



НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

БАКИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
ДИСКРЕТНАЯ СУБОПТИМАЛЬНАЯ СИСТЕМА
УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ
ДВИГАТЕЛЕМ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА
ТОКА СТАТОРА

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05 09 03 - "ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
И СИСТЕМЫ, ВКЛЮЧАЯ ИХ УПРАВЛЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ"

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОБЛЮЩЕНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ЧЕЛЯБИНСК 1996

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА НА КАФЕДРЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ЧЕЛЯБИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ РАБОТЫ - ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОР ГЛАДЫШЕВ С.П.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОР ЖАБРЕЕВ В.С.;
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ДОЦЕНТ ГРИГОРЬЕВ В.Ф.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ - СКБ "РОТОР", г. ЧЕЛЯБИНСК.

ЗАЩИТА СОСТОИТСЯ 3 ИЮЛЯ 1996 г., в 10 ЧАСОВ, НА ЗАСЕДАНИИ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д.053.13.07 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ЧЕЛЯБИНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ПО АДРЕСУ: 454080, г. ЧЕЛЯБИНСК, ПР. ИМ. В.И.ЛЕНИНА, 76.

С ДИССЕРТАЦИЕЙ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ В БИБЛИОТЕКЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

АВТОРЕФЕРАТ РАЗОСЛАН

1996 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА,
ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОР

 А.И. СИДОРОВ.

Общая характеристика работы

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. В современных условиях особенно остро становится проблема экономии электроэнергии при работе систем управления различными механизмами и станками.

Асинхронный двигатель (АД), ввиду простоты конструкции и надежности в работе, получил широкое распространение в промышленности, строительстве и сельском хозяйстве России. Известно, что в АД при моментах нагрузки на валу, меньших номинального значения, за счет изменения амплитуды питающего напряжения постоянной частоты можно получить минимум потерь, т. е. обеспечить энергосберегающий режим работы. В работах Ильинского Н. Ф. (Московский технический университет), Петрова Л. П. (Одесский политехнический институт) показано, что близким по энергетическим показателям к режиму минимальных потерь в АД является минимум тока статора.

Целесообразной областью применения АД с оптимальным по минимуму потребляемым током статора являются механизмы, работающие с нагрузкой, меньшей номинальной или имеющие перемежающийся режим работы (S6) с номинальной нагрузкой. Системы управления, настроенные по критерию минимума тока статора АД и имеющие регулировочную характеристику, аппроксимирующую оптимальную, являются субоптимальными. В качестве примера можно отметить субоптимальную систему управления АД по критерию минимума тока статора, которая работает при постоянном скольжении, определяемом параметрами двигателя.

На кафедре "Электротехника" Челябинского государственного технического университета (ЧГТУ) при исследовании электромеханических характеристик (зависимость ток - частота вращения) работы АД, управляемого от тиристорного преобразователя напряжения (ТПН), было выявлено, что оптимальная кривая минимальных значений тока статора приходится на частоты вращения, превышающие номинальную. Поэтому, в качестве варианта практической реализации субоптимальной системы управления АД была предложена замкнутая по частоте вращения система со статическим регулятором, работающая при постоянном сигнале задания по частоте вращения. Практические исследования показали, что в такой системе, при требуемом коэффициенте усиления статического регулятора существуют неустойчивые режимы работы. Поэтому возникает задача исследования динамических свойств контура частоты вращения АД с учетом дискретного характера работы ТПН.

Для ограничения пусковых токов в предложенной субоптимальной системе управления АД предусмотрен контур регулирования тока. На прак-

ТИКЕ УСТАНОВЛЕНО, ЧТО ТАКОЙ КОНТУР МОЖЕТ БЫТЬ НЕУСТОЙЧИВ, ХОТЯ ИЗ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗВЕСТНО, ЧТО КОНТУР ПЕРВОГО ПОРЯДКА ВСЕГДА УСТОЙЧИВ. ОТСЮДА ВЫТЕКАЕТ НЕОБХОДИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОГО ХАРАКТЕРА РАБОТЫ ТПН НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА АД.

ЦЕЛЬЮ ДИССЕРТАЦИИ ЯВЛЯЕТСЯ РАЗРАБОТКА СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ТОКА СТАТОРА, АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЕЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С УЧЕТОМ ДИСКРЕТНОГО ХАРАКТЕРА РАБОТЫ.

ИДЕЯ РАБОТЫ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ТОМ, ЧТО ДОСТИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ АД ПРИ МОМЕНТАХ НАГРУЗКИ, МЕНЬШИХ НОМИНАЛЬНОГО, ВОЗМОЖНО ПРИ УПРАВЛЕНИИ АД С ПОМОЩЬЮ ТПН СО СТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ И ПРИ ПОСТОЯННОМ СИГНАЛЕ ЗАДАНИЯ ПО ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, РАЗРАБОТАННЫЕ ЛИЧНО СОискателем, и новизна:

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ (ОПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМУ "ТПН - АД" С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ УПРАВЛЕНИЯ) ВОЗМОЖНО С ПОМОЩЬЮ ЭВМ НЕПОСРЕДСТВЕННО ИЗ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ НЕПРЕРЫВНУЮ ЧАСТЬ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ПЕРИОДА ДИСКРЕТНОСТИ.

2. СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД С ТПН ПРОВОДИТСЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОЛИНОМОВ ЗАМКНУТЫХ КОНТУРОВ.

3. ДЛЯ АНАЛИЗА В ОБЩЕМ ВИДЕ, С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ, ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД С ТПН, ЦЕЛЕСООБРАЗНО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ КОНТУРОВ.

ОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПОДТВЕРЖДАЮТСЯ:

1. ХОРОШЕЙ СХОДИМОСТЬЮ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД С ТПН И НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ.

2. КАЧЕСТВЕННОЙ СХОДИМОСТЬЮ СУБОПТИМАЛЬНОЙ КРИВОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ НА МОДЕЛИ И НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ.

3. РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД.

ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ. НАУЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В СЛЕДУЮЩЕМ:

1. УСТАНОВЛЕНО, ЧТО ПОЛУЧЕНИЕ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД С ТПН ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ТОКА СТАТОРА СО СТАТИЧЕСКИМ И АСТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРАМИ ВОЗМОЖНО НА ОСНОВЕ РАССЧИТАННОЙ В КООРДИНАТНЫХ

ОСЯХ ТОК - ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КРИВОЙ МИНИМУМА ТОКА СТАТОРА.

2. Впервые установлена функциональная зависимость между коэффициентами линейного приближения разностных уравнений и правой частью системы дифференциальных уравнений, описывающих непрерывную часть контуров регулирования АД с ТПН, позволяющая определить эти коэффициенты.

3. Выявлено, что ввиду наличия среди коэффициентов линейного приближения разностных уравнений (описывающих систему ТПН - АД с вертикальным управлением) нулевых членов, корневой годограф контуров регулирования не достигает нулевого значения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ заключается в следующем:

1. Обоснована методика анализа динамических свойств контуров регулирования тока и частоты вращения АД с ТПН, позволяющая определять области устойчивости и оценивать запас устойчивости.

2. Разработана методика синтеза динамических свойств контуров регулирования тока и частоты вращения АД с ТПН, позволяющая вычислять коэффициенты обратных связей этих контуров с учетом желаемых (заданных) динамических свойств их работы.

3. Создана практическая установка, реализующая субоптимальную систему управления АД по критерию минимума тока статора, работающая во всем диапазоне нагрузок на валу АД от холостого хода до номинальной.

4. Разработаны программы, позволяющие рассчитывать режимы работы субоптимальной системы управления АД с ТПН, а также проводить анализ и синтез динамических свойств контуров регулирования тока и частоты вращения.

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ РАБОТЫ. На основе технических решений и рекомендаций, изложенных в диссертации, разработана экспериментальная установка субоптимальной системы управления АД с ТПН по критерию минимума тока статора, работающая при нагрузках на валу АД от холостого хода до номинальной.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ: разработанная программа для проведения анализа и синтеза динамических свойств субоптимальной системы управления АД передана на моторный завод АО "Челябинский тракторный завод" (г. Челябинск); созданная лабораторная установка используется в учебном процессе.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения и результаты работы обсуждались на:

- ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО - МЕТОДИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН В Г. АСТРАХАНЬ (1995 г.);

- МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ В ДУБЛИНЕ (ИРЛАНДИЯ, 1995 г.);

- НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИХ КОНФЕРЕНЦИЯХ ПРОФЕССОРСКО - ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА ЧГТУ (1995, 1996 г.)

ПУБЛИКАЦИИ. По теме ДИССЕРТАЦИИ ОБУБЛИКОВАНО 8 РАБОТ.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. ДИССЕРТАЦИЯ СОСТОИТ ИЗ ВВЕДЕНИЯ, 4 ГЛАВ, ВЫВОДОВ, БИБЛИОГРАФИЧЕСКОГО СПИСКА ИЗ 75 НАИМЕНОВАНИЙ И 6 ПРИЛОЖЕНИЙ. СОДЕРЖИТ 126 СТРАНИЦ МАШИНОПИСНОГО ТЕКСТА, 52 ИЛЛЮСТРАЦИИ. В ПРИЛОЖЕНИЯХ ТАКЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ КОПИЯ 3 АКТОВ ВНЕДРЕНИЯ.

АВТОР ВЫРАЖАЕТ БЛАГОДАРНОСТЬ СТУДЕНКАМ КАФЕДРЫ "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА" ЧГТУ ЗА ПОМОЩЬ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ДИССЕРТАЦИИ К ЗАЩИТЕ.

Основное содержание работы

Во ВВЕДЕНИИ РАСКРЫТА АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ, СФОРМУЛИРОВАНЫ ЕЕ ЦЕЛЬ И ОСНОВНАЯ ИДЕЯ, КРАТКО ОХАРАКТЕРИЗОВАНЫ НАУЧНАЯ НОВИЗНА, ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И ВЫДРЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ ВЫПОЛНЕН ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО МЕТОДАМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ АД. ПОКАЗАНО, ЧТО ДЛЯ ОПИСАНИЯ СИСТЕМЫ "ТПН - АД", В КОТОРОЙ В КАЧЕСТВЕ ПЕРЕМЕННЫХ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ, ПОДХОДЯТ СЛЕДУЮЩИЕ МЕТОДЫ: КЛАССИЧЕСКИЙ, ОПЕРАТОРНЫЙ, ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЙ И ДР. РАССМАТРИВАЕТСЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АД НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЙ. ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ДВУХФАЗНОГО АД ПРИ ОБЩЕПРИНЯТЫХ ДОПУЩЕНИЯХ. В КАЧЕСТВЕ ТПН РАССМАТРИВАЕТСЯ ТИРИСТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СО ВСТРЕЧНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ВЕНТИЛЕЙ. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА АД ПРЕДСТАВЛЕНА НА РК. 1.

В СИФУ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ВЕРТЕКАЛЬНЫЙ ЗАКОН РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОМ ОТКЛОНЕНИЯ ТИРИСТОРОВ.

КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ СИФУ - ВЕЛИЧИНА δ - ТАНГЕНС УГЛА НАКЛОНА НИЛОБРАЗНОГО СИГНАЛА СИФУ, ЧИСЛЕННО РАВНАЯ ОБРАТНОЙ ВЕЛИЧИНЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ КОНТУРА.

ВЕЛИЧИНЫ δ И $k_{\text{сф}}$ ВЫБИРАЮТСЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА, ИСХОДЯ ИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА.

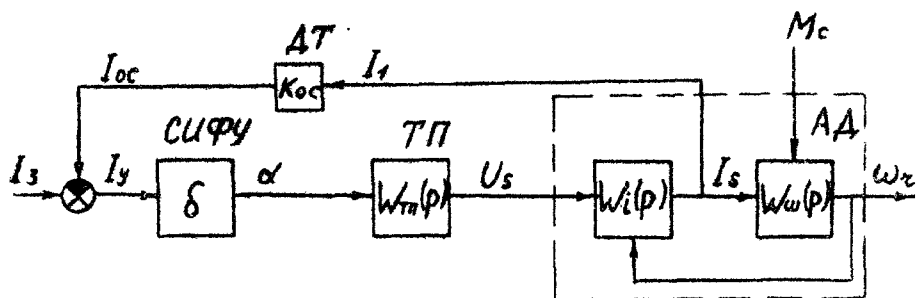


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования тока АД

Величина I определяется по выражению

$$I = \begin{cases} |i_{a\alpha}|, & \text{если } |i_{a\alpha}| > |i_{a\beta}|, \\ |i_{a\beta}|, & \text{если } |i_{a\beta}| > |i_{a\alpha}|, \end{cases}$$

где $i_{a\alpha}, i_{a\beta}$ - мгновенные значения токов в обмотках статора АД.

Величина выходного напряжения тиристорного преобразователя (ТП) определяется углом регулирования α , поступающим от СИФУ.

Проведен краткий обзор методов интегрирования. Показано, что для решения поставленной задачи наиболее подходит метод Рунге - Кутты, обладающий относительно высокой точностью.

На основе вышерассмотренной структурной схемы контура на языке программирования "Turbo - Pascal" версии 5.5 составлена универсальная программа, реализующая цифровую модель контура регулирования тока системы ТПН - АД. Предварительные результаты моделирования показали наличие неустойчивости в работе контура.

Структурная схема контура частоты вращения со статическим регулятором и работающая с постоянным сигналом задания представлена на рис. 2.

Роль статического регулятора частоты вращения выполняет СИФУ с коэффициентом передачи δ .

Величины δ и k_w выбираются по результатам анализа и синтеза, исходя из обеспечения заданных динамических свойств контура.

На основе структурной схемы (рис. 2) на языке программирования "Turbo - Pascal" версии 5.5 составлена универсальная программа, реализующая цифровую модель контура частоты вращения.

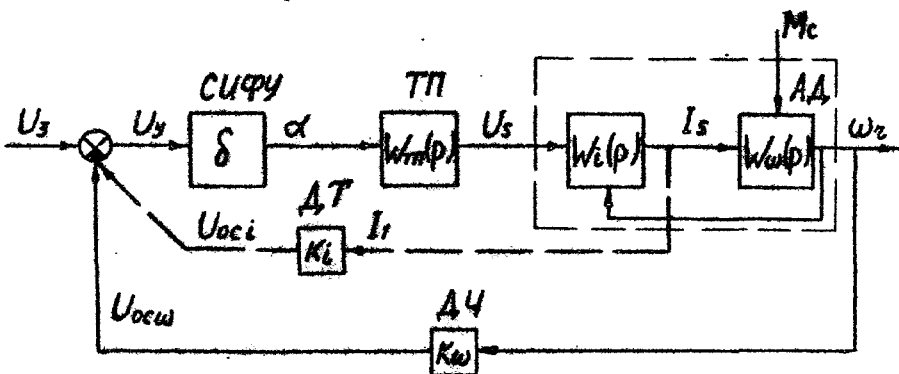


Рис. 2. Структурная схема контура частоты вращения

На рис. 3. представлены рассчитанные с помощью цифровой модели следующие электрохимические характеристики АД: 1 - нерегулируемого АД (при синусоидальном напряжении питания) от режима холостого хода до номинального; 2 - холостого хода; 3 - при моменте нагрузки $M_c = 0,2M_n$; 4 - при $M_c = 0,4M_n$; 5 - при $M_c = 0,6M_n$; 6 - при $M_c = 0,8M_n$; 7 - оптимальная кривая; 8 - предлагаемый (МТУ) вариант субоптимальной характеристики, основанный на постоянстве скольжения; 9 - рекомендуемый вариант субоптимальной системы.

Работа контура осуществляется при выбранном, фиксированном значении сигнала задания по частоте вращения $U_{\text{зад}}$. Выбор величины сигнала задания и диапазона регулирования частоты вращения D (определяемой величиной δ) осуществляется исходя из выполнения условия при котором электрохимическая характеристика работы контура была максимально приближена к оптимальной кривой кривой 7.

Предварительная проверка на модели показала, что при величине δ , требуемой для реализации характеристики 9 в контуре наблюдается неустойчивый режим.

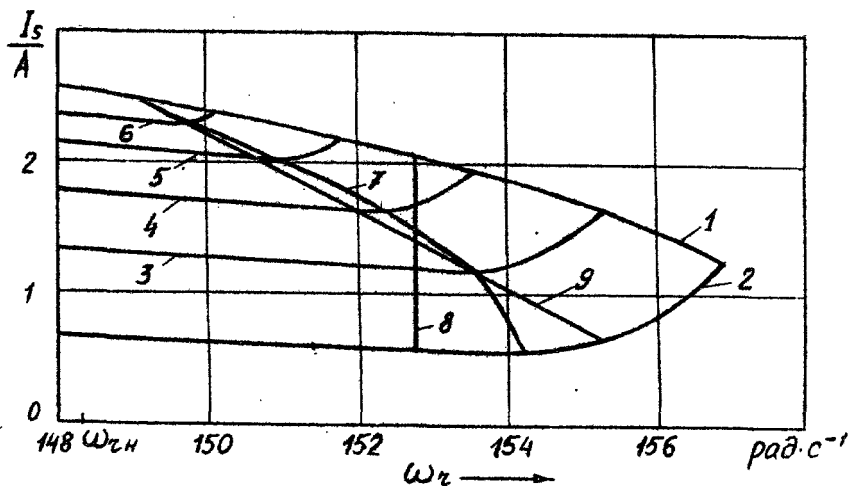


Рис. 3. Электромеханические характеристики АД, полученные на модели.

В СВЯЗИ С НАЛИЧИЕМ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В РАБОТЕ КОНТУРОВ ТОКА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД БЫЛА ПОСТАВЛЕНА ЗАДАЧА ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ДИСКРЕТНОГО ХАРАКТЕРА РАБОТЫ ТПН.

Во второй главе дается общее описание метода анализа и синтеза с помощью нелинейных разностных уравнений применительно к рассматриваемому классу систем. Отмечается, что использование разностных уравнений с применением численных методов в отличие от других методов позволяет не только определить области устойчивой работы системы, но и оценить характер неустойчивости, а также с помощью метода корневого годографа получить представление о запасе устойчивости системы и о качестве переходного процесса. С целью наиболее полного представления особенностей физической стороны процессов, протекающих в рассматриваемой системе управления и лежащих в основе получения коэффициентов линейного приближения разностных уравнений автором сначала рассматривается работа простейшего контура регулирования тока с RL -нагрузкой. В случае непрерывного токового режима этот контур всегда устойчив. При прерывистом токовом режиме в контуре могут возникать неустойчивые режимы. Аналогичные особенности физических процессов лежат и в основе динамических свойств контура регулирования тока АД.

Анализ динамических свойств контура тока проводится по следующей схеме.

Записывается система дифференциальных уравнений, характеризующая работу разомкнутого контура тока

$$y' = Ay + c(t), \quad (1)$$

где y — вектор переменных, характеризующих состояние контура; A — квадратная матрица постоянных коэффициентов k^{-10} порядка; $c(t)$ — вектор входных переменных, которые в данном случае являются синусоидальными функциями времени. Линейное приближение разностных уравнений, с учетом того что в рассматриваемой системе используется вертикальный закон управления, имеет вид

$$\Delta y_{n+1} = B \Delta y_n + d_1 \Delta \alpha_n + d_2 \Delta \alpha_{n+1}, \quad (2)$$

где $B = \exp[A(T)]$ — матричный экспоненциал, характеризующий свободное движение разомкнутого контура; d_1 — вектор, характеризующий изменение переменных состояния в результате изменения сигнала управления в начале периода $d_1 = (\partial y_{n+1} / \partial \alpha_n)_0$, (нолик после правой скобки означает, что выражение вычисляется в окрестности точки установившегося режима); d_2 — вектор, характеризующий изменение переменных состояния в результате изменения сигнала управления в конце периода $d_2 = (\partial y_{n+1} / \partial \alpha_{n+1})_0$. Показана возможность определения коэффициентов линейного приближения разностных уравнений d_1 и d_2 с помощью ЭВМ непосредственно из дифференциальных, минуя этап нахождения решения системы дифференциальных уравнений.

С учетом уравнений замыкания вычисляются собственные значения матрицы, характеризующей свободное движение замкнутого контура в зависимости от величины δ . Определяются границы устойчивости контура.

Далее проводится синтез контура. В основу синтеза положен алгебраический метод модального управления, разработанный для непрерывных систем с непрерывными и цифровыми регуляторами.

В нашем случае синтез сводится к введению обратных связей и вычислению коэффициентов обратных связей при которых свободное движение замкнутого контура характеризуется заданным распределением корней характеристического уравнения.

Проведен анализ динамических свойств контура тока двигателя 4А80А4 на рис. 4. Показаны корневые годографы контура для различных фиксированных значений величины угла регулирования α .

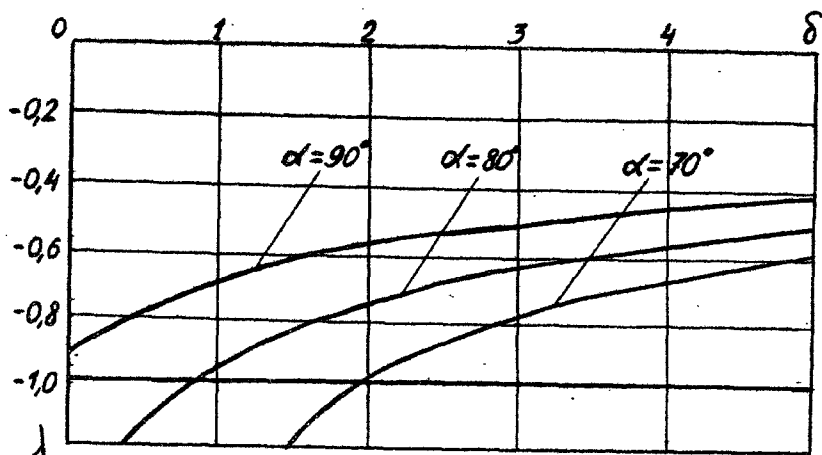


Рис. 4. Корневые годографы контура тока

Выполнена проверка результатов анализа контура регулирования тока АД с использованием цифровой модели.

Неустойчивость контура регулирования тока АД в большей степени проявляется при малых значениях углов регулирования α . Так, например, при $\delta = 0,5$ контур работает устойчиво, если сигнал задания по току I_1 определяет углы регулирования, большие 84° .

Рассмотрен синтез замкнутого контура регулирования тока который сводится к вычислению коэффициента k_{oc} в цепи обратной связи при выбранном δ и заданном значении корня характеристического уравнения.

В третьей главе проведен анализ и синтез динамических свойств контура частоты вращения. Как отмечалось ранее в основе субоптимальной системы управления АД по критерию минимума тока статора лежит замкнутый контур частоты вращения АД, работа которого осуществляется при постоянном сигнале задания по частоте вращения. Система, описывающая контур нелинейна, ввиду чего не представляется возможным получения коэффициентов линейного приближения матрицы B . Предложена ее статическая линеаризация. Ввиду того, что система дифференциальных уравнений имеет размерность пятого порядка, расчет коэффициентов линейного приближения разностных уравнений прямым аналитическим методом затруднен. Поэтому коэффициенты линейного приближения разностных уравнений с учетом особенностей физического характера ра-

ВОТЫ КОНТУРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД ПОЛУЧАЮТСЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ НЕПОСРЕДСТВЕННО ИЗ ИСХОДНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ. ПРОВЕДЕН АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД ТИПА 4А80А4. ПОКАЗАНО, ЧТО ПРИ ТРЕБУЕМОЙ ВЕЛИЧИНЕ δ СТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА КОНТУР НЕУСТОЙЧИВЕ. АНАЛИЗИРУЯ ПРИЧИНЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В РАБОТЕ КОНТУРА БЫЛ СДЕЛАН ВЫВОД, ЧТО ИСХОДЯ ИЗ ТЕОРИИ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОБУСЛОВЛЕНА СТРУКТУРОЙ САМОГО КОНТУРА. ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ЭТОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СОГЛАСНО ТЕОРИИ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕОБХОДИМО ВВЕДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ. ПРЕДЛОЖЕНО ВВЕДЕНИЕ В РАССМАТРИВАЕМОМ КОНТУРЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВНУТРЕННЕЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ СТАТОРА, Т. Е. СОЗДАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВНУТРЕННЕГО КОНТУРА (СМ. РИС. 4, ПУНКТИРНАЯ ЛИННЯ). ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОЗНАЧАЕТ ТО, ЧТО УЖЕ СУЩЕСТВУЕТ НЕЗАВИСИМЫЙ КОНТУР РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА АД, СЛУЖАЩИЙ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПУСКОВЫХ ТОКОВ АД. НА РИС. 5. ПОКАЗАН КОРНЕВОЙ ГОДОГРАФ КОНТУРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ $M_c = 0,3M_n$. АНАЛОГИЧНЫЕ ПРОВЕРКИ БЫЛИ ПРОВЕДЕНЫ И ДЛЯ ДРУГИХ ЗНАЧЕНИЙ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ВАЛУ АД И ПОКАЗАЛИ КАЧЕСТВЕННОЕ СОВПАДЕНИЕ ХАРАКТЕРА КОРНЕВОГО ГОДОГРАФА. НА КОНКРЕТНОМ ПРИМЕРЕ ПОКАЗАНА ВОЗМОЖНОСТЬ СИНТЕЗА ЗАДАННЫХ (ЖЕЛАЕМЫХ) ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА. НА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПРОВЕДЕНА ПРОВЕРКА РАБОТЫ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АД.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ ПРОВЕДЕНЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД, УЧИТЫВАЯ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ. РАЗРАБОТАНА УСТАНОВКА, ВКЛЮЧАЮЩАЯ В СЕБЯ ТПН С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРИСТОРАМИ, ТРЕХФАЗНЫЙ АД ТИПА 4А80В6 ($P_2 = 1,1$ кВт, $\omega_{r2} = 920$ об/мин). АД ПИТАЕТСЯ ПЕРЕМЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ 127 В И ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕТ ТОК $I_2 = 2,1$ А, КОТОРЫЙ УСЛОВНО ПРИНЯТ ЗА НОМИНАЛЬНЫЙ. В КАЧЕСТВЕ НАГРУЗКИ ИСПОЛЬЗОВАН ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА (ДПТ) С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ. ТИП ДВИГАТЕЛЯ 2ПН100МГУХЛ4 ($P_2 = 0,75$ кВт, $I_{2н} = 8,7$ А). ВАЛ ДПТ МЕХАНИЧЕСКИ СОЕДИНЕН С ВАЛОМ АД.

МОМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДПТ (ПРИ ПОСТОЯННОМ ПОТОКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ Φ) РЕГУЛИРОВАЛСЯ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЦЕПИ ЯКОРА.

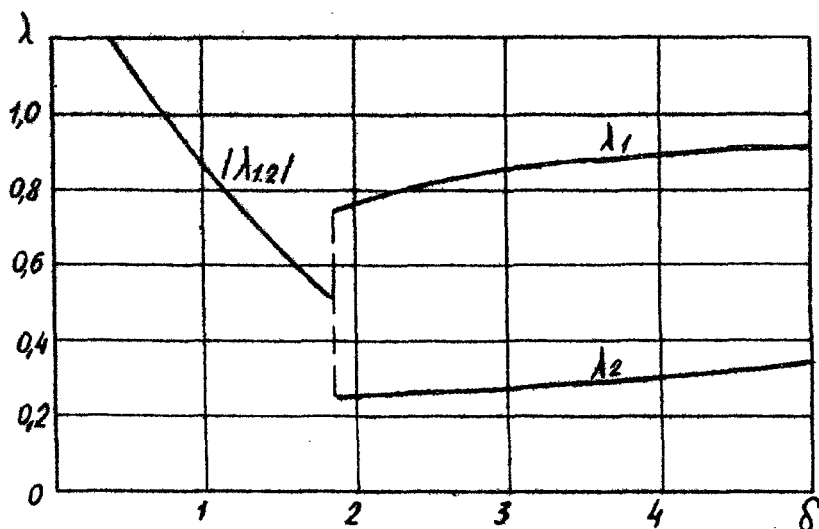


Рис. 5. Корневые годографы контура частоты вращения

Датчиком частоты вращения служит тахогенератор типа ТС - 1МУХЛ4, закрепленный на валу ДПТ. Датчиками тока являются трансформаторы тока типа УТТ - 5М ($I_{1н} = 15$ А, $I_{2н} = 5$ А). Результаты экспериментальных исследований замерялись с помощью измерительного комплекта типа К - 505.

Сигнал обратной связи по току содержит постоянную и переменную составляющие, что в конечном итоге приводит к уменьшению коэффициента усиления. Поэтому предложено введение в цепь обратной по току конденсатора, который пропускает только переменную составляющую. Тем самым дополнительный внутренний контур тока не вносит существенного уменьшения коэффициента усиления системы. За счет регулирования величины переменной составляющей обратной связи по току удается добиться устойчивой работы системы.

На разработанной установке был проведен ряд экспериментов. На рис. 6. представлены следующие экспериментальные электромеханические характеристики АД: 1 - нерегулируемого АД (при синусоидальном напряжении питания) от режима холостого хода до номинального; 2 - холостого хода; 3 - при моменте нагрузки $M_c = 0,2M_n$; 4 - при $M_c = 0,4M_n$; 5 - при $M_c = 0,6M_n$; 6 - при $M_c = 0,8M_n$; 7 - оптимальная кривая; 8 - предлагаемый в работах Ильинского Н.Ф. вариант субоптимальной характеристики, основанный на постоянстве скольжения; 9 - рекомендуемый вариант субоптимальной системы.

Сопоставление вариантов реализации субоптимальной системы управления АД по критерию минимума тока статора с статическим и астатическим регуляторами показало, что в первом случае удается добиваться снижения тока статора на 4 ... 14% по сравнению со вторым случаем. Достигнута устойчивая работа установки во всем диапазоне изменения нагрузки на валу АД: от холостого хода до номинальной.

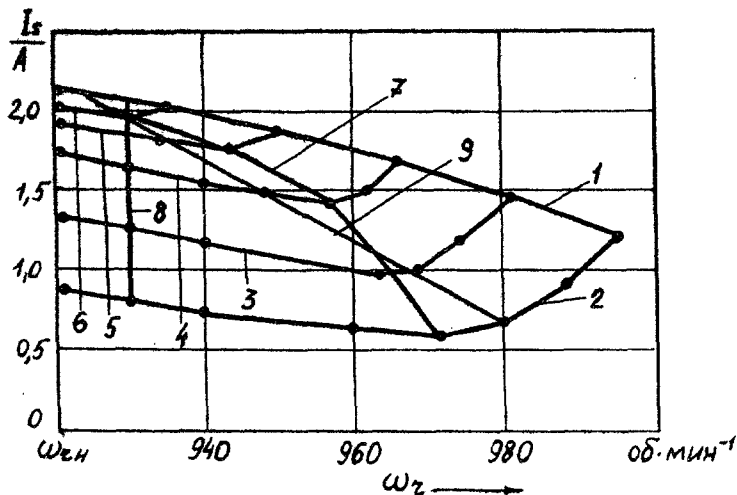


Рис. 6. Экспериментальные электромеханические характеристики АД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно - технической задачи разработки субоптимальной системы управления АД по критерию минимума тока статора, обеспечивающей снижение тока статора, путем регулирования напряжения с помощью ТПН при изменении нагрузки на валу АД от холостого хода до номинальной.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать следующие основные выводы:

1. На основе математической модели обобщенной двухфазной асинхронной машины разработана структурная схема и цифровая модель контура регулирования тока АД, управляемого от ТПН. Предварительные результаты моделирования показали наличие в контуре неустойчивых режимов работы, что обусловило дальнейшее его исследование с учетом дискретного характера работы ТПН.

2. На основе математической модели обобщенной двухфазной асинхронной машины разработана структурная схема и цифровая модель контура частоты вращения АД, работающего при постоянном сигнале задания по частоте вращения со статическим регулятором. Сигнал задания по частоте вращения выстраивается, исходя из условия обеспечения минимума (или близкого к минимуму) тока статора АД на холостом ходу. На основе математической модели получена оптимальная кривая минимума тока статора (при изменении нагрузки на валу АД) в зависимости от частоты вращения. Статический регулятор частоты вращения обеспечивает при моментах нагрузки, меньших номинального момента АД на характеристике, аппроксимирующей явную оптимального по минимуму тока статора, а при нагрузке, близкой к номинальной (чуть меньше ее) - выход АД в режим работы на естественной характеристике. Предварительные результаты моделирования показали неустойчивость в работе контура, откуда возникает необходимость его исследования с учетом дискретного характера работы ТПН.

3. Разработана методика анализа и синтеза динамических свойств контуров регулирования тока и частоты вращения АД с помощью линейного приближения разностных уравнений. В методике предусмотрен машинный метод получения коэффициентов линейного приближения разностных уравнений.

4. При анализе контура тока выявлено:

- что, в отличие от контуров с управляемым выпрямителем, ШИМ и ЧИМ, его корневой годограф располагается в области отрицательных значений и, поэтому синтез процессов конечной длительности невозможен;
- что понижение порядка разностного уравнения происходит за счет существования прерывистых токовых режимов.

5. По полученным результатам анализа динамических свойств контура частоты вращения АД можно сделать вывод, что за счет существования прерывистых токовых режимов происходит понижение порядка разностного уравнения. Проанализирована работа контура без и с дополнительной отрицательной обратной связью по току статора. Наличие комплексно-сопряженных корней обуславливает колебательный переходный процесс в контуре, а наличие двух действительных положительных корней объясняет наличие в дискретной экспоненте затухания переходного процесса только положительных значений.

6. Цифровое моделирование субоптимальной системы управления АД показало, что при нагрузке $M_c = 0,8M_n$ ток статора АД при управлении от субоптимальной системы на 5% меньше, чем при работе АД при том же

МОМЕНТЕ НАГРУЗКИ НА ЕСТЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ; ПРИ $M_c = 0,6M_n$ ТОК НА 10% МЕНЬШЕ; ПРИ $M_c = 0,4M_n$ ТОК НА 18% МЕНЬШЕ; ПРИ $M_c = 0,2M_n$ ТОК НА 36% МЕНЬШЕ; НА ХОЛОСТОМ ХОДУ - НА 57% МЕНЬШЕ.

7. С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА КАФЕДРЕ "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА" ЧГТУ РЕАЛИЗОВАН ПРАКТИЧЕСКИЙ ВАРИАНТ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ТОКА СТАТОРА НА ПРИМЕРЕ ТРЕХФАЗНОГО АД ТИПА 4А80В6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ СО СТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОКАЗАЛИ, ЧТО УДАЕТСЯ СНИЗИТЬ ТОК СТАТОРА АД НА: 43% ПРИ $M_c = 0$; 33% ПРИ $M_c = 0,2M_n$; 20% ПРИ $M_c = 0,4M_n$; 9% ПРИ $M_c = 0,6M_n$; 4% ПРИ $M_c = 0,8M_n$ ПО СРАВНЕНИЮ С РАБОТОЙ АД ПРИ ТЕХ ЖЕ ЗНАЧЕНИЯХ МОМЕНТОВ НАГРУЗКИ НА ЕСТЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ.

8. ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АД ТИПА 4А80В6 ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ТОКА СТАТОРА С АСТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОКАЗАЛИ, ЧТО ЕСЛИ ПРИ МОМЕНТАХ НАГРУЗКИ $M_c = 0,8M_n$ И $M_c = 0$ ТОКИ СТАТОРА АД ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМЫ С АСТАТИЧЕСКИМ И СТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРАКТИЧЕСКИ СОВПАДАЮТ, ТО ПРИ $M_c = 0,6M_n$ ТОК СТАТОРА АД, УПРАВЛЯЕМОГО ОТ СУБОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С АСТАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ, НА 4%, ПРИ $M_c = 0,4M_n$ - НА 10%, А ПРИ $M_c = 0,2M_n$ - НА 14% БОЛЬШЕ, ЧЕМ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РЕГУЛЯТОРЕ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих научных трудах:

1. Гладышев С.П., Бакин А.А., Гладышев П.С. Построение механических характеристик асинхронных двигателей на основе цифровых динамических моделей. - М.: 1994 - Рукопись деп. в Информэлектро, № 18 - эт 94. - 21 с.

2. Гладышев С.П., Бакин А.А., Гладышев П.С. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением величины подводимого напряжения. // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Тематический сборник научных трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1994 - С. 15 - 19.

3. Гладышев С.П., Бакин А.А., Гладышев П.С. Цифровое моделирование тиристорного регулятора частоты вращения асинхронного двигателя. - М.: 1994 - Рукопись деп. в Информэлектро, № 5163 - А. - 27 с.

4. Гладышев С.П., Бакин А.А., Гладышев П.С. Уменьшение тока холостого хода асинхронного двигателя с помощью тиристорного коммутатора. - М.: 1994 - Рукопись деп. в Информэлектро, № 5176 - В. - 19 с.

5. Гладышев С.П., Бакин А.А., Гладышев П.С. Исследование устойчивости тиристорного регулятора частоты вращения асинхронного двигателя

на цифровой модели. - М.: 1994 - Рукопись деп. в Информэлектро, № 45 - ЭТ 94. - 26 с.

6. Гладышев С.П., Чугаев В.В., Бакин А.А. Анализ и синтез динамических свойств контура тока асинхронного двигателя с помощью разностных уравнений // Тез. докл. Международной научно-технической конференции по преобразовательной технике. Новосибирский электротехнический институт. - Новосибирск, 1994.-С. 26 - 27.

7. GLADYSHEV S.P., BAKIN A.A., GLADYSHEV P.S. THE DYNAMIC OF THE CONTROL LOOPS OF THE ALTERNATING VOLTAGE THYRISTOR CONVERTER. // INT. CONF. - THE DYNAMIC OF THE NON - LINEAR SYSTEMS. THE TRINITY COLLEGE, DUBLIN, IRELAND, 1995

8. Гладышев С.П., Бакин А.А., Гладышев П.С. Использование модели асинхронного двигателя при выполнении семестровых заданий // Компьютеризация учебного процесса по электротехническим дисциплинам: Тез. докл. научно — методической конференции. — Астрахань, 1995.-С. 31.



**ИЗДАТЕЛЬСТВО ЧЕЛЯБИНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ЛР N 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 24.05.96.
Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93.
Уч. -изд. л. 0,96. Тираж 100 экз. Заказ 116/ 268.

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.