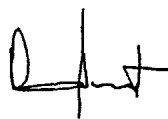


На правах рукописи



Однокопылов Георгий Иванович

**МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ
ДВИГАТЕЛЕМ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ**

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск-2005

Работа выполнена в Томском государственном архитектурно-строительном университете

Научный руководитель: - кандидат технических наук, доцент
Зайцев Александр Петрович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Мальшенко Александр Максимович

- кандидат технических наук, доцент
Семенов Валерий Дмитриевич

Ведущая организация: - СКБ «Сибэлектромотор» (г. Томск)

I Защита диссертации состоится 25 мая 2005 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.03 в ауд. 331 8 учебного корпуса Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « 23 » апреля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Существуют области применения вентильных двигателей (ВД), для которых прекращение функционирования может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования с риском для персонала, большим экономическим потерям при авариях на необслуживаемых объектах эксплуатации с безостановочным циклом работы в течение продолжительного времени, браку продукции при продолжительном цикле обработки деталей (доли-единицы часов). Для таких областей применения ВД задача повышения надежности (живучести) становится определяющей.

Известные разработки по резервированию систем ВД позволяют решать задачу повышения надежности, но ценой повышенных аппаратных затрат.

Существующие системы ВД с алгоритмическим восстановлением работоспособности трехфазного ВД (в двухфазном режиме), применимы для прямоугольной формы тока в обмотках, но для ВД с расширенным диапазоном частоты вращения с синусоидальной формой тока не могут быть применены.

Предложены новые подходы в решении вопроса повышения надежности за счет микроконтроллерного управления с реализацией алгоритма восстановления в аварийной ситуации (в двухфазном режиме) и применения звена повышенной частоты в ВД.

Вышеизложенное обуславливает актуальность задач, решаемых в диссертации, определяет цель и задачи исследований.

Цель работы. Разработка средств повышения надежности вентильного электропривода.

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

- исследовать на математической модели аварийный двухфазный режим трехфазного ВД;
- разработать и экспериментально проверить методику повышения надежности ВД, обеспечивающую работу в аварийном двухфазном режиме трехфазного двигателя;
- разработать технические решения по повышению надежности функционирования электродвигателей переменного тока и преобразователей частоты на основе промежуточного звена повышенной частоты.

Методы исследования. В диссертационной работе применены: метод коммутационных разрывных функций, спектральный метод анализа, математическое моделирование и программирование. Проверка теоретических исследований осуществлялась экспериментальными методами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выбран и обоснован угол нагрузки в результате исследований на математической модели аварийного двухфазного режима трехфазного ВД. Использование угла Ψ_A между обратными векторами ЭДС и вектором тока фазы одной из двух фаз в аварийном двухфазном режиме позволяет получить максимум активной мощности, максимум момента для угла нагрузки $\Psi_A = \pi/6$, при этом

активные мощности фаз равны, и максимум активной мощности не зависит от рабочей частоты и величины тока в фазах.

2. Получен алгоритм восстановления работоспособности трехфазного ВД в двухфазном режиме, позволяющий реализовать этот режим в системе управления ВД с микроконтроллерным управлением при наличии средств диагностики неисправностей. Научная новизна подтверждена техническим решением, защищенным авторским свидетельством А.с. № 1746482.

3. Разработаны на основе промежуточного звена повышенной частоты технические решения по повышению надежности электродвигателей переменного тока и преобразователей частоты.

В ВД на основе синхронного двигателя (СД) с расщепленными обмотками надежность повышается за счет резервирования силовых цепей с улучшением качества процесса регулирования скорости и обеспечением режима рекуперативного торможения. Научная новизна подтверждается техническим решением, защищенным авторским свидетельством А.с. № 1356171.

В частотно-регулируемом электроприводе на основе асинхронного двигателя (АД) надежность повышается за счет увеличения перегрузочной способности электродвигателя и упрощения конструкции. Научная новизна подтверждается техническим решением, защищенным патентом № 2014722.

В преобразователе m - фазного напряжения для вентильного электропривода надежность повышается за счет работы преобразовательных ячеек в однократном режиме при расширении диапазона регулирования в 2 раза. Научная новизна подтверждается техническим решением, защищенным авторским свидетельством А.с. № 1821881.

Разработано техническое решение повышения надежности электродвигателей переменного тока на основе измерительного частотного преобразователя тока. Научная новизна подтверждается техническим решением, защищенным авторским свидетельством А.с. № 1402949.

Практическая ценность работы:

- создана методика повышения надежности (живучести) ВД, обеспечивающая работу в аварийном двухфазном режиме трехфазного двигателя с микроконтроллерным управлением на основе алгоритма восстановления работоспособности;
- разработан экспериментальный ВД с поддержкой алгоритма восстановления работоспособности в аварийной ситуации с двухфазным режимом, позволяющий исследовать электропривод в рабочем и аварийном режимах работы и подтвердить методику повышения надежности ВД;
- разработанная математическая модель трехфазного СД в аварийном двухфазном режиме позволила настроить ВД на максимум момента в аварийной ситуации;
- разработаны датчики состояния преобразовательных ячеек для диагностики аварийной ситуации ВД;

- разработаны технические решения по повышению надежности электродвигателей и преобразователей частоты на основе промежуточного звена повышенной частоты.

Реализация результатов работы. На предприятии ОАО «Новосибирский завод им. Коминтерна» внедрена методика повышения надежности ВД, обеспечивающая работу в аварийном двухфазном режиме трехфазного двигателя. В разработке методики использовано техническое решение по А.с. № 1746482. Разработаны, изготовлены и внедрены на предприятии п/я Ю-9192: элементы системы цифрового вентильного электропривода. В разработке использовано техническое решение по А.с. № 1402949. На предприятиях ПО «Юганскнефтегаз» и ПО «Томскнефть» внедрена микропроцессорная система управления, осуществляющая диагностику и контроль терминала бурильщика.

На защиту выносятся:

1. Методика выбора и обоснование угла нагрузки в аварийном двухфазном режиме трехфазного ВД.
2. Алгоритм восстановления работоспособности трехфазного ВД с микроконтроллерным управлением в аварийном двухфазном режиме.
3. Средства повышения надежности вентильных электродвигателей и преобразователей частоты, разработанные на основе промежуточного звена повышенной частоты.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались на I дальневосточной научно-практической конференции. «Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий», Комсомольск-на-Амуре, 1986г.; на всесоюзном научно-техническом совещании «Проблемы управления промышленными электромеханическими системами», Ульяновск, 1989г.; на республиканской научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы», Томск, 1991г.; на втором международном научно-техническом семинаре «Нетрадиционные технологии в строительстве», Томск, 2001г.; на IV международной научно-технической конференции «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения», Новочеркасск, 2004г.; на V международной научно-технической конференции «Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы», Новочеркасск, 2004г.

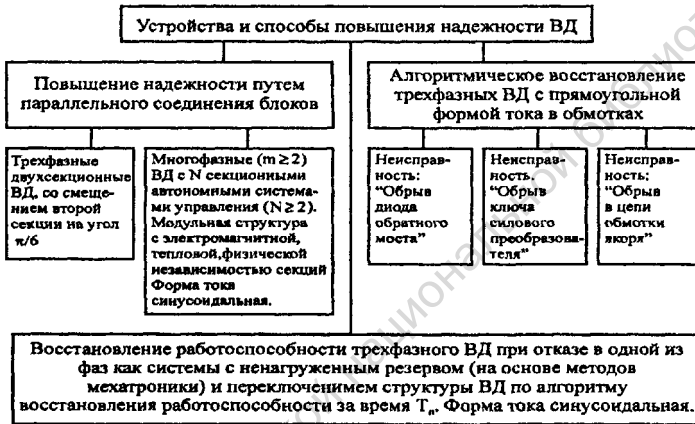
Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 17 научных работах, в том числе, 6 написанных лично автором и 11 работ, написанных в соавторстве, 2 отчетах по НИР, 10 статьях и тезисах докладов, описаниях 1 патента и 4 авторских свидетельства.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, выполнена на 156 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 10 таблиц, список использованной литературы из 161 наименования и 4 приложений на 21 странице.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель диссертационной работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, структура и объем работы.

В первой главе проведен анализ аварийных режимов и методов повышения надежности ВД. Известные устройства и способы повышения надежности трехфазных ВД в аварийном двухфазном режиме представлены в таблице.



Известные устройства и способы построения ВД повышенной надежности позволяют обеспечить работоспособность при резервировании путем параллельного соединения блоков с синусоидальной формой тока в обмотках. При алгоритмическом восстановлении ВД функционирование обеспечивается для прямоугольной формы тока в обмотках.

Известны условия существования кругового вращающегося магнитного поля в двухфазном режиме трехфазной электрической машины с двумя произвольно сдвинутыми в пространстве обмотками: $\delta + \beta = \pi$; $F_{AM} = F_{CM}$, где F_{AM} , F_{CM} амплитудные значения магнитодвижущих сил, δ - угол пространственного сдвига обмоток, $\delta = 2\pi/3$, β - угол временного сдвига токов обмоток, $\beta = \pi/3$. При наличии регуляторов тока в системе управления ВД: $F_{AM} = F_{CM}$.

Из имеющихся технических предпосылок и применения методов мехатроники можно рассматривать возможность повышения надежности в случае аварийного отключения одной из фаз трехфазного ВД с позиций повышения надежности системы с ненагруженным резервом и в случае реализации этой возможности обеспечить живучесть в аварийном двухфазном режиме эксплуатации. Определяющим параметром является время T_n переключения структуры ВД при возникновении аварийной ситуации.

Показано, что применение промежуточного звена повышенной частоты при разработке элементов и систем вентильного электропривода является важным средством повышения надежности и расширения функциональных возможностей электропривода.

Во второй главе проведен анализ двухфазного режима трехфазного ВД. На рис. 1 изображена схема замещения СД при обрыве фазы "В".

Схеме замещения в установившемся режиме соответствуют уравнения в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_A \cdot r + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_A \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_C \cdot X_M - \dot{E}_A; \\ \dot{U}_C &= \dot{I}_C \cdot r + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_S + j \cdot \dot{I}_C \cdot X_A - j \cdot \dot{I}_A \cdot X_M - \dot{E}_C. \end{aligned} \quad (1)$$

Векторная диаграмма трехфазного СД в режиме обрыва фазы "В" (двухфазный режим), построенная по уравнениям (1) для определенного положения сдвинутых по фазе на угол $\beta = \pi/3$ двух равных по величине векторов тока \dot{I}_A и \dot{I}_C , представлена на рис. 2. Обозначения,

представленные в уравнениях (1) и на рис. 2: $-\dot{E}_B, -\dot{E}_A, -\dot{E}_C$ – обратные вектора ЭДС фаз А, В, С соответственно; $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – вектора фазных напряжений; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – вектора фазных токов; r – активное сопротивление цепи фазной обмотки; X_S – индуктивное сопротивление рассеяния; X_M – сопротивление, обусловленное взаимоиנדукцией между фазными обмотками; X_A – индуктивное сопротивление реакции якоря; $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ – углы между обратными векторами ЭДС и векторами напряжений фаз А, В, С соответственно; $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы между векторами напряжений и токов фаз А, В, С соответственно; ψ_A, ψ_B, ψ_C – углы между обратными векторами ЭДС и векторами токов фаз А, В, С соответственно; ON – ось начала отсчета углов α и γ ; α – угол между осью ON и вектором фазного напряжения \dot{U}_A ; γ – угол между осью ON и вектором фазного тока \dot{I}_A ; L_S, L_A, M – индуктивности, соответствующие индуктивным сопротивлениям X_S, X_A, X_M .

Для расчетов на компьютере уравнения (1) представлены в тригонометрической форме:

уравнения (1) представлены в тригонометрической форме:

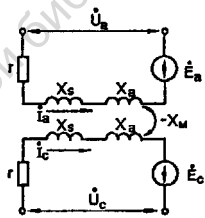


Рис.1.Схема замещения СД при обрыве фазы "В"

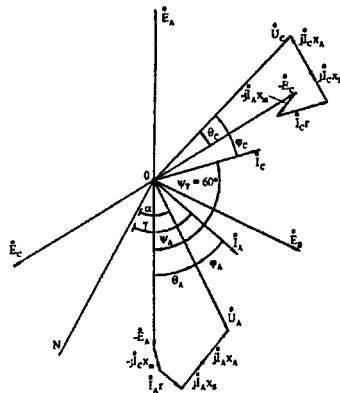


Рис. 2. Векторная диаграмма трехфазного СД в двухфазном аварийном режиме

$$\begin{aligned}
 u_A &= I_{AM} \cdot \sin(\omega t + \pi + \psi_A) \cdot r + I_{AM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{3\pi}{2} + \psi_A\right) \cdot (L_A + L_S) \cdot \omega + \\
 &\quad \text{sign}(\varphi_C) \cdot I_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6} + \psi_A\right) \cdot \omega \cdot L_M + E_{AM} \cdot \sin(\omega t + \pi), \\
 u_C &= I_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \psi_A\right) \cdot r + I_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{11\pi}{6} + \psi_A\right) \cdot (L_A + L_S) \cdot \omega + \\
 &\quad \text{sign}(\varphi_A) \cdot I_{AM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \psi_A\right) \cdot \omega \cdot L_M + E_{CM} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{3}\right), \quad (2)
 \end{aligned}$$

где I_{AM}, I_{CM} - амплитудные значения векторов фазных токов равной амплитуды - E_{AM}, E_{CM} - амплитудные значения векторов фазных ЭДС равной амплитуды, функция $\text{sign}(\varphi)$ - знак угла φ ($\text{sign}(\varphi)=1$, если $\varphi \geq 0$; $\text{sign}(\varphi)=-1$, если $\varphi < 0$).

Активные P_A, P_C (Вт), реактивные Q_A, Q_C (Вар), суммарная активная P_Σ (Вт), суммарная реактивная Q_Σ (Вар) мощности, момент на валу M (Нм) - рассчитываются по выражениям:

$$\begin{aligned}
 P_A &= \frac{U_{AM} \cdot I_{AM} \cdot \cos \varphi_A}{2}; Q_A = \frac{U_{AM} \cdot I_{AM} \cdot \sin \varphi_A}{2}; P_C = \frac{U_{CM} \cdot I_{CM} \cdot \cos \varphi_C}{2}; Q_C = \frac{U_{CM} \cdot I_{CM} \cdot \sin \varphi_C}{2}; \\
 P_\Sigma &= P_A + P_C; Q_\Sigma = Q_A + Q_C; M = \frac{P_\Sigma - 2 \cdot I^2 \cdot r}{\omega}; n = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad \omega = 2\pi f, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где f - частота формирования фазных напряжений и токов (Гц), ω - угловая синхронная частота вращения (рад/с), n - синхронная частота вращения (об/мин), p - число пар полюсов СД ДСТ-0,18.

В результате расчета получены следующие функциональные зависимости: $P_\Sigma(I, \psi)$, $P_\Sigma(n, \psi)$, $Q_\Sigma(I, \psi)$, $Q_\Sigma(n, \psi)$ рис. 3...6.

Для построения системы управления с восстановлением работоспособности в аварийном двухфазном режиме работы необходимо провести на основе математической модели СД обоснование и выбор угла нагрузки.

В трехфазном режиме угол нагрузки задается углом 0. Момент ВД имеет максимум при максимуме активной мощности для углов $\theta_A = \theta_B = \theta_C = \theta = \pi/2$: В двухфазном режиме углы θ_A и θ_C различны, т.к. различны в общем случае вектора фазных напряжений \vec{U}_A и \vec{U}_C по амплитуде, а их фазовые сдвиги φ_A и φ_C относительно векторов тока могут иметь разные знаки. Поэтому построение системы управления ВД в двухфазном режиме с использованием углов θ_A и θ_C в качестве параметров, определяющих максимум момента нецелесообразно. В силу этого в двухфазном режиме момент ВД может быть определен в функции угла ψ_A . На рис. 3,4 можно видеть, что максимум активной мощности при значении угла $\psi_A = \pi/6$ не зависит от величины частоты вращения и величины рабочего тока. Как видно из рис. 3,4 угол ψ может быть сопостав-

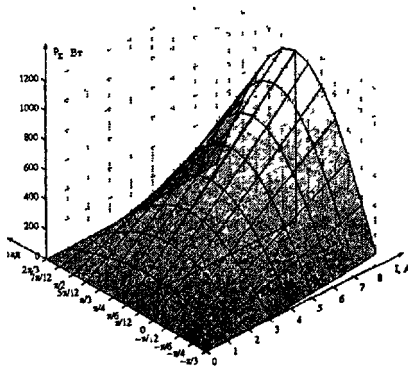


Рис 3 Зависимость активной мощности от тока и угла Ψ

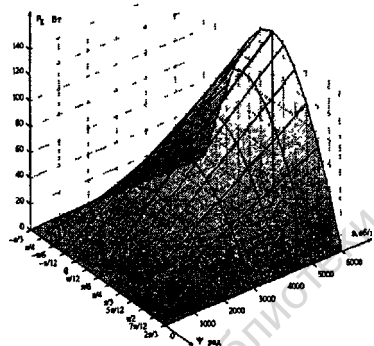


Рис 4. Зависимость активной мощности от частоты вращения и угла Ψ

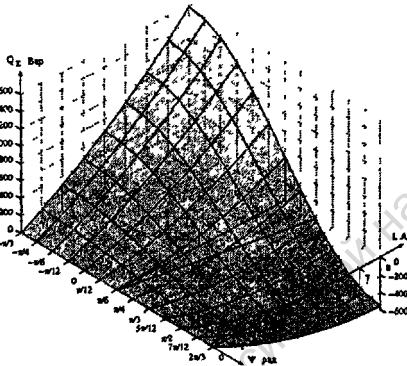


Рис 5. Зависимость реактивной мощности от тока и угла Ψ

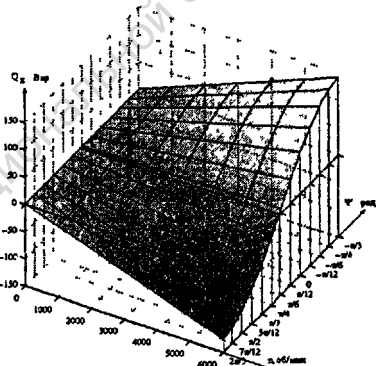


Рис 6 Зависимость реактивной мощности от частоты вращения и угла Ψ

лен с углом θ , определяющим максимум момента в трехфазном режиме, по форме зависимости момента от углов нагрузки θ, ψ и диапазону угла нагрузки π радиан. Для определения допустимых значений величины и знака погрешности задания угла ψ можно рассмотреть зависимость суммарной реактивной мощности от частоты вращения, тока и угла ψ на рис. 5,6. Зависимость $Q_{\Sigma}(I, \psi)$ построена при условии $n=n_{max}=6000(\text{об/мин})$. Зависимость $Q_{\Sigma}(\omega, \psi)$ построена при: $I=1\text{А}$. Для значений угла ψ в диапазоне $\pi/6 \dots \pi/3$ радиан функция пересекает нулевую плоскость. Спад активной мощности для зависимостей $P_{\Sigma}(\omega, \psi), P_{\Sigma}(I, \psi)$ при изменении значения угла ψ в диапазоне $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$ радиан не превышает 5%. Поэтому при выборе значения угла ψ_A целесообразно выбирать в диапазоне $\psi_A = \pi/6 \dots \pi/4$.

Механические характеристики ВД в двухфазном режиме для $\psi_A = \pi/6$:

$$\begin{aligned}\omega_A &= -\frac{60[U_C \cdot \cos(\varphi_C - \pi/6) - U_A \cdot \cos(\varphi_A + \pi/6)]}{pI(L_A + L_C - 2M)}, \\ \varphi_A &= \arctg \frac{1/2 \cdot E_0 - I\omega(L_A + L_C - 1/2 \cdot M)}{\sqrt{3}/2 \cdot E_0 + I(r + \sqrt{3}/2 \cdot \omega M)}, \\ \varphi_C &= \arctg \frac{1/2 \cdot E_0 + I\omega(L_A + L_C - 1/2 \cdot M)}{\sqrt{3}/2 \cdot E_0 + I(r - \sqrt{3}/2 \cdot \omega M)}.\end{aligned}\quad (4)$$

Суммарная реактивная мощность:

$$Q_{\Sigma} = \omega \cdot p \cdot I^2 \cdot (L_A + L_C - 2M) / 30. \quad (5)$$

Суммарный потребляемый ток:

$$I_{\Sigma} = I_M \left(1 + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \frac{\pi}{3})\right). \quad (6)$$

Для решения задачи повышения надежности функционирования ВД в при аварийной ситуации (повышения живучести) необходимо: выполнить силовой преобразователь (СП) по схеме с развязанными фазами (по мостовой или полумостовой схеме), ВД выполняется по принципу подчиненного регулирования (в минимальном составе это моментный двигатель с обратными связями по току и угловому положению ротора), ВД должен иметь в СП средства диагностики (опрос с частотой ШИМ) в виде датчиков состояния преобразовательных ячеек, которые вырабатывают 3 бита отказа (ячейки СП или фазной обмотки двигателя), ВД строится на основе управляющего микроконтроллера с программным заданием фазных токов с частотой ШИМ и поддержкой алгоритма восстановления в аварийном двухфазном режиме представленном в виде заданий на базные токи.

$$I_A = I_{\omega} \cdot \bar{a} \cdot \sin(2^{\sigma} - 1 - \alpha + \varphi_k) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot b + \arctg \omega L p / r + I_{A0};$$

$$I_B = I_{\omega} \cdot \bar{b} \cdot \sin(2^{\sigma} - 1 - \alpha + \varphi_k) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot c + \arctg \omega L p / r + 2\pi/3 + I_{B0};$$

$$I_C = I_{\omega} \cdot \bar{c} \cdot \sin(2^{\sigma} - 1 - \alpha + \varphi_k) \cdot \bar{d} + (\alpha + \psi_A - \theta) \cdot d \pm \pi \cdot a + \arctg \omega L p / r + 4\pi/3 + I_{C0}, \quad (7)$$

где: I_{ω} – значение амплитуды формируемых фазных токов; α – значение текущего двоичного кода датчика положения ротора; σ – число двоичных разрядов выходного кода датчика положения ротора; $\arctg \omega L p / r$ – угол сдвига фаз между током и напряжением для компенсации индуктивного сопротивления обмоток якоря с ростом частоты вращения (рад) φ_k – угол коррекции угловой характеристики (рад) в трехфазном режиме для совмещения максимумов момента ВД в трехфазном режиме при $\theta = \pi/2$ и в двухфазном режиме при $\psi_A = \pi/6$ (для сокращения времени T_n); I_{A0}, I_{B0}, I_{C0} – корректирующие коды заданий на токи фаз позволяющие получить при нулевом задании I_{ω} – нулевой ток в нагрузке; a, b, c – значения битов слова состояния электропривода по отказам (вырабатываются датчиками состояния преобразовательных ячеек); d – значение бита вычисляемого по логическому выражению $d = a \cup b \cup c$ (\cup – логическая операция ИЛИ), если $d = 1$ – есть отказ в одной из фаз; $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ – инверсные значения a, b, c, d . В случае $a = b = c = d = 0, \bar{a} = \bar{b} = \bar{c} = \bar{d} = 1$ система управления ВД рабо-

тает в трехфазном режиме и логическое умножение на соответствующий бит отказа a, b, c значения $\pm \pi$ (в приведенных выше выражениях(7)) обеспечивает формирование фазового сдвига тока $;\pi/3$ в двухфазном режиме. Если один из битов отказа не нулевой - в оставшихся фазах реализуется алгоритм восстановления, а в отказавшую фазу управление не поступает (обеспечивается логическим умножением на соответствующий инверсный бит отказа $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$, который принимает нулевое значение.

В третьей главе диссертационной работы рассмотрено применение промежуточного звена повышенной частоты для повышения надежности и расширения функциональных возможностей электропривода.

Разработан вентильный электропривод (ВЭ) с резервированием силовых цепей. Исследования ВЭ проведены с привлечением аппарата коммутационных разрывных функций. Токи с амплитудой I_q , протекающие в n расщепленных обмотках m фазного СД, под действием напряжений n m демодуляторов (выполненных на ключах переменного тока) создают соответствующие намагничивающие силы, пульсации которых смещены во времени друг относительно друга. Результирующий вектор намагничивающей силы равен алгебраической сумме векторов, создаваемых токами в n расщепленных обмотках одной фазы СД. Частота пульсаций увеличивается пропорционально n . Тем самым в якоре СД реализуется многофазная широтно - импульсная модуляция суммарной намагничивающей силы. Выражения для потребляемых токов трехфазной питающей

сети:

$$I_A = \frac{m \cdot n}{2 \cdot K_{TP}} \cdot I_q \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha;$$

$$I_B = \frac{m \cdot n}{2 \cdot K_{TP}} \cdot I_q \cdot \cos \varphi \cdot \sin \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right),$$

$$I_C = \frac{m \cdot n}{2 \cdot K_{TP}} \cdot I_q \cdot \cos \varphi \cdot \sin \left(\alpha + \frac{4\pi}{3} \right), \quad (8)$$

получены следующие положительные свойства: повышена надежность за счет резервирования силовых цепей; повышена надежность за счет обеспечения режима рекуперативного торможения; в любом режиме работы электропривода из питающей сети потребляется синусоидальный ток, совпадающий по частоте и фазе с напряжением питающей сети; расширен диапазон регулирования частоты вращения за счет улучшения формы суммарной намагничивающей силы статорной обмотки практически в n^2 раз и линейной интерполяции кода датчика положения ротора.

Разработанный преобразователь m -фазного напряжения (ПН) (рис. 7,8) основывается на принципе структурно-алгоритмической организации в звене повышенной частоты и предназначен для построения рекуперативных цифровых вентильных электроприводов с улучшенным качеством выходного напряжения. ПН (выполнен на ключах переменного тока) позволяет обеспечить повышение надежности работы в номинальном режиме (однотактный режим работы высокочастотных трансформаторов).

Новые функциональные возможности в преобразователе напряжения с

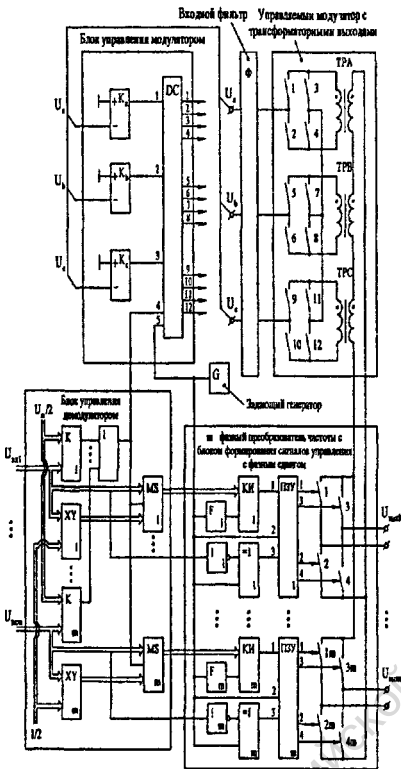


Рис. 7. Преобразователь m -фазного напряжения для ВД

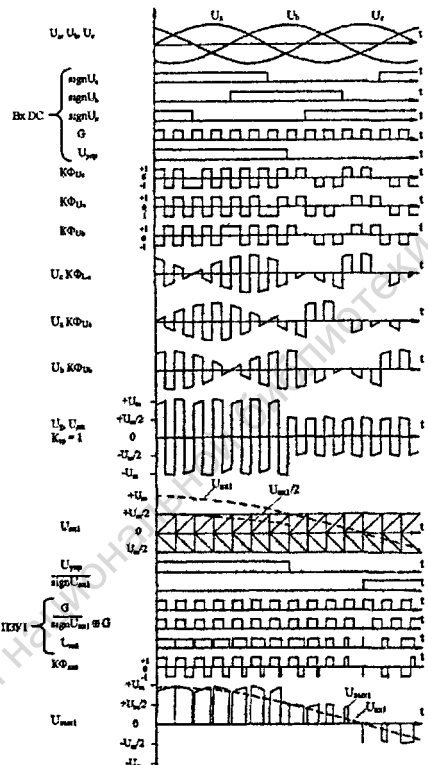


Рис. 8. Временные диаграммы преобразователя m -фазного напряжения для ВД

цифровым управлением получены алгоритмическим путем в звене повышенной частоты. Это позволило усложнить функционирование схемы управления силовыми ключами мостовой преобразовательной ячейки (на четырех ключах) и управление по методу ШИМ преобразовать в управление по методу АШИМ.

Разработанный частотно-регулируемый рекуперативный электропривод (ЧЭ) со звеном повышенной частоты выполнен на основе двухфазного АД. Суммарное магнитное поле в фазе, создается изолированными секциями каждой из m (по числу фаз питающей сети) расщепленных обмоток фазы статора АД подключенных к соответствующим модуляторам (выполненных на ключах переменного тока) с ШИМ модуляцией. Вектор результирующей магнитной индукции, пульсирующий по величине от $-1,5 B_m$ до $+1,5 B_m$ с повышенной частотой, вращается с угловой частотой Ω . Такой подход в формировании враща-

ющегося магнитного поля позволяет получить инфранизкочастотный режим вращения АД с обеспечением требуемой перегрузочной способности, отсутствуют пульсации вращающегося момента с частотой питающей сети. При этом двигатель потребляет из питающей m -фазной сети синусоидальный ток при

любом характере нагрузки; обеспечивает свободный обмен энергией между питающей сетью и АД; наличие повышенной промежуточной частоты позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели АД; при наличии в электроприводе звена повышенной частоты отсутствуют промежуточные высоко-

частотные трансформаторы, что обеспечивает однократное преобразование электрической энергии с высоким КПД.

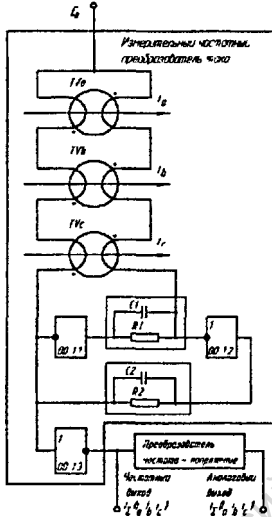


Рис. 9 Измерительный частотный преобразователь тока

Разработанный трехфазный (в общем случае m -фазный) измерительный частотный преобразователь тока (ИЧПТ) (рис. 9) предназначен для контроля тока потребления многофазных электрических систем и диагностики электропривода. Свойства ИЧПТ в электроприводе: обладает высоким быстродействием (время реакции единицы микросекунд) и может быть применен в преобразователях частоты в том числе с промежуточным звеном повышенной частоты. Наличие высокочастотных трансформаторов в ИЧПТ позволяет в 3...5 раз улучшить массогабаритные показатели датчика, по сравнению с трансформаторами тока, работающими на частоте 50 Гц. ИЧПТ обеспечивает контроль ток в диапазоне частот не менее чем 0-100 кГц, позволяет исключить звено аналого-цифрового преобразования за счет прямого преобразования ток-код. Частотный преобразователь тока формирует модуль суммарного токового сигнала для анализа m -фазной системы токов.

В четвертой главе диссертационной работы приводятся результаты экспериментальных исследований аварийных режимов ВД. Для проверки работоспособности ВД в аварийном двухфазном режиме и сравнительного анализа был разработан ВД с программным управлением от компьютера. На рис. 10 приведена функциональная схема испытательного стенда. Измерения обеспечивались регистратором параметров ИВК МПС-300 (сертификат об утверждении типа средств измерений RU.C.34.010.A № 9569 Госстандарта России) с частотой запуска 64 КГц и разрешением 16 двоичных разрядов.

Программы управления электроприводом написаны на языке Pascal, программы ввода - вывода для портов написаны на языке Assembler. Программа позволяет переключать структуру электропривода по сигналу коммутации режимов 3ф/2ф: 3-фазный режим/2- фазный с неконтролируемой аварийной си-

туацией, 3-фазный режим/2фазный с активизированным алгоритмом восстановления. Компьютер формирует задания на фазные токи по выражениям(7).

На рис. 11 приведены угловые характеристики ВД, снятые для трех и двухфазного режима работы в области номинальных моментов ВД при значении угла коррекции $\varphi_k = \pi/4.38$. На рис. 11 обозначено: M_{32} и M_{31} характеристики измеренные для трехфазного режима, M_{22} и M_{21} - для двухфазного режима ВД.

На рис. 11 видно, что форма зависимостей для трех - и двухфазного режимов подобна, но с более острой вершиной в случае двух фаз.

На рис. 12 приведены совмещенные временные диаграммы электромеханических переходных процессов рабочего трехфазного режима ВД с переключением в аварийный двухфазный режим с активизированным алгоритмом восстановления и без алгоритма восстановления для величин величин: M , I_{Σ} , α , ω , $2\phi/3\phi$ в пределах 14... 18 оборотов вала. Из диаграмм видно, что за 0.75 с в аварийном двухфазном режиме (без алгоритма восстановления) частота вращения ВД падает практически в 2 раза, а в аварийном режиме с активизированным алгоритмом восстановления - падение частоты вращения составляет не более 10%. На рис. 13 приведены развернутые временные диаграммы (в пределах 1 оборота) электрических переходных процессов рабочего трехфазного режима ВД с переключением в аварийный двухфазный режим с активизированным алгоритмом восстановления по сигналу $3\phi/2\phi$ для следующих величин: фазных то-

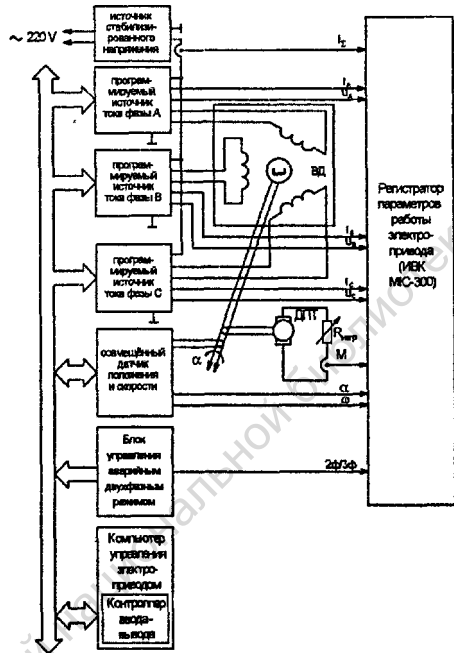


Рис. 10. Функциональная схема испытательного стенда

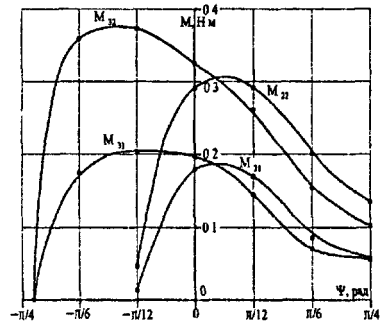


Рис. 11. Угловые характеристики ВД в трех и двухфазном режимах работы

электрических переходных процессов рабочего трехфазного режима ВД с переключением в аварийный двухфазный режим с активизированным алгоритмом восстановления по сигналу $3\phi/2\phi$ для следующих величин: фазных то-

ков I_A, I_B, I_C ; напряжений U_A, U_B, U_C ; момента M ; суммарного потребляемого тока силового преобразователя I_{Σ} ; сигнала датчика положения α ; частоты вращения на валу; сигнала коммутации режимов 2ф/3ф. Процесс активизации алгоритма восстановления осуществляется следующим образом. Результатом появления аварийной ситуации является падение суммарного потребляемого тока ВД ниже установленного значения в трехфазном режиме. Через время диагностики T_d блоком управления аварийным двухфазным режимом формируется фронт сигнала активизации алгоритма восстановления (диаграмма 3ф/2ф). В течение времени T_A процесс является неуправляемым, что приводит к спадку потребляемого тока на 1..2%. С момента активизации алгоритма протекает процесс переключения

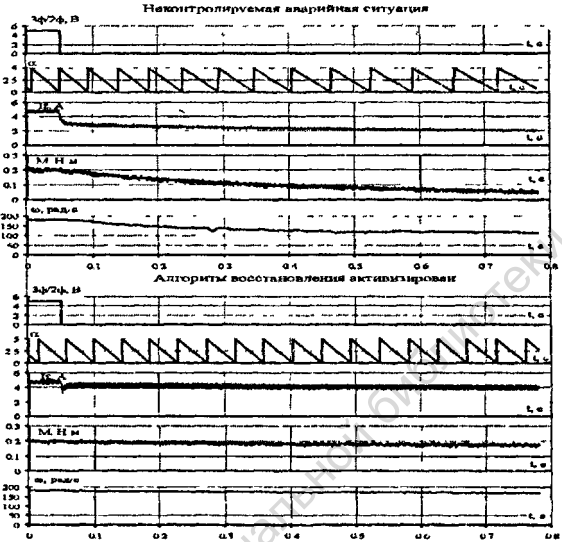


Рис. 12. Временные диаграммы электромеханических переходных процессов ВД

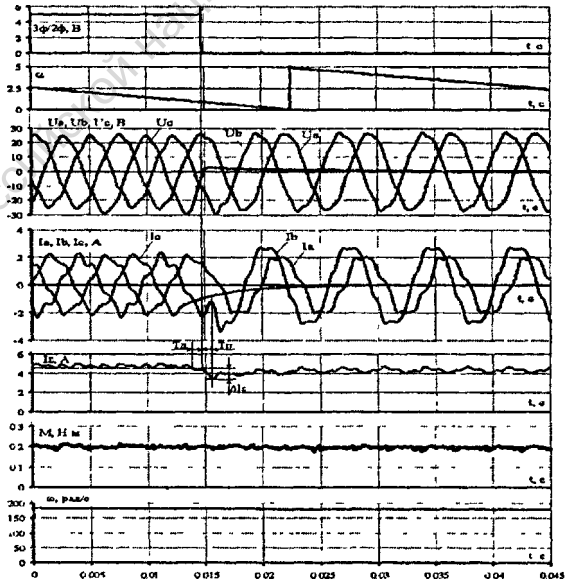


Рис. 13. Временные диаграммы переходного процесса двухфазного режима ВД с алгоритмом восстановления

структуры в течение времени T_n , который заканчивается прекращением падения токопотребления. Длительность времени T_n определяет скорость нарастания тока. Величина провала тока I_{Σ} на диаграмме определяется величиной ΔI_{Σ} , что составило 30% от уровня I_{Σ} в трехфазном режиме за время: $T_a + T_n$.

Процесс переключения можно считать законченным при достижении относительного фазового сдвига токов $\pi/3$ (по минимуму величины ΔI_{Σ}), т.е. ток фазы "В" по условию работы алгоритма восстановления меняет фазовый сдвиг. Фактически процесс заканчивается после достижения каждым током абсолютного фазового сдвига относительно сигнала датчика положения. На диаграмме это соответствует увеличению полупериодов токов и различию знаков углов $-\varphi_a$ и $+\varphi_b$.

Заключение.

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение надежности ВД, можно сделать следующие выводы:

1. В двухфазном режиме работы трехфазного ВД использование углов между обратными векторами ЭДС и векторами напряжений фаз в качестве параметров, определяющих максимум момента, приводит к усложнению системы управления ввиду их различия и зависимости от режима работы.

2. Получено на математической модели и экспериментально установлено, что использование угла ψ_A между обратными векторами Э.Д.С. и вектором тока фазы одной из двух фаз в двухфазном режиме ВД позволяет получить максимум активной мощности, максимум момента для $\psi_A = \pi/6$, при этом активные мощности фаз равны, а максимум активной мощности не зависит от рабочей частоты и величины фазного тока. Суммарная реактивная мощность в двухфазном режиме трехфазного ВД может принимать как положительные, так и отрицательные значения в функциях рабочей частоты, тока. При $\psi_A = \pi/6$ суммарная реактивная мощность минимальна.

4. Ввиду конструктивной несимметрии трехфазной электрической машины в двухфазном режиме электромагнитный момент ВД является пульсирующим и происходит ухудшение гармонического состава суммарного потребляемого тока от источника напряжения.

5. Разработан и экспериментально проверен алгоритм восстановления работоспособности трехфазного ВД в аварийном двухфазном режиме. Разработана и экспериментально проверена методика повышения надежности вентильного электропривода, обеспечивающая работу в аварийном двухфазном режиме трехфазного ВД. Экспериментально определено, что время T_n переключения структуры при возникновении аварийной ситуации не превышает электромагнитную постоянную времени.

7. Разработан ВД, который обеспечивает повышение надежности за счет резервирования силовых цепей и реализации режима рекуперативного торможения при одновременном расширении диапазона регулирования частоты вра-

щения за счет применения метода многозонной импульсной модуляции.

8. Разработан преобразователь m -фазного напряжения для ВД, который позволяет повысить надежность благодаря реализации режима рекуперативного торможения при одновременном расширении диапазона регулирования напряжения в 2 раза за счет применения метода амплитудно-широотно-импульсной модуляции в преобразовательной ячейке мостового типа.

9. Разработан частотно-регулируемый рекуперативный электропривод на основе АД, который позволяет повысить эффективность электропривода за счет упрощения конструкции и реализации режима рекуперативного торможения при улучшенных массогабаритных показателях и увеличенной перегрузочной способности.

10. Разработан трехфазный измерительный частотный преобразователь тока, позволяющий повысить надежность электропривода за счет упрощения цепей диагностики и защиты в рабочих и аварийных режимах работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Зайцев А.П., Букреев В.Г., Соснин С.К., Однокопылов Г.И., Городничев Е.Г. Отчет о научно-исследовательской работе по разработке системы управления многокоординатным электроприводом грузозахватного робота. № гос. рег. 01850049023, Томск, 1985, 64 с.

2. Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Однокопылов Г.И. Структура силового цифро-аналогого преобразователя для электропривода переменного тока // 1-ая Дальневосточная научно-практическая конференция "Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий": Тез. докл. - Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре политехи, ин-т, 1986. - 156 с.

3. А.с. № 1402949 (СССР), МКИ³ G 01 R 19/00. Измерительный частотный преобразователь тока / А.П. Зайцев, Е.Г. Городничев, В.Г. Букреев, Г.И. Однокопылов. - Опубл. в Б.И., 1988, № 22.

4. Зайцев А.П., Однокопылов Г.И., Сим А.Б., Софронов В.Н., Петров А.В., Алексеев А.Н. Отчет о научно-исследовательской работе по разработке элементов цифрового электропривода для адаптивных роботов ГПМ. № гос. рег. 01870036816, Томск, 1989, 38 с.

5. Зайцев А.П., Однокопылов Г.И., Петров А.В. Цифровой вентильный электропривод // Всесоюзное научно-техническое совещание "Проблемы управления промышленными электромеханическими системами" (Ульяновск): Тез. докл. - Л., 1989. - 199 с.

6. Зайцев А.П., Однокопылов Г.И. Средства реализации двухфазного режима трехфазного вентильного электродвигателя // Республиканская научно-техническая конференция "Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы": Тез. докл. - Томск: Изд. Томского политехнического университета 1991. - 199 с.

7. Зайцев А.П., Однокопылов Г.И. Двухфазный режим трехфазного вентильного электродвигателя // Республиканская научно-техническая конферен-

ция "Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы": Тез. докл. - Томск: Изд. Томского политехнического университета 1991.-199 с.

8. А.с. № 1746482 (СССР), МКИ³ Н 02 Р 7/42. Вентильный электропривод / Г.И. Однокопылов, А.П. Зайцев, Г.В. Обрусник, А.В. Петров, В.Н. Софронов.- Оpubл. в Б.И., 1992, №25.

9. А.с. № 1821881 (СССР), МКИ³ Н 02 М 7/12. Преобразователь т-фазного напряжения для вентильного электропривода / Г.И. Однокопылов.- Оpubл. в Б.И., 1993, № 22.

10. Пат. № 2014722 СССР, МКИ³ Н 02 Р 7/42. Частотно-регулируемый электропривод / А.В. Миллер, Г.Я. Михальченко, Г.И. Однокопылов.- Оpubл. в Б.И., 1994, №11.

11. Однокопылов Г.И. Вентильный электропривод для плазменной установки // Второй международный научно-технический семинар "Нетрадиционные технологии в строительстве". Томск: Изд. Томского архитектурно-строительного университета 2001. - 504 с.

12. Однокопылов Г.И. Система управления вентильным электродвигателем для плазменной установки // Второй международный научно-технический семинар "Нетрадиционные технологии в строительстве". Томск: Изд. Томского архитектурно-строительного университета 2001. - 504 с.

13. Однокопылов Г.И. Датчик состояния преобразовательной ячейки // IV Международная научно-техническая конференция «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения», Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ 2004.-70 с.

14. Однокопылов Г.И., Орлов Д.Ю. Измерительный частотный преобразователь тока //IV Международная научно-техническая конференция «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения», Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ 2004.-70с.

15. Однокопылов Г.И. Вентильный электропривод с повышенной живучестью при аварии в одной из фаз.//Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы», Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ 2004.- 37 с.

16. Однокопылов Г.И. Принципы построения трехфазного вентильного электропривода с повышенной живучестью при аварии в одной из фаз//Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальные электромеханические устройства, системы и комплексы», Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ 2004.- 37 с.

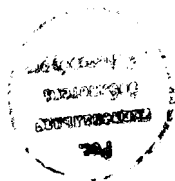
Личный вклад автора. 6 работ написаны автором единолично. В работах написанных в соавторстве, автору принадлежат: схема датчика тока [1,3, 14], построение систем управления ВД повышенной надежности и разработка математической модели двухфазного режима [2,5,6,7,8], разработка преобразователя частоты и датчика тока [4], принцип бестрансформаторного построения частотно-регулируемого электропривода [10].

Из фондов Российской национальной библиотеки

Изд. Лицензия №021253 от 31.10.97. подписано в печать **19.04.05.**
Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Тайме.
Тираж 100 экз. Заказ № **157**

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15

Из фондов Российской национальной библиотеки



131

09 ИЮН 2005