицу меньше порядка действительного характеристического уравнения. Переходный процесс, соответствующий вырожденной п.ф. практически не будет отличаться от действительного. Используя условия технического оптимума и ограничения производной  $\frac{di}{dt}$ , нетрудно найти необходимые значения коэффициентов передачи обратных связей.

При полном и ограниченном числе измеряемых координат для системы с инерционным преобразователем соответственно

$$\begin{aligned} K_1 &= \chi(1 - \alpha'_2); \quad K_2 = \chi(\alpha'_1 - \alpha'_2); \quad K_3 = \chi\alpha'_2, \\ K_1 &= \chi; \quad K_2 = \chi\alpha'_1; \quad K_3 = \chi\alpha'_2, \end{aligned} \quad (I4)$$

где  $\alpha'_2 = \frac{a_2}{\theta T}$ ;  $\alpha'_1 = \frac{a_1}{\theta}$ ;  $\chi = \frac{1 - \nu_c}{\beta_n(\nu_c - a_i)}$ ;  $a_1, a_2$  — коэффициенты вырожденного (при  $\beta_n \rightarrow \infty$ ) характеристического уравнения.

Исследования системы электропривода с оптимальным регулятором, параметры которого определены точным (на ЦБМ "Минск-22") методом и по приближенным формулам (I4), показали, что осциллограммы переходных процессов практически не отличаются друг от друга.

В работе на базе метода динамического программирования разработаны способы построения и определения параметров астатических регуляторов систем автоматической стабилизации скорости.

Сравнительный анализ осциллограмм переходных процессов статической и астатической системы показывает, что при рекомендуемом выборе постоянной времени контура интегрирования быстроедействие при астатическом регулировании практически не ниже быстрогодействия статической системы, а динамический вынос скорости уменьшается в 1,25-1,3 раза.

Полученные структурные решения систем, оптимизированных методом динамического программирования, могут быть рекомендованы для широкого класса регулируемых электроприводов, работающих

в режиме автоматической стабилизации скорости при возмущающих воздействиях. К их преимуществам относится простота реализации регулятора, упрощение наладки и эксплуатации, а также малая чувствительность этих систем к изменению параметров объекта управления.

## Г л а в а У

### ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ С РЕЛЕЙНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

В литературе за последнее время появилось значительное количество работ, посвященных исследованию систем с релейным управлением. Это объясняется прежде всего возможностью улучшить в определенном отношении динамические свойства системы за счет использования скользящего режима, сделать ее малочувствительной к изменению параметров объекта управления.

В настоящее время электроприводы с релейным управлением еще мало изучены, разработки рациональных структур и их реализация находятся в стадии становления. Поэтому на современном этапе развития и совершенствования регулируемого электропривода теория, построение и исследование систем электроприводов с релейным управлением представляет как теоретический, так и практический интерес. В работе решаются следующие основные задачи: 1) разработка методов построения статических, комбинированных и астатических систем электропривода с релейным управлением в скользящем режиме и исследование их статических и динамических свойств при возмущающих воздействиях с учетом ограничения фазовых координат; 2) установление зависимостей, позволяющих определить условия существования устойчивых скользящих режимов; 3) разработка инженерных методов расчета параметров релейного регулятора; 4) исследование влияния "неидеальности" скользящих режимов на динамику электропривода с релейным управлением.

Задача аналитического конструирования регулятора состоит в том, чтобы из множества допустимых управлений  $|U| \leq U_M$  выбрать оптимальное управление, при котором интегральный квадратичный функционал качества

$$J = \int_0^T \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i^2 \right) dt \quad (15)$$

при движении из заданной точки в начало координат имел наименьшее возможное значение.

При оптимизации статической системы методом динамического программирования, выбирая функцию Ляпунова в виде квадратичной формы  $U = \langle X Q X \rangle$ , получим управление в виде  $u = -u_M \text{sign} \Psi$ , где  $\Psi = \langle M_T Q X \rangle$ ,  $M_T$  - транспонированная матрица коэффициентов управляющих воздействий.

В случае астатической системы объект содержит интегрирующее звено, не охваченное обратной связью. Это обстоятельство усложняет процесс оптимизации, так как определение матрицы  $Q$  по заданной матрице функционала качества  $\Lambda$  невозможно вследствие того, что матрица  $\Lambda$  оказывается вырожденной. В этом случае производится преобразование координат, в которых функция Ляпунова  $v = \langle y, q, y \rangle + z_1^2$  а  $\psi = \langle M_1^T Q y \rangle + a_0' z_1$ .

Для объекта статической системы, описываемого уравнениями (13), алгоритм управления может быть записан в виде  $u = -u_M \text{sign} \Psi$ , где  $\Psi = q_{13} z_1 + q_{23} z_2 + q_{33} z_3$ . Коэффициенты  $q_{13}$ ,  $q_{23}$ ,  $q_{33}$  должны быть выбраны таким образом, чтобы замкнутая система удовлетворяла заданному качеству регулирования при возмущающем воздействии. Если исходить из технического оптимума, то при выборе коэффициентов обратных связей  $q_{13}$ ,  $q_{23}$ ,  $q_{33}$  (рис. 2, б) необходимо выполнение равенства  $q_{23}^2 \theta_{21} = 2 \theta_{12} q_{13} q_{33}$ . При этом должно быть использовано условие ограничения производной тока по времени

$3 \pi a q_{23} = 4 q_{13} \theta_{12}$ . Совместное решение этих уравнений дает возможность рассчитать коэффициенты  $q_{13}$  и  $q_{23}$  при произвольно выбранном  $q_{33}$ .

В заключительной части главы анализируется влияние различных факторов, в том числе инерционности преобразователя и системы управления, на "неидеальность" скользящего режима. Указываются методы определения амплитуды и частоты автоколебаний в релейной системе в зависимости от различных факторов.

## Г л а в а У I

### ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ

Одной из актуальных задач современного автоматизированного электропривода является проблема чувствительности системы к изменению параметров объекта.

В работе рассмотрены возможные оценки чувствительности. При сравнении структурных решений предложено использовать среднеквадратичную интегральную чувствительность

$$S_{\mu} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} S^2(t) dt}, \quad (16)$$

где  $t_p$  - время регулирования. Чувствительность системы к вариациям параметра уменьшается с уменьшением  $S_{\mu}$ . Значение  $S_{\mu}$  может быть определено по осциллограмме функций чувствительности  $S(t)$ , либо, если снята кривая интегральной чувствительности  $J = \int S dt$  по совместным осциллограммам  $S(t)$  и  $J(t)$ . Значение  $S_{\mu}$  может быть определено и непосредственно по кривой  $\int S^2 dt = f(t)$ , снятой с помощью квадратора и интегратора включенных последовательно на выход моделей чувствительности.

В работе значительное внимание уделено сравнительному анализу структурной чувствительности различных существующих и предлагаемых систем стабилизации скорости электропривода к параметрам  $\beta_n, T_n, T, \theta$  по снятым осциллограммам функций чувствительности.

М.В. Мееровым было показано, что в структурах, допускающих бесконечное увеличение коэффициента усиления, уход параметров от расчетных значений незначительно влияет на форму переходного процесса. Естественно при этом предположить, что чем меньше разность порядков  $q$  между действительным и вырожденным (при  $\beta \rightarrow \infty$ ) характеристическими уравнениями системы, тем в меньшей степени при изменении параметров переходный процесс будет отклоняться от исходного. Основываясь на этом положении все системы регулируемого электропривода с линейными регуляторами разделены на три класса:  $q=3$ ,  $q=2$  и  $q=1$ . Такая классификация дает возможность сравнить структурные чувствительности различных систем электропривода, пользуясь критерием среднеквадратичной интегральной чувствительности. При этом исходные процессы регулирования и расчетные параметры объекта управления для всех структур приняты одинаковыми. В качестве объекта управления рассмотрен двигатель постоянного тока совместно с инерционным преобразователем. За исходный процесс принят технический оптимум.

К классу  $q = 3$  относятся структуры систем с последовательно и параллельно включенными корректирующими устройствами. Эти системы, как показывают исследования, обладают наибольшей структурной чувствительностью (табл. I) по всем перечисленным параметрам.

К классу  $q = 2$  относится система подчиненного регулирования. Обладая сравнительно высокими показателями качества регулирования, простотой и способностью сохранять устойчивость при бесконечном увеличении коэффициента усиления преобразователя  $\beta_n$ , схема имеет высокую чувствительность к изменению коэффициента усиления регулятора скорости  $\beta_p$ . Исследования показывают, что даже при наиболее выгодном сочетании параметров изменение  $\beta_p$  в 4 раза выводит систему из состояния устойчивости.

К параметру  $\theta$  чувствительность та же, что и для класса систем  $q = 3$ , а к  $T_n$  и  $T$  меньше (табл. I).

Для снижения чувствительности к  $\beta_p$  предложено перенести узел суммирования контура регулирования тока таким образом, чтобы обратная связь по току охватывала и регулятор скорости (рис. 2, а). При этом в цепь обратной связи необходимо включить звено с коэффициентом передачи  $1/\beta_p$ . В этом случае система не теряет устойчивости и при бесконечном увеличении  $\beta_p$ .

К классу  $q = 1$  относятся системы, оптимизированные методом динамического программирования. В работе исследована схема с ограниченным числом измеряемых координат.

Как видно из табл. I последняя система обладает наименьшей чувствительностью к изменениям параметров объекта  $\beta_n, T_n, T$ .

Таблица I

| $q = 3$  |          | $q = 2$  |          |             |          | $q = 1$  |          |
|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| $S_{ux}$ | $S_{uf}$ | исходная |          | преобразов. |          | $S_{ux}$ | $S_{uf}$ |
|          |          | $S_{ux}$ | $S_{uf}$ | $S_{ux}$    | $S_{uf}$ |          |          |
| 0,593    | 0,64     | 0,593    | 0,77     | 0,32        | 0,10     | 0,173    | 0,099    |
| 0,26     | 0,12     | 0,25     | 0,077    | 0,22        | 0,13     | 0,18     | 0,085    |
| 0,452    | 0,396    | 0,35     | 0,35     | 0,29        | 0,37     | 0,173    | 0,085    |
| 0,593    | 0,593    | 0,593    | 0,593    | 0,48        | 0,48     | 0,505    | 0,505    |

Для всех рассматриваемых систем были сняты осциллограммы переходных процессов при расчетном и измененном в 2 раза значении рассматриваемых параметров, которые подтверждают результаты и выводы, полученные при исследовании чувствительности этих систем.

Общим недостатком всех рассмотренных структур является невозможность обеспечить существенное снижение чувствительности выходной координаты к изменению электромеханической постоянной времени  $\theta$ .

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в работе, показали, что одним из эффективных методов снижения чувствительности системы электропривода к изменению параметров, в том числе и к  $\theta$ , является компенсационный метод, обеспечивающий инвариантность системы к параметрическим возмущениям. Метод основывается на идентичности, при нулевых начальных условиях, структурной формы левой части дифференциальных уравнений объекта и уравнений чувствительности, вследствие линейности уравнений объекта относительно координат  $x_i$  и  $\dot{x}_i$ .

Задача структурного синтеза сводится к нахождению условий, реализация которых позволяет обеспечить параметрическую инвариантность системы к изменению параметров  $\alpha_j$ . Известно, что реализация условия инвариантности возможна в случае, если в схеме имеется не менее двух каналов распространения данного возмущения. Второй канал распространения каждого из параметрических возмущений может быть создан только искусственно. В работе приведены построения измерительных контуров, контролирующих возмущения при изменении параметров  $\beta_n$ ,  $T_n$ ,  $T$  и  $\theta$  для системы электропривода, оптимизированной методом динамического программирования при неполном числе измеряемых координат. Найдены п.ф. компенсирующих элементов в каналах распространения возмущения, обеспечивающих параметрическую инвариантность системы до  $\varepsilon$ . Реализация п.ф. компенсирующих элементов может быть выполнена на пассивных корректирующих звеньях либо на элементах УБСР.

Исследование на экспериментальных моделях полученных структурных решений показало высокую эффективность компенсационного метода понижения чувствительности системы к параметрам объекта.

Осциллограммы переходных процессов при задающем и возмущающем воздействиях структуры электропривода, изображенной на рис.2 в показывает, что уменьшение  $\theta$  в два раза при отсутствии контура компенсаций приводит к резкому изменению характера переходного процесса относительно переходного процесса при расчетном значении  $\theta$ . Введение контура компенсации обуславливает переходный процесс при том же изменении  $\theta$ , практически не отличающийся от исходного.

Осциллограммы тока и скорости для схемы с контуром, компенсирующим изменение  $T$ , показывают, что процесс при увеличении  $T$  в два раза практически не отклоняется от исходного. Что касается инвариантности выходной координаты к  $\beta_n$  и  $T_n$ , то, как показывают переходные процессы, увеличения  $T_n$  более чем в 2 раза и  $\beta_n$  в десять раз на переходном процессе практически не отражаются.

В работе рассмотрена параметрическая инвариантность астатических систем. Даны методы построения структур электропривода и исследованы переходные процессы в этих системах при изменении тех же параметров, что и в предыдущем случае. Осциллограммы переходных процессов при задающих и возмущающих воздействиях, полученные для этих систем показывают, что при отсутствии компенсирующего контура изменение  $T$  в два раза приводит к резко колебательному характеру процесса, граничащему с автоколебаниями. Введение компенсирующего контура дает возможность получить процесс, не отличающийся от исходного.

Одним из эффективных средств решения проблемы структурного синтеза системы, для которых нечувствительность к изменению параметров объекта управления должна определяться их структурными свойствами, является оптимизация этих систем с учетом чувствительности фазовых координат  $u_{ij}$  к вариациям параметров. В работе рассматривается решение этой задачи методом динамического программирования. Определение структуры регулятора, обеспечивающего оптимальность процесса, базируется на минимизации функционала

$$J = \int_0^{\infty} \left[ w(x) + cu^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{ij} u_{ij}^2 \right] dt, \quad (17)$$

где  $w(x) = \lambda_1 x_1^2 + \lambda_2 x_2^2 + \dots + \lambda_n x_n^2$  - функция состояния координат;  
 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, c, \mu_{ij}$  - весовые множители функционала;  
 $U_{ij}$  - функции чувствительности.

Для использования функционального уравнения Беллмана определяются функции и уравнения чувствительности, которые рассматриваются как дополнительные координаты объекта. Если число основных координат  $n$ , а число функций чувствительности равно  $l = km$ , где  $k$  - число координат, чувствительность которых учитывается, а  $m$  - число варьируемых параметров, то полное число координат будет  $N = n + l$ . Так, например, при  $k=3$  и  $m=2$  к уравнениям объекта добавляется 6 уравнений чувствительности.

Для электропривода с инерционным преобразователем, на основании функционального уравнения Беллмана в преобразованной системе координат получено управление, минимизирующее функционал качества, в виде:

$$u' = -\frac{m}{2c} \left( \frac{\partial v}{\partial z_3} - \frac{\partial v}{\partial z_9} \right). \quad (18)$$

Управление в функции исходных координат

$$u = -\sum_{i=1}^9 K_i x_i + \left( \frac{1-\nu c}{\beta_n} - K_1 \nu c + K_2 + K_3 - K_3 \nu c \right) F. \quad (19)$$

При регулировании по отклонению второй член в выражении для управления отсутствует. Координаты  $x_4, \dots, x_9$  представляют собой функции чувствительности, которые могут быть сняты с моделей чувствительности, построенных по уравнениям, полученным непосредственно из структурной схемы объекта. Выразив основные координаты объекта в функции возмущения в виде операторных выражений и дифференцируя эти координаты по варьируемым параметрам  $\beta_n, T_n, T$  и  $\theta$  можно легко найти функции чувствительности, выраженные через координаты объекта и операторные выражения моделей чувствительности. Приведенные в работе соотношения дают возможность построить структуру регулятора, обеспечивающего стабильность работы системы (рис. 3, а).

Последующий этап оптимизации состоит в определении коэффициентов регулятора  $K_i$ , которые могут быть найдены методом, описанным в гл. IV.

Исследования полученной структуры показывают, что чувствительность выходной координаты к изменению различных параметров не одинакова. Она тем ниже, чем большим числом обратных связей охвачено динамическое звено, содержащее данный параметр. Таким образом, наибольший эффект понижения чувствительности рассматриваемым методом достигается к параметрам  $\beta_n$ ,  $T_n$  и  $T$ . В меньшей степени снижается чувствительность выходной координаты к изменениям электромеханической постоянной времени  $\theta$ .

В большинстве практических случаев не требуется снижения чувствительности всех координат системы ко всем параметрам объекта. Оказывается достаточным уменьшить чувствительность одной из координат к изменению одного или нескольких параметров, либо нескольких координат к одному параметру. В этих случаях задача построения регулятора и определение его параметров упрощается.

В работе найдены структура и параметры регулятора, обеспечивающего понижение чувствительности системы электропривода с безинерционным преобразователем к электромагнитной постоянной времени главной цепи  $T$ . В этом случае регулятор содержит четыре обратных связи - две по основным координатам и две по дополнительным, представляющим собой функции чувствительности. Последние снимаются с соответствующих моделей чувствительности. Определения коэффициентов обратных связей  $K_1, K_2, K_3, K_4$  произведено методом последовательного усложнения функционала (гл. IV). Решение 10 алгебраических нелинейных уравнений произведено на ЦВМ "Минск-22", по разработанной для этого случая программе. По выполненным вариантным решениям было выбрано такое распределение коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$ , при котором переходный процесс оказался близким к техническому оптимуму. Полученные осциллограммы скорости двигателя при изменении  $T$  в два раза показали, что переходный процесс практически не отличается от исходного.

В работе исследованы и даны методы построения малочувствительных систем электропривода с релейным управлением в скользящем режиме. Найденные системы дифференциальных уравнений, описывающие скользящие режимы этих электроприводов позволили построить эквивалентные структурные схемы, удобные для анализа их динамических свойств. Из этих уравнений и структурных схем следует, что системы не чувствительны к изменениям постоянной

времени преобразователя. При соответствующем выборе коэффициентов обратных связей системы в скользящем режиме оказываются более грубыми и к изменениям постоянной времени главной цепи  $T$ .

Осциллограммы переходных процессов статической и астатической систем электропривода в скользящем режиме при набросе и сбросе нагрузки показывают, что при увеличении постоянной времени  $T_n$  в 5 раз или  $T$  в 4 раза процессы регулирования не отличаются от исходных.

В работе исследованы частотные методы построения малочувствительных систем, базирующиеся на условии, при котором чувствительность замкнутой системы не ниже чувствительности разомкнутой системы.

Комплекс вопросов, рассмотренных в данной главе, позволяет рекомендовать полученные результаты для использования при разработке малочувствительных систем промышленных электроприводов.

## Г л а в а УП

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПО ВОЗМУЩЕНИЮ

Среди многих проблем теории инвариантности наиболее важным для автоматизированного электропривода направлением является развитие систем комбинированного управления. Для большого класса систем целесообразно рассматривать вопросы инвариантности к нагрузке и параметрической инвариантности совместно. В работе эти задачи решаются на базе теории оптимального управления.

Для построения комбинированной системы с линейным управлением используется метод динамического программирования, который приводит к управлению (I2), включающему в себя регулирование по отклонению и возмущению. Решение задач рассмотрено при непосредственном и косвенном, с помощью дифференциальной вилки, измерении возмущающего воздействия. Второй канал распространения возмущения создается искусственно и включает в себя компенсирующий элемент. При синтезе регулятора системы определена п.ф. компенсирующего элемента из условий абсолютной инва-

риантности. Однако, эта п.ф. физически нереализуема. При введении в знаменатель п.ф. оператора реализации система не обеспечивает абсолютной инвариантности. Оценка целесообразности введения компенсирующего элемента показывает, что стремление к абсолютной инвариантности в системе автоматизированного электропривода противоречит задачам формирования закона движения, учитывающего ограничения фазовых координат. Так как рассматриваемая структура представляет собой систему, сохраняющую устойчивость при бесконечном увеличении коэффициента усиления, то при достаточно большом коэффициенте усиления п.ф. компенсирующего элемента может быть принята равной единице. Требуемый закон управления при этом формируется за счет выбора передаточных коэффициентов обратных связей по координатам системы. Для определения коэффициентов обратных связей системы с объектом третьего порядка предложены достаточно простые соотношения, позволяющие решить задачу при полном и неполном числе измеряемых координат с учетом ограничений  $\frac{dl}{dt}$ . Приведены осциллограммы переходных процессов при возмущающем воздействии, показатели которых достаточно точно совпадают с расчетными значениями  $\alpha$

$u_m$ .

В работе рассмотрено построение комбинированной системы электропривода с релейным управлением в скользящем режиме, обладающей параметрической инвариантностью к электромеханической постоянной времени  $\theta$  и пониженной чувствительностью к постоянной времени  $T_n$  и  $T$  объекта управления третьего порядка (рис.3,б). Оптимальная структура регулятора получена методом динамического программирования. Фазовая траектория в рассматриваемом случае состоит из участков двух видов: с кусочно-постоянным управлением и участка скользящего движения. Для инвариантной системы управление имеет вид

$$u = \frac{F}{\beta_n} - u_m \operatorname{sign} \left[ q_{13} x_1 + q_{23} (x_2 - \Gamma) + q_{33} \frac{1}{\beta_{21}} \dot{x}_2 \right]. \quad (20)$$

Анализ влияния слагаемого  $\frac{F}{\beta_n}$  на процесс регулирования при кусочно-непрерывном управлении показывает, что время движения системы под влиянием этого управления до попадания в скользящий режим достаточно мало. Оно оказывается в 5-10 раз меньше постоянной времени  $T_n$ . Поэтому можно считать, что вся траек-

тория движения изображающей точки соответствует скользящему движению. В работе получена система уравнений скользящего движения комбинированной системы и построена соответствующая ей эквивалентная структурная схема.

При конструировании регулятора, обеспечивающего параметрическую инвариантность к  $\theta$ , введен второй канал распространения возмущения, содержащий компенсирующий элемент, п.ф. которого найдена из условия абсолютной инвариантности. Показано, что компенсирующий элемент и в этом случае можно выполнить в виде пропорционального звена. Тогда условие инвариантности чувствительности к параметрическому возмущению будет иметь такой же вид, как и условие инвариантности координаты  $x_1$  к основному возмущению  $F$ . Если для измерения основного возмущения использовать тот же косвенный метод, что и для измерения параметрического возмущения, то реализацию обоих условий инвариантности можно осуществить в одной и той же структурной схеме. В этом случае система в переходном режиме будет инвариантна с точностью до  $\epsilon$  как к основному, так и к параметрическому возмущению. Выражение управления (20) показывает, что выделение возмущения  $F$  структурно не обязательно. Достаточно измерить разность  $x_2 - F$ , пропорциональную динамическому току ( $x_2 - F = \theta p x_1$ ). Вводя множители реализации в соответствующие п.ф. дифференциаторов, находим выражение управления, по которому строится структура регулятора. Для определения коэффициентов передачи обратных связей предложены соответствующие зависимости. Структура с релейным регулятором обеспечивает, как было показано выше, снижение чувствительности системы и к параметрам  $T_n$  и  $T$ .

Полученные осциллограммы переходящих процессов при возмущающем воздействии показывают, что уменьшение  $\theta$  в 2 раза и увеличение  $T_n$  и  $T$  в 4-5 раз практически не изменяет исходного процесса (при расчетном значении параметров).

В работе даны методы построения аналогичной системы с жестким ограничением  $\frac{di}{dt}$  путем введения в регулятор нелинейного элемента. Система в этом случае обладает более высоким быстродействием по сравнению с предыдущей.

Помимо рассмотренных комбинированных систем в работе дан синтез комбинированной системы с одинаковой чувствительностью относительно задающего и возмущающего воздействий. Приведена

ее структура и результаты исследований. Система может быть использована для электроприводов, работающих одновременно в режиме отработки заданных законов движения и стабилизации.

## Г л а в а УШ.

### ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На базе метода динамического программирования в предыдущих разделах был получен ряд оптимизированных структур систем электропривода с релейным и непрерывным управлением. В работе показана возможность реализации регуляторов этих систем на операционных усилителях и произведено исследование динамических и статических свойств систем электроприводов на лабораторных макетных установках.

Система электропривода с релейным управлением в скользящем режиме содержит силовой вентиляльный преобразователь, выполняющий одновременно и функции реле (рис.4). Силовое транзисторное реле выполнено так, что его характеристика практически не имеет зоны нечувствительности. Можно считать, что такое реле представляет собой идеальное двухпозиционное реле. Для построения оптимального релейного регулятора в скользящем режиме использованы две обратные связи - по скорости и току главной цепи в предположении, что система управления силового транзисторного реле безинерционна. Их коэффициенты передачи настраиваются с помощью операционных усилителей. Однако, для этой цели могут быть использованы и элементы УБСР. Как и следовало ожидать, из-за неучтенной инерционности системы управления преобразователем устанавливается не "идеальный" скользящий, а автоколебательный режим с частотой 1000 Гц. Несмотря на "неидеальность" скользящего режима, как показывают осциллограммы, снятые на моделирующей установке и на макетном образце, автоколебательный режим позволяет получить переходный процесс при возмущающем воздействии, практически не отличающийся от процесса в режиме скольжения. Система и в режиме автоколебаний с конечной частотой остается грубой по отношению к изменению параметров объекта управления.

В лаборатории были также исследованы оптимизированные системы вентильных электроприводов с импульсным и фазовым управлением, регуляторы которых выполнены на безинерционных операционных усилителях, включенных в соответствующие цепи обратных связей по скорости, току главной цепи и э.д.с. преобразователя. Приведены соответствующие осциллограммы переходных процессов при возмущающих воздействиях, снятые на макетных установках. Осциллограммы, полученные на макетных установках, практически мало отличаются от осциллограмм, полученных на аналоговых моделирующих машинах. Коэффициенты обратных связей оптимальных регуляторов определялись методом, изложенным в гл. IV.

В последующем изложении данной главы приведены и исследованы рациональные вентильные преобразователи фазового и импульсного управления, а также магнитно-вентильные преобразователи, разработанные при участии автора, которые могут быть рекомендованы к применению в системах электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости, работающих в режиме автоматической стабилизации скорости.

В заключительной части главы дан сравнительный анализ различных систем автоматической стабилизации скорости регулируемого электропривода и приведены рекомендации по их применению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной работы и выводы могут быть сформулированы в следующем виде:

1. В работе получили дальнейшее развитие вопросы теории автоматизированного электропривода на базе современных методов оптимального управления.

2. Показано, что одним из эффективных методов оптимизации систем электропривода является метод динамического программирования. При аналитическом конструировании регуляторов систем с полным и ограниченным числом измеряемых координат этим методом получен общий вид алгоритма управления, соответствующий регулированию по отклонению и возмущению. Структура регулятора системы с объектом любого порядка при регулировании по откло-

нению и полном числе измеряемых координат реализуется при помощи жестких отрицательных обратных связей, содержащих безынерционные усилители. Осуществление, наладка и эксплуатация систем с подобными регуляторами проще, чем существующих систем, содержащих корректирующие элементы интегрирующего и дифференцирующего действия.

3. Предложен метод точного определения параметров оптимизированной структуры линейного регулятора статических и астатических систем. Для этой цели разработана программа расчета на ЦВМ "Минск-22". Приводятся упрощенные методы определения параметров регулятора, которые могут быть рекомендованы для использования в практике инженерных расчетов.

4. При аналитическом конструировании релейного регулятора методом динамического программирования целесообразно решение задачи в матричной форме.

5. В работе определена область существования скользящего режима для различных систем электропривода с релейным регулятором. Дан метод определения коэффициентов обратных связей регулятора для систем с полным и ограниченным числом измеряемых координат. Исследованы системы с жестким и нежестким ограничением фазовых координат. Исследования разработанных систем электропривода с релейным управлением даже в "неидеальном" скользящем режиме показали их высокую точность и надежность работы.

6. Разработаны методы аналитического конструирования регулятора комбинированных систем с линейным и релейным управлением, обладающих инвариантностью к внешним и внутренним (параметрическим) возмущениям на базе метода динамического программирования. Показано, что в электроприводах, вследствие необходимости ограничения фазовых координат в процессе регулирования, не следует стремиться к реализации условий абсолютной инвариантности. Исследование комбинированной системы с релейным управлением показывает, что она в скользящем режиме обеспечивает значительное снижение чувствительности выходной координаты к электромагнитным постоянным времени главной цепи и силового преобразователя и инвариантность до  $\varepsilon$  к электромеханической постоянной времени привода. Эти системы могут найти применение в установках, требующих высокой стабильности работы электропривода при наличии внешних и параметрических возмущений.

7. В работе сформулированы теоретические предпосылки, разработан метод построения и произведены исследования комбинированной системы с одинаковой чувствительностью относительно задающего и возмущающего воздействий. Система может быть использована для электроприводов, работающих одновременно в режиме отработки заданного закона движения и стабилизации, к стабильности переходных процессов которых при изменении параметров объекта не предъявляются повышенных требований.

8. Разработаны теоретические основы и методы построения статических и астатических систем электропривода, обладающих малой чувствительностью к вариациям параметров объекта управления, а также систем, обеспечивающих инвариантность к коэффициенту усиления и постоянным времени системы электропривода. Получены практически реализуемые структурные решения с линейными и релейными регуляторами, позволяющие сохранить стабильность процесса регулирования при изменении параметров объекта управления в широких пределах.

Разработан метод сравнительного анализа структурной чувствительности, основанный на использовании критерия среднеквадратичной интегральной чувствительности.

Предложен способ понижения структурной чувствительности систем подчиненного регулирования.

9. Разработана метод структурного синтеза малочувствительной системы электропривода, основанный на минимизации интегрального квадратичного функционала, включающего в себя векторы состояния фазовых координат, управления и функций чувствительности. Исследование системы электропривода с линейным регулятором, построенным по этому принципу на моделирующей машине показало, что переходные процессы сохраняют стабильность при изменении параметров, по отношению к которым введены функции чувствительности. Однако благодаря необходимости использования в этом случае моделей чувствительности, регулятор оказывается сравнительно громоздким. Подобные системы целесообразны для электроприводов с повышенными требованиями к стабильности регулирования.

10. Анализ способов понижения чувствительности системы к изменению параметров объекта управления показывает, что наиболее перспективными являются системы электропривода с линейным регулятором, оптимизированные методом динамического про-

граммирования, системы с параметрической инвариантностью и системы с релейным управлением в скользком режиме.

11. Разработан метод построения желаемой ЛАХ и метод синтеза корректирующих устройств системы электропривода при возмущающих воздействиях, основанный на использовании логарифмических частотных характеристик разомкнутой относительно возмущения системы. Построены номограммы для определения параметров желаемой ЛАХ, соответствующей техническому optimumу и кратным корням характеристического уравнения замкнутой системы. Разработаны аналитические методы расчета корректирующих устройств.

12. Дано теоретическое и практическое решение одной из проблем, связанной с фильтрацией помех, распространяющихся по основным каналам регулирующих обратных связей путем ограничения частоты среза значением, при котором эти помехи в канал основного воздействия не пропускаются. Неизбежное ухудшение при этом показателей качества регулирования (увеличение динамического выброса скорости и времени регулирования) компенсируется за счет введения независимого от состояния координат управления, подаваемого на вход системы в момент приложения возмущающего воздействия. Найдены оптимальные законы изменения независимого управления в классах кусочно-линейных и непрерывных функций, предложены средства их реализации.

13. С целью анализа законов движения систем стабилизации предложен метод построения предельных диаграмм, исследована коммутация в регулируемом двигателе при изменении тока якоря, разработан способ определения показателей качества регулирования непосредственно по передаточной функции системы.

14. Рассмотрены вопросы реализации элементов и систем электропривода, приведены разработанные схемы рациональных силовых вентильных (с фазовым и импульсным управлением) и магнитно-вентильных преобразователей.

15. Все методы, связанные с построением и расчетом систем стабилизации регулируемого электропривода разработаны до стадии их практического использования.

По основным вопросам работы сделаны доклады на Всесоюзных совещаниях и конференциях, в том числе на IV и V Всесоюзных конференциях по автоматизированному электроприводу, на Всесо-

визном научно-техническом совещании "Современные системы автоматического управления электродвидами", на IV Всесоюзной конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, на IV Всесоюзном совещании по теории инвариантности и теории чувствительности автоматических систем и др.

Ряд предложенных в работе методов вошел в учебные пособия, написанные при участии автора.

Отдельные положения диссертации получили применение в практике промышленных предприятий.

Содержание диссертации отражено в работах автора:

#### И. К н и г и

1. А н х и м ю к В.Л. Теория автоматического регулирования. Минск, "Высшая школа", 1964.

2. А н х и м ю к В.Л. Теория автоматического регулирования. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. Минск, "Высшая школа", 1968.

3. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О.П. Автоматическое управление электродвидами. Минск, "Высшая школа", 1965.

4. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О.П. Расчет систем автоматизированного электродвида с электромашинными усилителями. Минск, "Высшая школа", 1966.

5. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О.П. Проектирование систем автоматического управления электродвидами. Минск, "Высшая школа", 1971.

6. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О.П. Автоматизированный электродвида производственных и общепромышленных механизмов. Изд. БПИ, 1964.

7. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О.П. Системы автоматического управления электродвидами. Изд. БПИ, 1965.

8. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О.П. Расчет статических характеристик и переходных процессов в автоматизированном электродвида. Изд. БПИ, 1965.

## II. С т а т ь и

9. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. О коммутации в регулируемом электродвигателе при изменении тока якоря. "Электричество", 1969, № 12.

10. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П., Н о в и ц к а я В. А. О начальных условиях при расчете переходных процессов в системах электропривода. "Изв. вузов СССР - Электромеханика", 1971, № 9.

11. А н х и м ю к В. Л. Определение показателей качества регулирования по передаточной функции системы методом интерполяции. "Электроэнергетика", Республиканский межведомственный сборник, Минск, "Высшая школа", 1971.

12. А н х и м ю к В. Л. К вопросу оптимизации передаточных функций систем автоматического регулирования. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1968, № 12.

13. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. Синтез корректирующих устройств систем электромашинного управления. Изв. АН УзССР, сер. техн. наук, 1969, № 6.

14. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. Новый метод выбора параметров корректирующих устройств автоматизированных электроприводов. Труды IV Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу, т. I. М.-Л., "Энергия", 1965.

15. Г а г а р и н П. П., А н х и м ю к В. Л. Электропривод нажимных винтов прокатной клетки в системе двухмерного регулирования. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1971, № 7.

16. А н х и м ю к В. Л. О желаемой ЛАХ систем автоматической стабилизации скорости регулируемого электропривода. "Изв. вузов СССР - Электромеханика", 1970, № 5.

17. А н х и м ю к В. Л. Синтез астатических систем регулирования скорости электропривода. "Изв. вузов СССР - Электромеханика", 1969, № 12.

18. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. Л. Об улучшении динамических свойств регулируемого вентиляционного электропривода. "Электричество", 1968, № 6.

19. А н х и м ю к В. Л. О построении систем автоматической стабилизации скорости регулируемого электропривода. "Автомати-

зированный электропривод в народном хозяйстве", Труды У Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу, т. I. М., "Энергия", 1971.

20. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. Следящий электропривод с отрицательной обратной связью по тону и его производной. "Электротехника", 1970, № 6.

21. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П., П а н а с ю к В. И. Метод синтеза следящего электропривода. "Электроэнергетика", Республиканский межведомственный сборник, вып. I. Минск, "Высшая школа", 1971.

22. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. О синтезе систем автоматизированного электропривода при возмущающих воздействиях. "Автоматизированный электропривод производственных механизмов". Труды IV Всесоюзной конференции по автоматизированному электроприводу. М.-Л., 1965.

23. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П. Исследование тахометрического моста в качестве датчика скорости. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1962, № 3.

24. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П., Ш е й н а Г. П. Электромашинный усилитель как элемент системы автоматического управления. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1964, № 3.

25. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. Анализ систем обратных связей в автоматизированном электроприводе. "Изв. вузов СССР - Электромеханика", 1965, № 4.

26. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. Исследование автоматизированного электропривода с компенсирующими элементами на АБМ МН-7. Материалы II республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике. Минск, 1968.

27. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П., М и х е е в Н. Н. Применение решающих блоков в системах автоматической стабилизации скорости регулируемого электропривода. Материалы II республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике. Минск, 1968.

28. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. О рациональной структуре быстродействующих систем автоматизированного электропривода. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1967, № 12.

29. А н х и м ю к В. Л. , И л ь и н О.П. Расчет корректирующих устройств вентиляного электропривода с комбинированным управлением. "Электричество", 1970, № 12.

30. А н х и м ю к В. Л. Оптимальное управление системой автоматической стабилизации скорости с разомкнутой корректирующей цепью. "Электричество", 1972, № 5.

31. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. О применении "трансидинной" системы управления в регулируемом электроприводе. "Изв. вузов СССР - Электромеханика", 1969, № 6.

32. А н х и м ю к В.Л. Независимое управление оптимальных систем автоматической стабилизации скорости. Материалы к XXVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности. Минск, 1970.

33. А н х и м ю к В. Л. Оптимизация структуры и параметров корректирующих устройств в системах автоматической стабилизации скорости. Тезисы Всесоюзного совещания по современным системам автоматического управления электроприводами. Л., изд. ЛДНТП, 1971.

34. А н х и м ю к В. Л. Вопросы оптимального управления в системах автоматической стабилизации скорости. Материалы XXV научно-технической конференции БПИ совместно с работниками промышленности. Минск, изд. БПИ, 1969.

35. А н х и м ю к В. Л. Исследование на АВМ самонастраивающейся системы электропривода. Тезисы II республиканской конференции по применению вычислительной техники в электроэнергетике. Минск, 1970.

36. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П. Об одном методе построения структуры и выбора параметров САР с учетом чувствительности. Сб. "Теория инвариантности и теория чувствительности автоматических систем". Материалы IV Всесоюзного совещания. Киев, 1971.

37. А н х и м ю к В. Л. Оптимизация систем стабилизации скорости электропривода с учетом чувствительности к вариациям параметров. "Электричество", 1973, № 6.

38. А н х и м ю к В.Л., И л ь и н О. П. К вопросу понижения чувствительности систем управления электроприводами.

"Электротехника", 1973, № 3.

39. А н х и м ю к В.Л., О п е й к о О.Ф. Об оценке чувствительности САР к вариациям параметров объекта управления, "Электроэнергетика", Республиканский межведомственный сборник, вып. 3. Минск, "Высшая школа", 1973.

40. А н х и м ю к В. Л., О п е й к о О. Ф. Оптимизация релейной астатической системы в скользящем режиме. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1973, № 2.

41. А н х и м ю к В. Л. Построение систем автоматической стабилизации скорости регулируемого электропривода. Отчет по научно-исследовательской работе Г.Б.-69-270, выполненной в БПИ, зарегистрированной во Всесоюзном научно-техническом информационном центре за № 69035745, инв. № Б-196926, 1972.

42. А н х и м ю к Б. Л., М и х е е в Н. Н. Мостовые выпрямители с независимым управлением группами вентилях. Материалы I научно-технической конференции по электронике. Томск, 1969.

43. А н х и м ю к Б. Л., М и х е е в Н. Н. Коэффициент мощности мостового выпрямителя. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1960, № 6.

44. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н.Н. Повышение коэффициента мощности мостового выпрямителя. "Промышленность Белоруссии", 1967, № 12.

45. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н.Н. Анализ электромагнитных процессов в мостовом выпрямителе. "Электроэнергетика", Республиканский межведомственный сборник, вып. 2. Минск, "Высшая школа", 1971.

46. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н.Н. Обобщенное уравнение границы прерывистого тока выпрямителя. Материалы XXV научно-технической конференции БПИ совместно с работниками промышленности. Изд. БПИ. Минск, 1969.

47. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н.Н., Р о м а н о в В.В., Р а т к е в и ч Е.И. Исследование пульсаций Э.Д.С. в вентильном электроприводе постоянного тона с помощью АВМ. Тезисы III республиканской конференции по применению вычислительной техники в электроэнергетике. Минск, 1970.

48. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., М и х е е в Н. Н. Тиристорный выпрямитель для многодвигательного электропривода текстильных машин. Тезисы Всесоюзной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу в текстильной и легкой промышленности. М., "Информэлектро", 1970.

49. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н. Н., Р о м а н о в В. В. Тиристорный многодвигательный электропривод постоянного тока в текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности. Минск, БелНИИТИ, 1972.

50. А н х и м ю к В. Л., И л ь и н О. П., Ш е й н а Г. П., М и х е е в Н. Н. Одноканальная система управления выпрямителем с широким диапазоном регулирования напряжения. "Электротехника", 1970, № II.

51. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц к и й Э. Ф. Потери в двигателе постоянного тока при импульсном регулировании скорости вращения. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1972, № 2.

52. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц к и й Э. Ф. Рациональная система импульсного преобразователя для регулирования электропривода постоянного тока. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1970, № 4.

53. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц к и й Э. Ф. К вопросу выбора частоты коммутации напряжения в импульсной системе регулирования скорости двигателя постоянного тока. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1972, № 8.

54. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц к и й Э. Ф. Рациональный режим работы широтно-импульсного модулятора на транзисторах. Устройства преобразовательной техники, вып. 4. Киев, "Наукова думка", 1969.

55. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц к и й Э. Ф. О выборе режима управления транзисторным модулятором системы импульсного регулирования скорости двигателя постоянного тока. Материалы научно-технической конференции по электронике. Томск, 1969.

56. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц к и й Э. Ф. Расчет пульсаций скорости в импульсной системе регулирования с помощью ЦВМ. Тезисы III республиканской конференции по применению вычислительной техники в электроэнерге-

тине. Минск, 1970.

57. А н х и м ю к В. Л., Ш е й н а Г. П., Я к о в и ц - к и й Э. Ф. Рациональный широтно-импульсный модулятор на транзисторах. Материалы семинара по тиристорным электроприводам постоянного тока. Ленинград, Изд. ЛДНТП, 1970.

58. А н х и м ю к В. Л., Я к о в и ц к и й Э. Ф. Построение внешних характеристики магнитно-вентильного преобразователя с учетом обратного тока вентилей. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1969, № 8.

59. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н. Н., Я к о в и ц - к и й Э. Ф. Сравнительный анализ статических характеристик вентильного и магнитно-вентильного электропривода постоянного тока. "Электроэнергетика", Республиканский межведомственный сборник, вып. 2, "Высшая школа", 1971.

60. А н х и м ю к В. Л., К а р а у л ь н а я Л. Ф. Расчет переходных процессов нелинейных электромеханических систем. Тезисы IV Всесоюзной конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем. Ташкент, 1971.

61. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н. Н., Р о м а н о в В. В. Тиристорные выпрямители для многодвигательного электропривода. "Изв. вузов СССР - Энергетика", 1972, № 9.

62. А н х и м ю к В. Л., Г а г а р и н Ш. П. Об одной линейной системе выравнивания передаточных функций следящих электроприводов. "Изв. вузов СССР - Электромеханика", 1972, № 10.

63. А н х и м ю к В. Л., Я к о в и ц к и й Э. Ф. Реверсивный магнитно-вентильный привод с широким диапазоном регулирования скорости. "Электроэнергетика", Республиканский межведомственный сборник, вып. 3, "Высшая школа", 1973.

64. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н. Н., Р о м а н о в В. В. Тиристорные преобразователи с несколькими выходными напряжениями для многодвигательного электропривода постоянного тока. Материалы семинара "Автоматизированный электропривод". М., Изд. МДНТП, 1972.

### III. И з о б р е т е н и я .

65. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н.Н., Р о м а н о в  
В. В. Вентильный многодвигательный электропривод. Авт. свид.  
№ 3501121. "Бюлл. изобр.", 1972, № 26.

66. А н х и м ю к В. Л., М и х е е в Н.Н., Р о м а н о в  
В. В. Кольцевое пересчетное устройство. Решение Г.К. по делам  
изобретений и открытий при Совете Министров СССР о выдаче ав-  
торского свидетельства по заявке № 1678122/26-9 от 6.7.1971.

67. А н х и м ю к В. Л., Я к о в и ц к и й Э.Ф. Реверсив-  
ный магнитно-полупроводниковый усилитель. Авт. свид. № 291311.  
"Бюлл. изобр.", 1971, № 3.

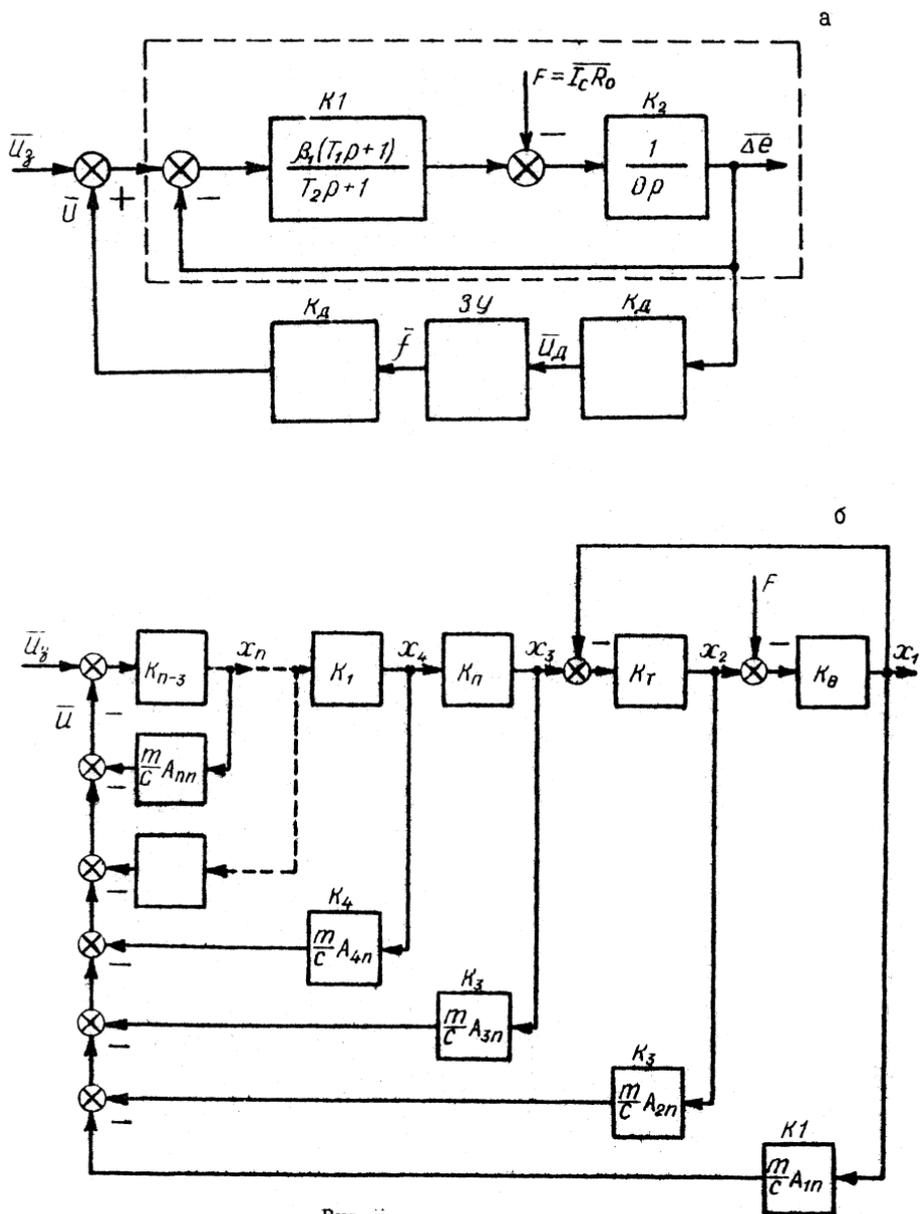


Рис. 1.



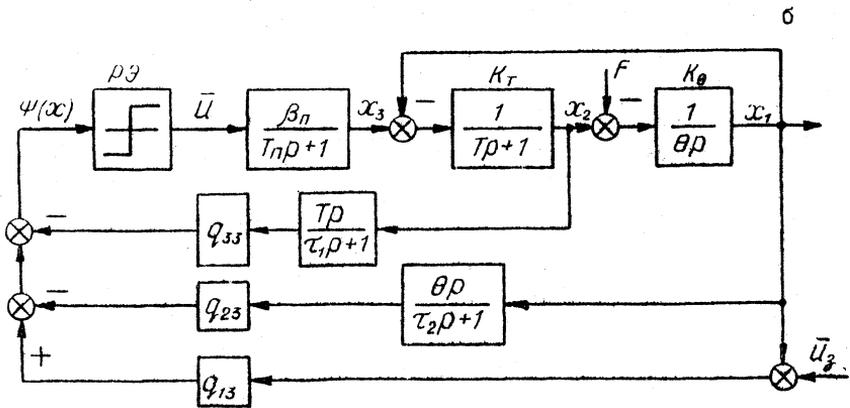
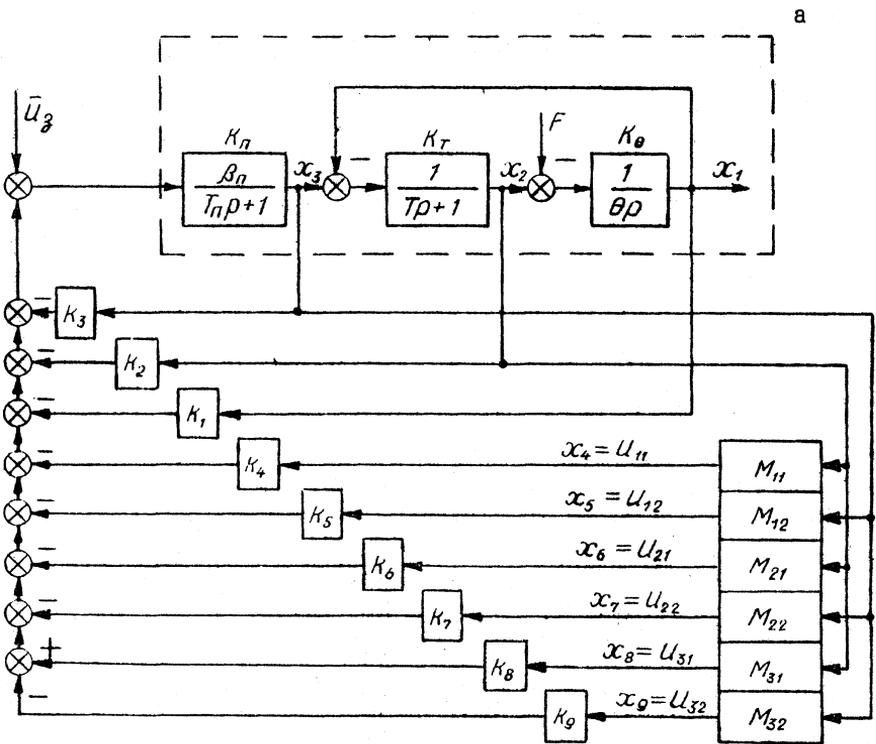


Рис. 3.

