

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

ШКОЛЫНИКОВ АНАТОЛИЙ ИЛЬИЧ

ПРИЦИПЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ  
СИСТЕМ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМ  
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФАЗОВЫМ  
РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

Специальность 05.13.14 - "Автоматическое  
управление и регулирование"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1973

Челябинский  
политехнический институт  
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена на кафедре общей электротехники Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент НОВИКОВ М.Н.

Официальные оппоненты:  
заслуженный деятель науки и  
техники РСФСР, доктор техни-  
ческих наук, профессор  
ЧЕРНОРУЦКИЙ Г.С.,

кандидат технических наук,  
доцент АГАФОНОВ Ю.П.  
Челябинское отделение ИИ  
"Тяжпромэлектропроект".

Автореферат разослан " " 1973 г.

Защита диссертации состоится " " 1974 г., в  
час., в аудитории на заседании Совета приборострои-  
тельного и энергетического факультетов Челябинского политехнического  
института им. Ленинского комсомола.

454044, Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, телефон 39-39-64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой  
диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать  
отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454044,  
г. Челябинск, 44, проспект им. В.И.Ленина, 76.

Ученый секретарь Совета  
доцент, кандидат технических  
наук

*Иванов*

(КОРОЛЕНКО Ю.А.)

В Директивах XXIV съезда КПСС предусмотрена дальнейшая интенсификация производства на основе совершенствования средств автоматики и оптимизации технологических процессов. В последние годы в нашей стране и за рубежом сделаны большие успехи в области теории и практики автоматического управления, а так же в направлении повышения качества автоматизации на основе использования оптимальных систем программного управления.

Задача оптимизации работы производственных агрегатов разбивается, как известно, на две самостоятельные задачи:

1. Нахождение оптимального закона управления объектом.
2. Разработка управляющего устройства (УУ), которое наилучшим образом реализует найденный закон управления объектом.

В настоящее время хорошо разработанный математический аппарат (вариационное исчисление, принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование) позволяет решить первую задачу, связанную с нахождением оптимальных законов управления объектом даже при наличии ограничений. Решение второй задачи сводится к разработке такого управляющего устройства, которое с наибольшей эффективностью воспроизводит найденный оптимальный закон управления.

В настоящее время при построении высокоточных систем воспроизведения широко используют принцип инвариантности, сформулированный акад. И.И.Лузином в результате обобщения найденных Г.В.Щипановым "условий компенсации" и развитый в трудах советских ученых В.С.Кулебакина, Б.Н.Петрова, А.И.Кухтенко, Е.А.Бессекерского, Б.М.Менского, Г.М.Уланова и др.

В этих трудах показаны широкие возможности компенсации ошибок с помощью компенсирующих сигналов по производным от задающего и возмущающего воздействий.

Однако построение инвариантных систем с помощью введения производных имеет ряд существенных недостатков:

1. Введение производных предполагает измерение возмущений, что не всегда возможно.
2. Только в некоторых случаях можно получить первую производную, а все последующие производные можно получить только приближенно.
3. При дифференцировании повышается уровень помех, что ограничивает возможность дальнейшего дифференцирования.

Это приводит к тому, что в общем случае удается достичь лишь частичной инвариантности.

В ряде часто встречающихся случаев выполнение условий инвариантности облегчается тем, что об управляемом процессе имеется достаточный объем априорной информации.

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев разработка САУ осуществляется с учетом возможности реализации оптимальной по одному из известных критериев работы объекта автоматизации.

Оптимизация системы предполагает нахождение программного изменения регулируемой координаты, что позволяет в свою очередь получить дополнительную априорную информацию о законе изменения регулируемой координаты и ее производных.

Целью данной работы являлось:

1. Разработка принципов построения оптимальных систем программного управления повышенной динамической точности за счет применения вместо труднореализуемых форсирующих звеньев нелинейных элементов и элементов самонастройки путем использования дополнительной априорной информации, возникающей в результате оптимизации.

2. Разработка инженерной методики нахождения вида нелинейного корректора для широкого класса систем промышленных электроприводов.

3. Осуществление технической реализации теоретических положений в системе программного управления тиристорным асинхронным электроприводом с фазовым регулированием скорости.

Основным методом исследования являлось сравнение различных систем автоматического управления на аналоговой вычислительной машине с последующей проверкой на реальном объекте.

Диссертация содержит 121 страницу текста, 63 рисунка, 47 осцилограмм и состоит из введения, четырех глав и приложения.

Глава I. Анализ существующих методов и путей повышения точности системы автоматического регулирования.

В первой главе отражена актуальность поставленной задачи, показана взаимосвязь двух показателей качества системы автоматического управления: оптимальности и точности.

В любой системе автоматического управления всегда присутствуют три составляющие процессов, определяющие три наиболее характерных подхода к синтезу САУ, которые называют детерминистским, стохастическим и аддитивным.

Первые два подхода применимы к автоматическим системам с достаточной априорной информацией, т.е. уравнения объекта и внешние воздействия либо их статистические характеристики должны быть известны.

Адаптивный подход дает возможность управления объектами при неполной и даже весьма малой априорной информации за счет использования информации, получаемой в процессе управления. В работе показано, что для получения предельной точности оптимальных САУ синтез САУ должен осуществляться с одновременным использованием детерминистского, стохастического и адаптивного подходов на основе разделения задачи оптимизации на задачу программного движения и задачу синтеза системы управления, осуществляющей реализацию программного движения.

Если движение объекта описывается системой дифференциальных уравнений  $\dot{X} = A(t) \cdot X + B(t) \cdot U + f(t)$ , (I)

где  $A(t) = \|a_{ij}(t)\|$  и  $B(t) = \|b_{ij}(t)\|$  матрицы, коэффициенты которых являются случайными функциями времени вследствие параметрических возмущений

$X$ ,  $U$ ,  $f$  - соответственно векторы управляемой координаты, управляющего и возмущающего воздействий;

при этом предполагается, что влияние внешнего и параметрических возмущений мало, и определители матриц имеют постоянную составляющую, равную среднему значению, т.е.

$$\left. \begin{array}{l} A(t) = A + \Delta A(t), \quad B(t) = B + \Delta B(t), \\ |\Delta A(t)|_{\max} \ll A, \quad |\Delta B(t)|_{\max} \ll B, \\ f(t) = f_0 + \dot{f}_0(t) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

то сначала выделяется программа как решение задачи Коши для уравнения

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + BU + f_0. \quad (3)$$

при начальном условии  $\bar{X}(0) = \bar{X}_0$ , а затем находится система уравнений движения объекта в окрестности программного движения

$$\dot{Z} = AZ + BW + \Delta f(t), \quad (4)$$

где  $Z$  - отклонение от программного движения;

$W$  - дополнительное управляющее воздействие.

При этом система (3) реализуется по разомкнутому циклу, а система (4) по замкнутому.

Выражение (3) представляет собой математическое ожидание программного движения. Таким образом, при определении программного движения, решается так называемая детерминированная задача синтеза, в которой отклонения от математического ожидания не учитываются.

В настоящее время большое количество работ по теории инвариантности посвящается различным аспектам вопроса о компенсации возмущающих

воздействий при поддержании задающего воздействия на заданном уровне, т.е. рассматриваются вопросы уменьшения ошибки стабилизации. Вопросу же уменьшения динамической ошибки воспроизведения программного движения уделяется сравнительно мало внимания, так как считается, что выводы, полученные для условий подавления возмущений, полностью справедливы и для условий воспроизведения, так как при этом рассматривается инвариантность не самой регулируемой величины относительно задающего воздействия, а инвариантность отклонения регулируемой величины  $\varepsilon(t)$ , т.е. ошибки. Как известно, ошибка системы регулирования по отклонению с одним задающим и одним возмущающим воздействием имеет две составляющие

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{xy}(t) + \varepsilon_f(t), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{xy}(t) = C_0 X_y + C_1 X_y^{(1)} + \dots + C_n X_y^{(n)}$ ,  $(6)$

$$\varepsilon_f(t) = C'_0 f(t) + C'_1 f^{(1)}(t) + \dots + C'_n f^{(n)}(t), \quad (7)$$

$X_y(t), f(t)$  – соответственно задающее и возмущающее воздействия;

$X_y^{(i)}(t), f^{(i)}(t)$  – соответственно производные от задающего и возмущающего воздействий;

$i = 1, 2, \dots, n.$

Составляющая  $\varepsilon_{xy}(t)$  характеризует неточность воспроизведения задающего воздействия регулируемой величины при отсутствии возмущений. Составляющая  $\varepsilon_f(t)$  создается возмущениями, которые отклоняют регулируемую величину от заданного значения. В следящих системах и системах программного управления задающие воздействия могут изменяться с большими скоростями и ускорениями и составляющая  $\varepsilon_{xy}(t)$  ошибки оказывает основное влияние на точность воспроизведения. Поэтому основной целью следящих систем и систем программного управления следует считать уменьшение ошибки путем максимального уменьшения ее составляющей  $\varepsilon_{xy}(t)$ .

Учитывая вышеизложенное, очевидно следует согласиться с Н.М.Чумаковым о целесообразности разделения систем на инвариантные и ковариантные. Ковариантными системами следует называть системы, точно воспроизводящие задающее воздействие при отсутствии возмущений. Так как в нековариантных системах точное воспроизведение задающего воздействия даже при полной компенсации возмущений невозможно, то при синтезе высокоточных САУ необходимо обеспечивать ковариантность системы по отношению к задающему воздействию и инвариантность к возмущающим воздействиям.

В настоящее время существует несколько методов для достижения различных видов инвариантности и ковариантности.

В работе дается их сравнительный анализ, из которого видно, что все методы позволяют достичь только частичной инвариантности и ковариантности. Наиболее широко в настоящее время используется метод компенсации по производным от задающего воздействия, т.е. для точного воспроизведения задающего воздействия при отсутствии возмущений на вход системы необходимо подавать управляющее воздействие в виде

$$U(t) = C_0 \bar{X}_y(t) + C_1 \bar{X}_y^{(1)}(t) + \dots + C_n \bar{X}_y^{(n)}(t), \quad (8)$$

здесь  $U(t)$  и  $\bar{X}_y(t)$  - соответственно управляющее воздействие и оптимальная программная траектория.

В том случае, когда отсутствует полная априорная информация об задающих воздействиях, применение форсирующих звеньев для достижения условий ковариантности неизбежно, при этом ковариантность достигается только частичная, ввиду трудности реализации форсирующих звеньев.

Рассмотрим систему управления с передаточной функцией  $W(p) = W_o(p) \cdot W_p(p)$ , закон изменения выходной координаты которой  $X(t)$  найден в результате решения первой задачи оптимизации.

Здесь  $W_o(p)$  - передаточная функция объекта,

$W_p(p)$  - передаточная функция регулятора.

Если найти управляющее воздействие  $U(t)$  на входе системы, которое обеспечит требуемый закон изменения выходной координаты, то реализация этого управляющего воздействия может быть осуществлена с помощью нелинейного преобразования задающего воздействия равного  $\bar{X}(t)$ , т.е.  $\bar{X}_y(t) \equiv \bar{X}(t)$ .

Действительно, пусть в результате решения первой задачи оптимизации найдено

$$\bar{X}_y(t) = F(t), \quad (9)$$

тогда

$$\left. \begin{array}{l} \bar{X}'(t) = F'(t) = F_1(t) \\ \bar{X}''(t) = F''(t) = F_2(t) \\ \bar{X}_y^{(n)}(t) = F^{(n)}(t) = F_n(t) \end{array} \right\} \quad (10)$$

Если (10) разрешить относительно  $t$ ,

$$t = T(\bar{X}_y), \quad (II)$$

то, подставляя (II) в систему (10), получим:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{X}_y' = F_1(\bar{X}_y) \\ \bar{X}_y^{(n)} = F_n(\bar{X}_y) \end{array} \right\} \quad (12)$$

Отсюда на основании (8) и (12) получим

$$U(\bar{X}_y) = C_0 \bar{X}_y + C_1 F_1(\bar{X}_y) + \dots + C_k F_k(\bar{X}_y) \quad (13)$$

или  $U(\bar{X}_y) = U(\bar{X}_y) ,$  (14)

где

$U$  - нелинейная функция.

Глава II. Принципы уменьшения ошибки воспроизведения  
в оптимальных системах программного управления  
тиристорным асинхронным электроприводом  
с фазовым регулированием скорости.

В настоящее время в качестве электроприводов механизмов, требующих регулирования скорости в широком диапазоне, начинают все шире применяться АД, которые обладают по сравнению с двигателями посточинного тока рядом известных преимуществ.

Различные тиристорные асинхронные электроприводы с фазовым регулированием скорости интенсивно разрабатываются в ряде институтов и организаций (УИИ, ОИИ, ЭНИИМС, ЧИИ и др.).

В этой главе рассматриваются сравнительно мало изученные вопросы формирования пуско-тормозных режимов при фазовом управлении АД, которое привлекает к себе внимание простотой реализации и высокой надежностью. Реализация заданного закона движения электропривода основывается на определении необходимого для этой цели управляющего воздействия (в данном случае напряжения подводимого к статору двигателя) в функции времени или выходных координат системы. Обычно подобные задачи решаются на основе использования передаточной функции объекта управления, что одновременно позволяет провести исследование полученных решений путем использования аналоговых вычислительных машин. Однако отсутствие однозначности передаточной функции асинхронного двигателя ввиду наличия устойчивой и неустойчивой частей механической характеристики затрудняет решение этих задач. В данном случае закон изменения напряжения, подведенного к статору двигателя, в функции времени или в функции скорости и момента может быть получен непосредственно из выражения для механической характеристики. Однако такой подход к решению задачи не позволяет провести исследования системы управления двигателем без использования параметров его схемы замещения.

В работах Л.Б.Гейлера, М.Г.Чиликина, М.Н.Соколова, Л.С.Козлитина и др. отмечалось, что электромагнитные переходные процессы затухают практически в течении одного полупериода питающего напряжения в двигателях с повышенным скольжением и небольшой мощности, а при на-

правленном изменении напряжения динамическая характеристика приближается к статической. При этих условиях электромагнитными процессами в асинхронном двигателе можно пренебречь и задачу анализа и синтеза системы управления двигателем решить опираясь на механическую характеристику.

При этом вместо передаточной функции АД целесообразно рассматривать его структурную схему (в общем случае нелинейную), которая строится на основе представления механической характеристики в виде степенного ряда:

$$\mu = U_1^2 (C_0 + C_1 V + \dots + C_n V^n), \quad (15)$$

где  $J = \frac{M}{M_{\text{кн}}}$  — момент в относительных единицах;

$U = \frac{U_1}{U_{1H}}$ ;  $V = \frac{\omega}{\omega_0}$  — напряжение и скорость в относительных единицах,

$$A(V) = \frac{[2(1-V_k) + \beta(1-V_k)^2] - [2(1-V_k) + \beta(1-V_k)^2] \cdot V}{[1 + ((1-V_k)^2(1-\beta))] - [2 + \beta(1-V_k)^2] V + V^2} \quad (16)$$

— момент при  $U_1 = I$ .

В работе приводится методика нахождения коэффициентов степенного ряда (15) по методу наименьших квадратов и по характерным точкам механической характеристики. Нелинейная структура АД для всех режимов одинакова и отличается только значениями коэффициентов  $C_i$ .

Из структурной схемы находится зависимость напряжения  $U_1$  от скорости на статоре двигателя в виде выражения

$$U_1(V) = \pm \sqrt{\frac{T_m \frac{dV}{dt} + \mu_{cm}}{C_0 + C_1 V + C_2 V^2 + C_3 V^3}} = F_1(V), \quad (17)$$

где "+" соответствует чередование фаз для вращения "вперед", а "-" соответствует чередование фаз для вращения "назад".

Если учесть, как показано в работах В.А.Шубенко, И.Я.Браславского, Л.С.Козлита, Е.Л.Оркиной и др., что составляющая момента от высших гармонических составляющих напряжения по отношению к моменту от первой гармоники напряжения не превышает 1%, то с учетом только первой гармоники напряжение на выходе тиристорного коммутатора в зависимости от управляющего воздействия  $\alpha'$  и угла нагрузки  $\varphi$  можно определить в виде

$$U_1(\alpha', \varphi) = \sqrt{\left(\frac{3}{2\pi}\right)^2 \left[\sin^2 \varphi \sin^2 \alpha'\right]^2 + \left[\frac{3(\alpha' - \varphi)}{2\pi} - \frac{3}{4\pi} (\sin 2\alpha' + \sin 2\varphi) - \frac{1}{2}\right]^2} = F_1(\alpha', \varphi), \quad (18)$$

где  $\alpha' = \alpha - \alpha$ ,  $\alpha$  — угол управления ТК.

Закон изменения управляющего воздействия  $\alpha'(t)$  на выходе тиристорного коммутатора находится из системы уравнений

$$\left. \begin{array}{l} u_1 = F_1(v) \\ u_1 = F_2(\alpha', \varphi) \\ \cos \varphi = F_3(v) \\ v = F_4(t) \end{array} \right\}, \quad (19)$$

где

$F_1(v)$  — нелинейная зависимость напряжения на статоре двигателя от скорости;

$F_2(\alpha', \varphi)$  — зависимость первой гармоники напряжения, на выходе тиристорного коммутатора от  $\alpha'$  и угла нагрузки;

$F_3(v)$  — зависимость угла нагрузки от скорости двигателя;

$F_4(t)$  — заданная (оптимальная) диаграмма скорости.

Для определения управляющего воздействия  $U(t)$  на входе линейной части системы, которая может быть сведена к последовательной цепочки звеньев первого порядка (рис. I) и описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 \frac{dx_1}{dt} + x_1 = Ku \\ \vdots \\ T_k \frac{dx_k}{dt} + x_k = x_{k-1} \end{array} \right\}, \quad (20)$$

предлагается следующее.

Из (20) находим

$$U(t) = \frac{1}{K} \left[ x_k + \sum_{i=1}^k (C_k T_{1,2,\dots,k}) \frac{d^i x_k(t)}{dt^i} \right]. \quad (21)$$

Любую программную траекторию можно разложить на  $j$  интервалов, на каждом из которых высшая производная поддерживается на одном из своих предельных значений  $\pm x_a^i$

$$\left| \frac{d^i x}{dt^i} \right| \leq x_a^i = \text{const} \quad (22)$$

При этом управляемая величина  $X(t)$  и ее производные могут быть определены на каждом интервале с помощью выражений:

$$\left. \begin{array}{l} x_d = x_n j + \frac{\dot{x}_n \cdot \Delta t_j}{1!} + \dots + \frac{x_a^i \cdot \Delta t_j^{(i-1)}}{i!} \\ \dot{x}_d = \dot{x}_n j + \frac{\ddot{x}_n \cdot \Delta t_j}{1!} + \dots + \frac{x_a^i \cdot \Delta t_j^{(i-1)}}{(i-1)!} \\ x_d^{(i-1)} = x_n^{(i-1)} + \frac{x_a^i \cdot \Delta t_j}{1!} \end{array} \right\}, \quad (23)$$

где  $\Delta t_j = t_{jk} - t_{j\mu}$  - длительность  $j$ -го интервала.

Апроксимируя управляемую величину  $X(t)$  отрезками прямых и учитывая, что (рис. I)

$$T \frac{dX}{dt} + X = X_k, \quad (24)$$

получим выражение для определения управляющего воздействия на каждом интервале в виде

$$U_j(t) = \frac{1}{K} \left[ X_{nj} + X_{ja} \left( \sum_{k=1}^j T_k + T + \Delta t_j \right) \right]. \quad (25)$$

Если среди  $j$  интервалов имеется  $i$  ( $0 \leq i \leq j-1$ ) точек разрыва первого рода, то в управляющем воздействии появляются  $\delta$ -функции, приближенные значения которых могут быть определены по выражению

$$u_i(t - \tau_i) = \frac{1}{K} \left[ X_{ni} \mp \frac{1}{\varepsilon_i} \left( \sum_{k=1}^i T_k + T + \varepsilon_i \right) \right], \quad (26)$$

где " - " соответствует точкам разрыва, в которых  $X_i(t) > X_i(t + \Delta t)$ , а " + " соответствует точкам разрыва, в которых  $X_i(t) < X_i(t + \Delta t)$ . С учетом (25) и (26) управляющее воздействие на входе системы находится как

$$u(t) = \sum_{j=1}^J U_j(t) + \sum_{i=0}^I u_i(t - \tau_i). \quad (27)$$

В системе управления тиристорным асинхронным электроприводом асинхронный двигатель и тиристорный коммутатор (ТК) составляют нелинейную часть системы, а система управления ТК составляет линейную часть системы, при этом угол управления тиристорным коммутатором  $\alpha'$  является выходной координатой линейной части системы. Закон изменения  $\alpha'(t)$  для реализации заданной диаграммы скорости находится из системы уравнений (19).

Пользуясь вышеуказанной методикой, находим управляющее воздействие  $U(t)$  на входе линейной части. Далее, исключая из уравнений (8) и (9) координату времени, находим характеристику нелинейного элемента для формирования заданной пусковой диаграммы скорости в виде выражения (14). На рис.2 и рис.3 приведены зависимости  $U(t)$  и характеристики НЭ для формирования пусковой линейной диаграммы скорости с различной интенсивностью при детерминированном возмущении, где

$$U = U_{n.s.}, \quad \bar{X}_y = U_{300}.$$

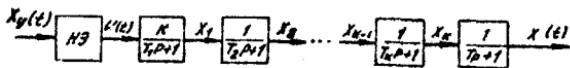


Рис.1. К определению вида НЭ линейной системы

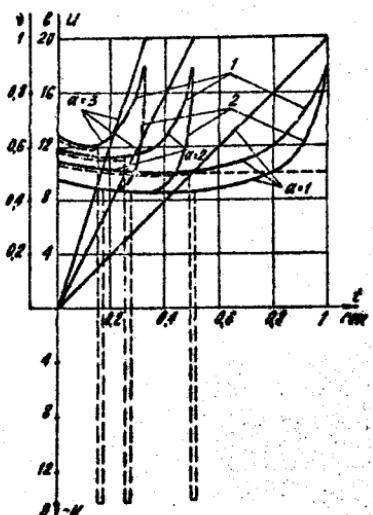


Рис.2. Зависимость  $u(t)$  в режиме формирования пусковой диаграммы скорости

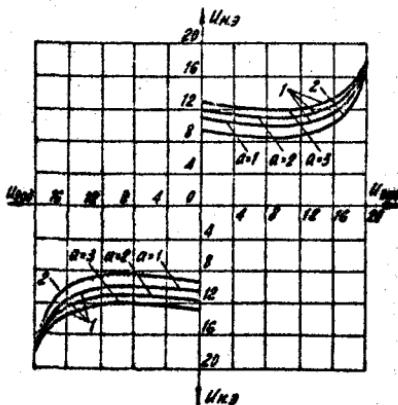


Рис.3. Характеристики нелинейного корректора в режиме пуска

Характеристики НЭ для формирования тормозной диаграммы скорости определяются аналогично.

При действии на систему недетерминированного возмущения, которое может быть измерено, для уменьшения ошибки воспроизведения в системе предусматривается контур самонастройки, включающий измерительный элемент  $W_u$ , нелинейный элемент и множительное устройство. В работе отмечается важное свойство ковариантных систем, заключающееся в том, что если нелинейное корректирующее звено позволяет точно воспроизводить задающее воздействие при отсутствии возмущений, то при наличии возмущений разность между входным и выходным сигналами системы будет пропорциональна реакции системы на сумму всех возмущений, действующих на систему, которую можно рассматривать как эквивалентное возмущение, приведенное к выходу системы. В работе рассматривается структурная схема компенсации эквивалентного возмущения в системе управления тиристорным асинхронным электроприводом.

### Глава Ш. Математическое исследование систем программного управления тиристорным асинхронным электроприводом.

Аналитическое исследование динамики асинхронного двигателя встречает значительные трудности в силу того, что он представляет собой существенно нелинейный объект, описываемый системой нелинейных дифференциальных уравнений. Эта задача упрощается при изучении динамики систем с асинхронными двигателями в области малых отклонений координат от равновесного, установившегося состояния, что позволяет линеаризовать уравнения, характеризующие положение системы, путем разложения в ряд Тейлора в окрестности точки  $\mu_0$  упрощенной формулы Клосса

$$\mu = \mu_0 + \left( \frac{\partial \mu}{\partial v} \right)_{U_1=U_{10}} \Delta v + \left( \frac{\partial \mu}{\partial U_1} \right)_{v=v_0} \Delta U_1, \quad (28)$$

где  $K_p = \frac{\partial \mu}{\partial v}$  - коэффициент жесткости механических характеристик двигателя или коэффициент самовыравнивания;  
 $K_s = \frac{\partial \mu}{\partial U_1}$  - коэффициент чувствительности по моменту к изменению первой гармоники напряжения.

Согласно (18)

$$K_p = \frac{2 U_1^2 (1 - V_k)^2 [(1 - V)^2 - (1 - V_k)^2]}{[(1 - V)^2 - (1 - V_k)^2]^2}, \quad (29)$$

$$K_3 = 4U_1 \frac{(1-V_K)(1-V)}{(1-V)^2(1-V_K)^2} \quad . \quad (30)$$

При этом передаточная функция по управляющему воздействию в замкнутой системе "программного управления тиристорным асинхронным электроприводом имеет вид

$$W(p) = \frac{\Delta V}{\Delta U_1} = \frac{K \cdot K_3}{T_m \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot p^3 + [T_m(T_1+T_2) - T_1 \cdot T_2 \operatorname{Sign} K_p] p^2 + [T_m - (T_1+T_2) \operatorname{Sign} K_p] p + (K \cdot K_3 \lambda - \operatorname{Sign} K_p)} \quad (31)$$

где  $K = K_{m\mu} \cdot K_u \cdot K_{tk}$

Как видно из (31) устойчивость системы зависит от величины  $K_3$  и величины и знака  $K_p$ . Коэффициенты  $K_3$  и  $K_p$  определяются координатами точки линеаризации. В работе определена область устойчивости в плоскости параметров  $K_3$  и  $K_p$ , из которой видно, что рассматриваемая в работе система устойчива в "малом" в любой точке линеаризации.

Так как в данном случае, как показано выше, электромагнитными процессами можно пренебречь, то при моделировании переходных режимов целесообразно использовать нелинейную структуру асинхронного двигателя, разработанную во второй главе.

Исследования математической модели асинхронного двигателя типа АРП 53-12 проводились на аналоговых вычислительных машинах МН-7.

Оценка результатов математического моделирования осуществлялась в сравнении переходных процессов математической модели с переходными процессами реального двигателя. Ошибка моделирования не превышала 5%.

Структурная схема математической модели системы программного управления приведена на рис.4.

Целью исследования являлось:

а) проверка возможности повышения динамической точности в замкнутых по скорости системах программного управления тиристорным асинхронным электроприводом за счет введения в канал управления нелинейных элементов;

б) исследование устойчивости системы в "большом".

Оценка результатов математического моделирования производилась путем оценки ошибки воспроизведения в процентах от синхронной скорости.

На основании анализа осциллограмм пусковых и тормозных режимов показано, что динамическая ошибка в нескорректированной системе уве-

личивается с увеличением интенсивности пуска и торможения и составляет 10-15%. Введение нелинейного корректирующего элемента позволяет скомпенсировать динамическую ошибку практически до нуля.

При действии на систему управления, скорректированную при  $\mu_{cm} = 0$ , детерминированного возмущения в виде постоянного момента сопротивления  $\mu_{tm} = \text{const}$  в системе появляется динамическая и статическая ошибка, которая также компенсируется практически до нуля после введения нелинейного элемента. При появлении в скорректированной при  $\mu_{cm} = 0$  системе управления параметрического возмущения в виде уменьшения коэффициента усиления в системе появляется ошибка до 15%. С введением в систему контура обратной связи с нелинейным элементом и множительным устройством ошибки воспроизведения уменьшается и не превышает 1%. Исследования на ЭВМ принципов построения ковариантных систем программного управления электроприводов переменного тока показали достаточно высокую точность предложенной методики расчета параметров нелинейного корректора.

Анализ большого количества осцилограмм, снятых в процессе исследования, показал, что при изменении интенсивности пуска и величины установленнойся скорости устойчивость в нескорректированной системе не нарушается. Введение нелинейного корректора также не приводит к нарушению устойчивости при отработке различных управляющих воздействий.

Отмеченные факторы позволяют сделать заключение об устойчивости в "большом" для заданного вида воздействий скорректированной системы программного управления тиристорным асинхронным электроприводом с фазовым регулированием скорости.

#### Глава IV. Разработка и исследование системы фазового управления.

Вопросы практической реализации различных тиристорных устройств для управления асинхронными двигателями рассматривались в работах многих авторов: Л.П.Петрова, М.Н.Обуховского, Р.Г.Подзолова, Р.Т.Шрейнера, В.А.Шубенко, И.Я.Браславского, Ю.Д.Ясенева, С.В.Демидова и др. Кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского политехнического института разработана серия тиристорных устройств типа СТУ-ПР-1 и СТУ-ПР-2, позволяющие плавно регулировать скорость асинхронного двигателя в диапазоне 1:10. К сожалению серийный выпуск этих устройств пока не освоен электротехнической промышленностью, а итоги эксплуатации отдельных промышленных образцов практически не освещаются. Поэтому вопросы практической

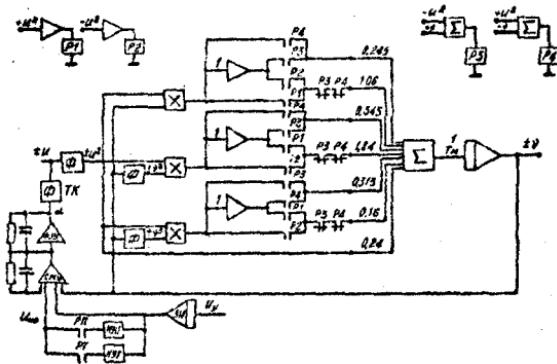


Рис.4. Схема математической модели тиристорного асинхронного электропривода

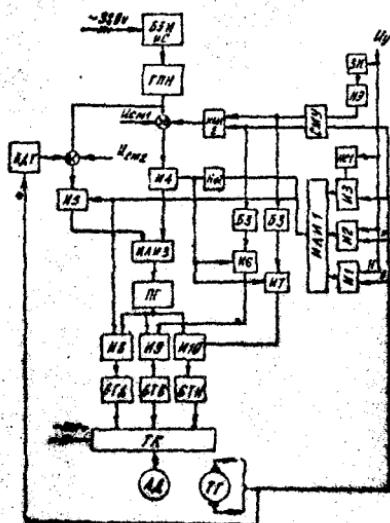


Рис. 5.  
Функциональная схема  
системы фазового управ-  
ления

реализации систем управления тиристорными коммутаторами не теряют своей актуальности.

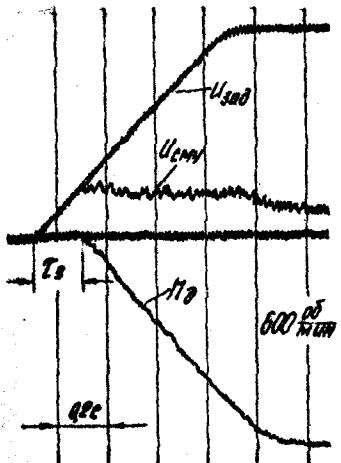
Отличительной чертой известных схем управления тиристорными коммутаторами является наличие в них управляющих устройств на каждый тиристор в отдельности. На кафедре общей электротехники ЧМУ разработана система управления тиристорными коммутаторами с общими функциональными устройствами, что позволило значительно упростить систему управления. На рис. 5 представлена функциональная схема системы фазового управления.

Блок запускающих импульсов и синхронизации (БЗИ и С) формирует шесть импульсов, синхронизированных с сетью и сдвинутых на 60° электрических градусов. Импульсы поступают на вход шестифазного генератора пилообразных напряжений (ГПН), которые управляют пик-генераторами (ПГ). В зависимости от режима работы к пик-генераторам подключаются соответствующий блок трансформаторов БТВ, БТН, БТД. Импульсы со вторичных обмоток трансформаторов БТВ поступают на управляющие электроды группы тиристоров, работающих при вращении "вперед". Импульсы со вторичных обмоток трансформаторов БТН поступают на управляющие электроды тиристоров, работающих при вращении "назад". Импульсы со вторичных обмоток блока БТД поступают на группу тиристоров, осуществляющих выпрямление тока в режиме динамического торможения по трехфазной мостовой схеме выпрямления.

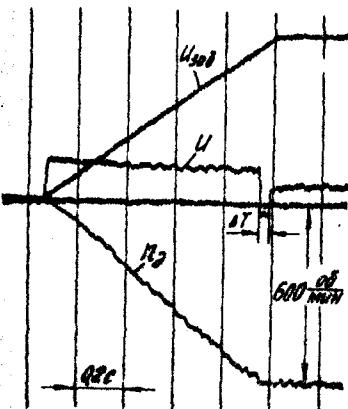
Режим работы двигателя определяется и выбирается логическим блоком, включающим в себя логические схемы И+И10, ИЛИ+ИЛИ3, НЕ1+НЕ2. Входными сигналами логического блока являются напряжение программно-задающего устройства  $\pm U_y$ , напряжение тахогенератора  $\pm U_{tr}$ , выходное напряжение суммирующего магнитного усилителя. В зависимости от поступившей информации блок формирует управляющие сигналы для реализации следующих режимов работы двигателя:

- а) пуск "вперед" ("назад");
- б) режим установившейся скорости;
- в) режим динамического торможения при реверсе и останове;
- г) реверс двигателя.

Теоретические положения работы были воплощены в опытно-промышленном образце системы программного управления тиристорным асинхронным электроприводом, изготовленном на кафедре общей электротехники Челябинского политехнического института им. Ленинского Комсомола. Система прошла опытно-промышленные испытания на стане "2300" ЧМЗ.



а)



б)

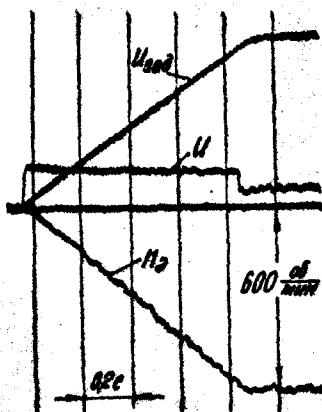


Рис. 6.  
Пуск без нелинейного  
корректора (а), с не-  
линейным корректором  
и  $\delta$ -функцией (б),  
с нелинейным коррек-  
тором без  $\delta$ -функции (в).

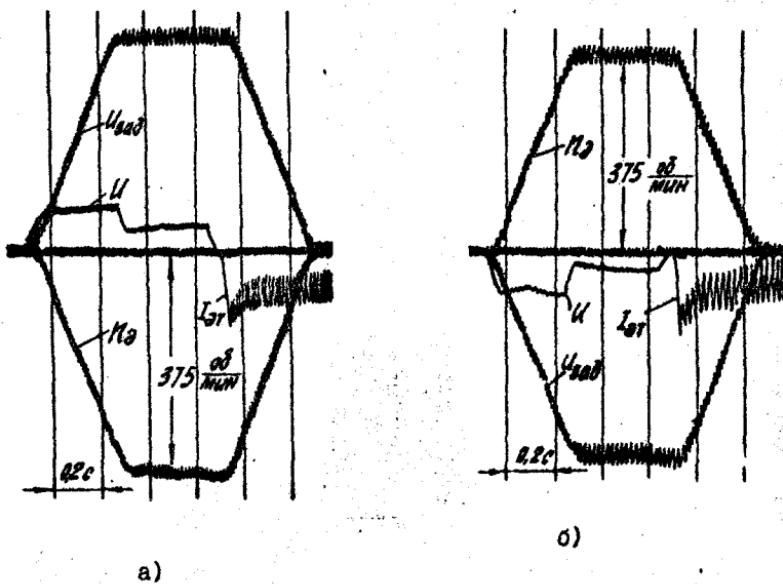


Рис. 7. Пуск и динамическое торможение "вперед" (а)  
и "назад" (б)

Анализ большого количества осцилограмм, снятых в процессе наладки и испытаний, показал:

1. В нескорректированной системе потери управления увеличиваются с увеличением интенсивности пуска и с уменьшением установившейся скорости. Для осцилограммы (рис.6а) потери управления составляют 37% от времени оптимального переходного процесса.

2. При гнедении НЭ потери управления уменьшаются и для данной осцилограммы составляют 1%, т.е. уменьшаются в 37 раз (рис.6б).

3. Отсутствие  $\delta$ -функции в канале управления (рис.6в) не приводит к заметному увеличению потерь управления. Последнее обстоятельство позволило упростить схему реализации НЭ.

На рис. 7 приведены осцилограммы пуска и динамического торможения "вперед" (рис.7а) "назад" (рис.7б).

Из осцилограмм видна достаточно высокая точность воспроизведения входного воздействия.

#### Основные выводы

Основные положения и результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработаны принципы построения оптимальных систем программного управления повышенной динамической точности путем применения нелинейного корректора вместо труднореализуемых форсирующих звеньев.

2. Разработана методика нахождения вида характеристики НЭ на основе априорной информации об оптимальном изменении регулируемой координаты и параметров системы управления.

3. В работе отмечено важное свойство ковариантных систем, заключающееся в возможности выделения сигнала, пропорционального эффекту суммарного действия возмущений, приведенных к выходу системы. Это позволяет достигать условий инвариантности без непосредственного замера возмущений, что крайне важно, так как не все возмущения принципиально могут быть измерены.

4. Разработана структурная схема компенсации эквивалентного возмущения в схеме управления тиристорным асинхронным электроприводом с фазовым управлением.

5. Предложена нелинейная структура асинхронного двигателя для математического моделирования электромеханических процессов в асинхронном электроприводе при фазовом управлении. Разработана методика нахождения параметров нелинейной структуры.

6. Математические исследования разработанной системы показали ее устойчивость в "малом". Исследование на математической модели

системы показали устойчивость системы в "большом" для заданного вида задающих воздействий. Введение НЭ в канал регулирования не приводит к потери устойчивости системы.

7. Реализация теоретических положений осуществлена применительно к системе программного управления тиристорным асинхронным электроприводом с фазовым регулированием скорости. Основные теоретические результаты, полученные в работе, достаточно точно согласуются с экспериментальными данными.

8. Система программного управления тиристорным асинхронным электроприводом, разработанная и изготовленная на кафедре общей электротехники Челябинского политехнического института имени Ленинского Комсомола, прошла опытно-промышленные испытания на стане "2300" ЧМЗ и в настоящее время на основе предложенного способа разработана, изготовлена и находится в стадии наладки система программного управления испытательным стендом трансмиссии трактора для Челябинского филиала НАТИ.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены:

1. На II-й научно-технической конференции "Оптимизация работы прокатных станов и применение электронных вычислительных машин" НИИМ, 1970 г. г. Челябинск.

2. На XXI, XXII, XXIII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского Комсомола в 1970 + 1973 г.г.

3. На заседаниях кафедры общей электротехники ЧИИ в 1972 г. и 1973 г.

4. На совместном заседании кафедр общей электротехники и САУ 25 сентября 1973 г.

Материалы диссертации изложены в следующих работах:

1. Новиков М.Н., Школьников А.И. Повышение динамической точности систем автоматического управления электроприводами с помощью нелинейных обратных связей. Тезисы докладов 3-й научно-технической конференции "Оптимизация работы прокатных станов и применение электронных вычислительных машин". г. Челябинск, 1970 г.

2. Новиков М.Н., Школьников А.И. и др. Некоторые вопросы разработка замкнутых систем электроприводов переменного тока. Материалы XXII научно-технической конференции Челябинского политехнического института, 1971 г.

3. Новиков М.Н., Школьников А.И. Уменьшение динамических ошибок систем программного управления с помощью нелинейных обратных связей. Материалы XXIII научно-технической конференции Челябинского политехнического института. 1971 г.
4. Новиков М.Н., Школьников А.И. и др. Автоматический выбор угла торможения в следящей системе, имеющей элементы запаздывания. Материалы XXIII научно-технической конференции Челябинского политехнического института. 1971 г.
5. Школьников А.И., Новиков М.Н. и др. Система программного управления тиристорным асинхронным электроприводом с фазовым регулированием скорости. Информационный листок № I62-73 Челябинский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды.
6. Школьников А.И. и др. Разработка и исследование статического преобразователя рольгангового пода закалочной печи стана "2300" ЧМЗ. Отчет по НИР, ЧИ, тема 71/44. Номер государственной регистрации 72059242, инв.номер Б206295.
7. Школьников А.И. и др. Разработка и исследование регулируемого электропривода для рольганга МОЗ. Отчет по НИР, ЧИ, тема 69/I62. Номер государственной регистрации 70003756, инв.номер Б113717.