УДК 62-83::621.313.3 ГРНТИ 45.41.31 50.43.00 52.13.29 Инв. №

#### УТВЕРЖДЕНО:

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»

От имени Руководителя организации

\_\_\_\_ / В.А. Ковалев / \_\_\_\_\_ М.П.

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ отчет

о выполнении 5 этапа Государственного контракта № 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 г.

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.

Проект: Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии

Руководитель проекта:

\_\_\_/Семыкина Ирина Юрьевна

(подпись)

Кемерово 2013 г.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ по Государственному контракту 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Руководитель темы:

доцент кафедры «Электропривод _ и автоматизация», кандидат технических наук, до- цент	подпись, дата	Семыкина И. Ю.
Исполнители темы:		
аспирант кафедры «Электропри- вод и автоматизация»	подпись, дата	Гаргаев А.Н.
аспирант кафедры «Электропри- вод и автоматизация»	подпись, дата	Кольцов Р. А.
ассистент кафедры «Электро- привод и автоматизация»	подпись, дата	Киселев А. В.
студент группы ЭА-082	подпись, дата	Евстратов А.Э.
студент группы ЭА-082 _	подпись, дата	Пыпа А.А.
студент группы ЭА-082 _	подпись, дата	Татаринов Д.Е.

# Реферат

Отчет 58 с., 3 ч., 32 рис., 13 табл., 13 источн., 3 прил.

Ключевые слова: горные машины, асинхронный электродвигатель, регулируемый электропривод, энергоэффективность.

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 5 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 "Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии" (шифр "2011-1.2.2-226-011") от 24 мая 2011 по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук в следующих областях:- атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом;- водородная энергетика; - новые и возобновляемые источники энергии; - производства топлив и энергии из органического сырья; - создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии; - создание энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных средств" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы – разработка алгоритмов энергосберегающего управления, позволяющих провести теоретические исследования степени энергоэффективности функционирования электропривода горной машины, управляемого по синтезированным зависимостям.

При выполнении работ по этапу использовались:

1. Методы компьютерного моделирования.

2. Методы планирования и выполнения эксперимента.

Результаты, полученные при выполнении 5 этапа Государственного контракта:

1. Аналитические зависимости оптимальных по энергоэффективности законов управления.

2. Теоретические исследования степени энергоэффективности функционирования электропривода горной машины.

# Содержание

Определения	5
Обозначения и сокращения	6
Введение	7
Разработка алгоритмов энергосберегающего управления	8
1. Синтез аналитических зависимостей оптимальных по энергоэффективн	юсти
законов управления	9
1.1. Вывод формулы	9
1.2. Вывод энергооптимальных величин	14
2. Разработка дополнительных программных средств	17
3. Теоретические исследования степени энергоэффективности функциониров	зания
электропривода горной машины, управляемого по синтезированным зависимо	остям
	18
3.1. Оценка энергооптимальности полученных способов управления	18
3.2. Адаптация на асинхронный двигатель	20
Заключение	24
Список использованных источников	25
4. ПРИЛОЖЕНИЕ А	26
5. ПРИЛОЖЕНИЕ В	37
6. ПРИЛОЖЕНИЕ С	42

# Определения

Коэффициент полезного действия – характеристика эффективности системы электропривода в отношении выполнения электромеханического преобразования энергии.

Энергоэффективность – комплексное понятие, в рамках данной работы подразумевающее эффективное использование электрической энергии, потребляемой электроприводом а процессе своего функционирования.

Энергооптимальность – характеристика, свидетельствующая о достижении экстремума (максимума или минимума) какого-либо энергетического показателя качества функционирования.

*Математическая модель* – представление объекта автоматизации в виде математических формул описывающих процессы происходящие в объекте с максимальным приближением.

# Обозначения и сокращения

Список использованных обозначений:

 $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) - n$ -мерный вектор переменных состояния;

 $\mathbf{u} = \boldsymbol{u}(t) - m$ -мерный вектор входов;

М – электромагнитный момент;

*M*<sub>зад</sub> – заданный электромагнитный момент;

 $\Psi_{l}$  – потокосцепление статора;

 $\Psi_{l_{3ad}}$  – заданное потокосцепление статора;

 $\Psi_2$  – потокосцепление ротора;

 $\Psi_{23a\partial}$  – заданное потокосцепление ротора;

у – угол между потокосцеплением статора и ротора;

*у*<sub>зад</sub> – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора;

⊿Р – величина омических потерь;

Н – диагональная матрица настроечных коэффициентов;

 $Q(\mathbf{x})$  – целевой функционал;

Г – матрица весовых коэффициентов.

Список использованных сокращений:

И – интегральный (регулятор).

ПИ – пропорционально-интегральный (регулятор).

# Введение

Выполнение научно-исследовательских работ по 5 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 «Исследование процесса электромеханического преобразования энергии в динамических режимах» предполагает следующие виды работ:

- 1. Синтез аналитических зависимостей оптимальных по энергоэффективности законов управления
- 2. Разработка дополнительных программных средств.
- 3. Теоретические исследования степени энергоэффективности функционирования электропривода горной машины, управляемого по синтезированным зависимостям

Представленный этап посвящен разработке и последующему исследованию энергооптимального закона управления электродвигателями переменного тока. Проблема данного исследования носит актуальный характер в современных условиях, а рассмотрение вопросов связанных с данной тематикой носит как теоретическую, так и практическую значимость.

Целью данного этапа является синтез и исследования энергоэффективного управления электроприводами переменного тока. В рамках достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- 1. Создание энергооптимального закона управления.
- 2. Моделирование электропривода с использованием полученного закона управления.
- 3. Исследование на компьютерной модели качества регулирование координат электропривода.

# Разработка алгоритмов энергосберегающего управления

Для создания требуемого энергооптимального закона управления было решено использовать метод скоростного градиента, описанного в [1], так как данный метод позволяет реализовать различные цели управления. В качестве объекта управления, в данной работе, используется машина двойного питания, у которой в отличии, к примеру, от асинхронного двигателя, четыре управляющих воздействия, что кроме технологических целей, под которыми подразумевается регулирование электромагнитного момента, позволяет реализовывать дополнительные, способствующие уменьшению энергопотребления. Для наибольшего приближения к реальным условиям работы электроприводов горных машин, при исследованиях полученного энергооптимального закона управления с помощью компьютерного моделирования, в модели реализована широтно-импульсная модуляция.

# 1. Синтез аналитических зависимостей оптимальных по энергоэффективности законов управления

В данном исследовании рассмотрен вывод алгоритма энергооптимального управления. Определены энергооптимальные значения задаваемых амплитуд потокосцеплений статора и ротора и угла между ними, электромагнитного момента, токов статора и ротора и величина электрических потерь, а также проведено сравнительное моделирование и анализ полученных результатов.

#### 1.1. Вывод формулы

Энергооптимальное управление электромагнитным моментом машины двойного питания в работе получено путем синтеза системы управления при помощи алгоритма скоростного градиента [5, 6], разработанного профессором Санкт-Петербургского государственного университета А. Л. Фрадковым. При таком управлении изменение управляющего воздействия происходит пропорционально градиенту скорости изменения цели управления.

Постановка задачи управления начинается с выбора модели управляемой системы (объекта управления) и модели цели управления. Объект управления – модель с сосредоточенными параметрами, описываемая обыкновенными дифференциальными уравнениями в пространстве состояний:

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}),$$

где  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$  — *n*-мерный вектор переменных состояния;  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ —*m*-мерный вектор входов.

В данной работе в качестве объекта управления выступает машина двойного питания:

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ \psi_{1\alpha} \\ \cdot \\ \psi_{1\beta} \\ \cdot \\ \psi_{2\alpha} \\ \cdot \\ \psi_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_1 L_2 \sigma & 0 & R_1 L_m \sigma & 0 \\ 0 & -R_1 L_2 \sigma & 0 & R_1 L_m \sigma \\ R_2 L_m \sigma & 0 & -R_2 L_1 \sigma & -\omega p \\ 0 & -\omega p & R_2 L_m \sigma & -R_2 L_1 \sigma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{1\beta} \\ u_{2\alpha} \\ u_{2\beta} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\Gamma} \mathbf{\mathcal{A}e} \ \sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2} .$$

Целью управления является регулирование, т. е. приведение вектора выходных переменных y(t) к некоторому равновесному состоянию  $y^*$ .

Зададим цель управления в виде предельного соотношения:

$$\lim_{t\to\infty}\mathbf{y}(t)=\mathbf{y}^*.$$

Технологической (основной) целью управления выступает поддержание на заданном уровне электромагнитного момента двигателя. Также заданы дополнительные цели управления, позволяющие добиться энергооптимального режима работы, а именно регулирование потокосцеплений ротора и статора, задание угла между ними и минимизация омических потерь. Модель целей управления запишется следующим образом:

1) 
$$\lim_{t \to \infty} M(t) = M_{_{3a\partial}};$$
  
2) 
$$\lim_{t \to \infty} \Psi_1^2(t) = \Psi_{1_{_{3a\partial}}}^2;$$
  
3) 
$$\lim_{t \to \infty} \Psi_2^2(t) = \Psi_{2_{_{3a\partial}}}^2;$$
  
4) 
$$\lim_{t \to \infty} \cos \gamma(t) = \cos \gamma_{_{3a\partial}};$$
  
5) 
$$\lim_{t \to \infty} \Delta P(t) = 0,$$
  
(1.1.1)

где M – электромагнитный момент,  $M_{3a\partial}$  – заданный электромагнитный момент,  $\Psi_1$  – потокосцепление статора,  $\Psi_{13a\partial}$  – заданное потокосцепление статора,  $\Psi_2$  – потокосцепление ротора,  $\Psi_{23a\partial}$  – заданное потокосцепление ротора,  $\gamma$  – угол между потокосцеплением статора и ротора,  $\gamma_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $\gamma_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $\gamma_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора,  $M_{3a\partial}$  – заданный угол между на минем статора и ротора у – угол между на минем статора и ротора у – угол между на минем статора и ротора у – угол между на минем статора и ротора у – угол между на минем статора и ротора у – угол между на минем статора и ротора у – угол между на минем статора у – угол между и минем статора у – угол

Целевой функционал определяется по формуле:

$$Q(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\mathbf{y} - \mathbf{y}^*]^T \mathbf{H} [\mathbf{y} - \mathbf{y}^*],$$

где Н – диагональная матрица настроечных коэффициентов.

Для достижения целей управления желательно изменять  $\mathbf{u}(t)$  в направлении уменьшения  $Q(\mathbf{x})$ . Однако  $Q(\mathbf{x})$  не зависит от  $\mathbf{u}(t)$ , найти такое направление затруднительно. Вместо этого можно пытаться уменьшить  $\dot{\mathbf{Q}}$ , стремясь к выполнению неравенства  $\dot{\mathbf{Q}} < 0$ , означающего, в свою очередь уменьшение  $Q(\mathbf{x})$ . Функция  $\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{w}(\mathbf{x},\mathbf{u})$  определяется как:

$$\boldsymbol{\varpi}(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \left[\nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{Q}(\mathbf{x})\right]^{\mathrm{T}} \mathbf{F}(\mathbf{x},\mathbf{u}),$$

и уже явно зависит от u, что позволяет записать изменения  $\mathbf{u}(t)$  дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\mathbf{u}}{d\mathbf{t}} = -\Gamma \nabla_{\mathbf{u}} \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \tag{1.1.2}$$

где Г – матрица весовых коэффициентов.

Для дальнейшей работы с целями управления, их следует выразить через переменные состояния. Электромагнитный момент и потокосцепление статора и ротора имеют вид:

$$M = p\sigma L_m \left( \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} \right);$$
  
$$\Psi_1^2 = \Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2;$$
  
$$\Psi_2^2 = \Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2,$$

Первые три цели запишутся следующим образом:

1) 
$$p\sigma L_m (\Psi_{1\beta}\Psi_{2\alpha} - \Psi_{2\beta}\Psi_{1\alpha}) - M_{3a\partial} = 0;$$
  
2)  $\Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2 - \Psi_{13a\partial}^2 = 0;$   
3)  $\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2 - \Psi_{23a\partial}^2 = 0.$ 

Для выражения четвертой цели управления перейдем от системы координат  $\alpha,\beta$  к системе координат u,v неподвижной относительно  $\Psi_I$ , показанной на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Потокосцепления статора и ротора в системе координат и, у

С учетом координатных преобразований, проекции потокосцепления ротора в системе координат *u*,*v* равны:

$$\Psi_{2u} = \Psi_{2\alpha} \cos \varphi_{\kappa} + \Psi_{2\beta} \sin \varphi_{\kappa},$$
  
$$\Psi_{2v} = -\Psi_{2\alpha} \sin \varphi_{\kappa} + \Psi_{2\beta} \cos \varphi_{\kappa}$$

Угол между системами координат α,β и *u*,*v* равен:

$$\varphi_{\kappa} = \operatorname{arctg} \frac{\Psi_{1\beta}}{\Psi_{1\alpha}}.$$

Выразим косинус и синус этого угла, через проекции потокосцепления статора в системе координат  $\alpha,\beta$ :

$$\cos\varphi_{\kappa} = \frac{\Psi_{1\alpha}}{\sqrt{\Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2}}; \quad \sin\varphi_{\kappa} = \frac{\Psi_{1\beta}}{\sqrt{\Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2}}$$

Тогда проекции потокосцепления ротора на оси *и*, *v* имеют вид:

$$\Psi_{2u} = \Psi_{2\alpha} \frac{\Psi_{1\alpha}}{\sqrt{\Psi_{1\alpha}^{2} + \Psi_{1\beta}^{2}}} + \Psi_{2\beta} \frac{\Psi_{1\beta}}{\sqrt{\Psi_{1\alpha}^{2} + \Psi_{1\beta}^{2}}};$$
  
$$\Psi_{2v} = -\Psi_{2\alpha} \frac{\Psi_{1\beta}}{\sqrt{\Psi_{1\alpha}^{2} + \Psi_{1\beta}^{2}}} + \Psi_{2\beta} \frac{\Psi_{1\alpha}}{\sqrt{\Psi_{1\alpha}^{2} + \Psi_{1\beta}^{2}}};$$

С учетом этих проекций косинус угла между потокосцеплениями статора и ротора по формуле:

$$\cos\gamma = \frac{\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta}}{|\Psi_1||\Psi_2|}.$$
(1.1.3)

Уравнение (1.1.3) послужило основой для четвертой цели управления, которая имеет вид:

4) 
$$\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \cos\gamma_{3a\partial} \cdot \Psi_{13a\partial} = 0.$$

Для вывода пятой цели управления (минимизация омических потерь) воспользуемся уравнением, описывающим эти потерь:

$$\Delta P = I_{1}^{2}R_{1} + I_{2}^{2}R_{2} = \left(I_{1\alpha}^{2} + I_{1\beta}^{2}\right)R_{1} + \left(I_{2\alpha}^{2} + I_{2\beta}^{2}\right)R_{2}.$$

Выразим данное уравнение через переменные состояния:

$$\Delta P = \left( \left( \Psi_{1\alpha} L_2 \sigma - \Psi_{2\alpha} L_m \sigma \right)^2 + \left( \Psi_{1\beta} L_2 \sigma - \Psi_{2\beta} L_m \sigma \right)^2 \right) R_1 + \left( \left( \Psi_{2\alpha} L_1 \sigma - \Psi_{1\alpha} L_m \sigma \right)^2 + \left( \Psi_{2\beta} L_2 \sigma - \Psi_{1\beta} L_m \sigma \right)^2 \right) R_2.$$

Таким образом, модель целей управления для синтеза алгоритма скоростного градиента запишется следующим образом:

1) 
$$p\sigma L_{m} \left( \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} \right) - M_{3a\partial} = 0;$$
  
2)  $\Psi_{1\alpha}^{2} + \Psi_{1\beta}^{2} - \Psi_{13a\partial}^{2} = 0;$   
3)  $\Psi_{2\alpha}^{2} + \Psi_{2\beta}^{2} - \Psi_{23a\partial}^{2} = 0;$   
4)  $\Psi_{2\alpha} \Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta} \Psi_{1\beta} - \cos \gamma_{3a\partial} \cdot \Psi_{13a\partial} = 0;$   
5)  $\left( \left( \Psi_{1\alpha} L_{2} \sigma - \Psi_{2\alpha} L_{m} \sigma \right)^{2} + \left( \Psi_{1\beta} L_{2} \sigma - \Psi_{2\beta} L_{m} \sigma \right)^{2} \right) R_{1} + \left( \left( \Psi_{2\alpha} L_{1} \sigma - \Psi_{1\alpha} L_{m} \sigma \right)^{2} + \left( \Psi_{2\beta} L_{2} \sigma - \Psi_{1\beta} L_{m} \sigma \right)^{2} \right) R_{2} = 0.$ 

Тогда целевая функция имеет вид:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} h_{1} (M - M_{_{3a\partial}})^{2} + h_{2} (\Psi_{1}^{2} - \Psi_{_{13a\partial}}^{2})^{2} + h_{3} (\Psi_{2}^{2} - \Psi_{_{23a\partial}}^{2})^{2} + \\ + h_{4} (\cos \gamma - \cos \gamma_{_{3a\partial}})^{2} + h_{5} (\Delta P)^{2} \end{pmatrix} = \\ = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} h_{1} (p\sigma L_{m} (\Psi_{1\beta}\Psi_{2\alpha} - \Psi_{2\beta}\Psi_{1\alpha}) - M_{_{3a\partial}})^{2} + \\ + h_{2} (\Psi_{1\alpha}^{2} + \Psi_{1\beta}^{2} - \Psi_{_{13a\partial}}^{2})^{2} + h_{3} (\Psi_{2\alpha}^{2} + \Psi_{2\beta}^{2} - \Psi_{_{23a\partial}}^{2})^{2} + \\ + h_{4} (\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \cos \gamma_{_{3a\partial}}\Psi_{_{13a\partial}})^{2} + \\ + h_{5} \begin{pmatrix} ((\Psi_{1\alpha}L_{2}\sigma - \Psi_{2\alpha}L_{m}\sigma)^{2} + (\Psi_{1\beta}L_{2}\sigma - \Psi_{2\beta}L_{m}\sigma)^{2})R_{1} + \\ + ((\Psi_{2\alpha}L_{1}\sigma - \Psi_{1\alpha}L_{m}\sigma)^{2} + (\Psi_{2\beta}L_{2}\sigma - \Psi_{1\beta}L_{m}\sigma)^{2})R_{2} \end{pmatrix}^{2} \end{pmatrix}$$

а скорость ее изменения будет зависеть от частных производных по переменным состояниям:

$$\frac{\partial Q}{\partial \Psi_{1\alpha}} = h_1 p \sigma L_m \left(-\Psi_{2\beta}\right) \left(M - M_{3a\partial}\right) + 2h_2 \Psi_{1\alpha} \left(\Psi_1^2 - \Psi_{13a\partial}^2\right) + h_4 \Psi_{2\alpha} \left(\Psi_{2\alpha} \Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta} \Psi_{1\beta} - \cos \gamma_{3a\partial} \cdot \Psi_{13a\partial}\right) + 2h_5 \sigma \cdot \Delta P \left(i_{1\alpha} L_2 R_1 - i_{2\alpha} L_m R_2\right);$$

Скорость изменения целевого функционала равна:

$$\boldsymbol{\varpi}(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \frac{\partial Q}{\partial \Psi_{1\alpha}} \left( -\Psi_{1\alpha}R_{1}L_{2}\sigma + \Psi_{2\alpha}R_{1}L_{m}\sigma + u_{1\alpha} \right) + \frac{\partial Q}{\partial \Psi_{1\beta}} \left( -\Psi_{1\beta}R_{1}L_{2}\sigma + \Psi_{2\beta}R_{1}L_{m}\sigma + u_{1\beta} \right) + \frac{\partial Q}{\partial \Psi_{2\alpha}} \left( -\Psi_{2\alpha}R_{2}L_{1}\sigma + \Psi_{1\alpha}R_{2}L_{m}\sigma - \omega p\Psi_{2\beta} + u_{2\alpha} \right) + \frac{\partial Q}{\partial \Psi_{2\beta}} \left( -\Psi_{2\beta}R_{2}L_{1}\sigma + \Psi_{1\beta}R_{2}L_{m}\sigma - \omega p\Psi_{1\beta} + u_{2\beta} \right).$$

Наконец, задаем алгоритм изменения **u**(t) используя уравнение (1.1.2):

$$\frac{du_{1\alpha}}{dt} = -\delta_{1} \begin{pmatrix} h_{1}p\sigma L_{m} \left(-\Psi_{2\beta}\right) \left(M - M_{3a\partial}\right) + 2h_{2}\Psi_{1\alpha} \left(\Psi_{1}^{2} - \Psi_{13a\partial}^{2}\right) + \\ +h_{4}\Psi_{2\alpha} \left(\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \cos\gamma_{3a\partial}\cdot\Psi_{13a\partial}\right) + \\ +2h_{5}\sigma\cdot\Delta P\left(i_{1\alpha}L_{2}R_{1} - i_{2\alpha}L_{m}R_{2}\right) \end{pmatrix};$$

$$\frac{du_{1\beta}}{dt} = -\delta_{2} \begin{pmatrix} h_{1}p\sigma L_{m}\Psi_{2\alpha} \left(M - M_{3a\partial}\right) + 2h_{2}\Psi_{1\beta} \left(\Psi_{1}^{2} - \Psi_{13a\partial}^{2}\right) + \\ +h_{4}\Psi_{2\beta} \left(\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha} + \Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta} - \cos\gamma_{3a\partial}\cdot\Psi_{13a\partial}\right) + \\ +2h_{5}\sigma\cdot\Delta P\left(i_{1\beta}L_{2}R_{1} - i_{2\beta}L_{m}R_{2}\right) \end{pmatrix};$$

$$\frac{du_{2\alpha}}{dt} = -\delta_{3} \begin{pmatrix} h_{1}p\sigma L_{m}\Psi_{1\beta}(M-M_{3a\delta}) + 2h_{3}\Psi_{2\alpha}(\Psi_{2}^{2}-\Psi_{2}^{2}) + \\ +h_{4}\Psi_{1\alpha}(\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha}+\Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta}-\cos\gamma_{3a\delta}\cdot\Psi_{13a\delta}) + \\ +2h_{5}\sigma\cdot\Delta P(i_{2\alpha}L_{1}R_{2}-i_{1\alpha}L_{m}R_{1}) \end{pmatrix}; \quad (1.1.4)$$

$$\frac{du_{2\beta}}{dt} = -\delta_{4} \begin{pmatrix} h_{1}p\sigma L_{m}(-\Psi_{1\alpha})(M-M_{3a\delta}) + 2h_{3}\Psi_{2\beta}(\Psi_{2}^{2}-\Psi_{2}^{2}) + \\ +h_{4}\Psi_{1\beta}(\Psi_{2\alpha}\Psi_{1\alpha}+\Psi_{2\beta}\Psi_{1\beta}-\cos\gamma_{3a\delta}\cdot\Psi_{13a\delta}) + \\ +2h_{5}\sigma\cdot\Delta P(i_{2\beta}L_{1}R_{2}-i_{1\beta}L_{m}R_{1}) \end{pmatrix}.$$

Таким образом, получен закон энергооптимального управления. Разработанный закон позволяет полностью реализовать цели управления. Но чтобы управление было наиболее результативным, в машине двойного пита достаточно реализовать три цели управления: обязательно технологическую и еще две на выбор.

Управляющие воздействия, соответствующие формуле (1.1.4), могут быть получены в простейшем случае с использованием интегрального регулятора. Однако возможны реализации алгоритмов градиентного управления не строго соответствующие формуле (1.1.4), а приближающиеся к ней, тем не менее, так же позволяющие достигнуть цели управления. Примером таких реализаций могут быть пропорционально-интегральный или знаковый регуляторы.

#### 1.2. Вывод энергооптимальных величин

Полученный закон управления предусматривает задание энергооптимальных величин электромагнитного момента, потокосцеплений ротора и статора, и угла между ними. Для их нахождения была проанализирована система уравнений в установившемся режиме работы:

$$\begin{cases} M = p \Big( \Psi_{1\alpha} i_{1\beta} + \Psi_{1\beta} i_{1\alpha} \Big); \\ \Psi_{1\alpha} = L_{1} i_{1\alpha} + L_{m} i_{2\alpha}; \\ \Psi_{1\beta} = L_{1} i_{1\beta} + L_{m} i_{2\beta}; \\ \Delta P = \Big( i_{1\alpha}^{2} + i_{1\beta}^{2} \Big) R_{1} + \Big( i_{2\alpha}^{2} + i_{2\beta}^{2} \Big) R_{2}. \end{cases}$$
(1.2.1)

В ходе рассмотрения считаем, что величина электрических потерь стремится к нулю, электромагнитный момент M и потокосцепление статора  $\Psi_l$  имеют постоянное значение, равные заданному. Направим произвольную систему координат u, v вдоль вектора  $\Psi_l$ , как это показано на рис.1.1. Тогда система уравнений (1.2.1) будет иметь вид:

$$\begin{cases} M = p \Psi_{1u} i_{1v}; \\ \Psi_{1u} = L_1 i_{1u} + L_m i_{2u}; \\ 0 = L_1 i_{1v} + L_m i_{2v}; \\ \Delta P = \left(i_{1u}^2 + i_{1v}^2\right) R_1 + \left(i_{2u}^2 + i_{2v}^2\right) R_2 \end{cases}$$

Из первых трех уравнений выразим проекции токов и подставим в уравнение электрических потерь:

$$\begin{cases} i_{1v} = M / p\Psi_{1}; \\ i_{2u} = (\Psi_{1} - L_{1}i_{1u}) / L_{m}; \\ i_{2v} = -i_{1v}L_{1} / L_{m}; \\ \Delta P = \left(i_{1u}^{2} + \left(\frac{M}{p\Psi_{1}}\right)^{2}\right)R_{1} + \left(\left(\frac{\Psi_{1} - L_{1}i_{1u}}{L_{m}}\right)^{2} + \left(-\frac{L_{1}}{L_{m}}\frac{M}{p\Psi_{1}}\right)^{2}\right)R_{2} \end{cases}$$

Последнее уравнение рассмотрим подробнее, откроем скобки и приведем подобные:

$$\Delta P = i_{1u}^2 \left( R_1 + R_2 \frac{L_1^2}{L_m^2} \right) - i_{1u} \Psi_1 \frac{2R_2 L_1}{L_m^2} + \left( \frac{M}{p \Psi_1} \right)^2 \left( R_1 + R_2 \frac{L_1^2}{L_m^2} \right) + \Psi_1 \frac{2R_2}{L_m^2}.$$

Получено квадратное уравнение, зависящее только от  $i_{1u}$ , которое описывает однозначно положительную зависимость ( $\Delta P > 0$ ), не имеет вещественных корней и имеет экстремум в точке с координатами:

$$\dot{u}_{1u} = \Psi_1 \frac{R_2 L_1}{L_m^2 R_1 + L_1^2 R_2}$$

Таким образом, получены две составляющие тока статора:

$$\begin{cases} i_{1u} = \Psi_1 \frac{R_2 L_1}{L_m^2 R_1 + L_1^2 R_2}; \\ i_{1v} = \frac{M}{p \Psi_1}. \end{cases}$$

Зная эти переменные, имеем полное представление о состоянии двигателя и можем определить проекции потокосцепления ротора по формуле:

$$\begin{cases} \Psi_{2u} = \Psi_1 \left( \frac{L_2}{L_m} - \frac{2R_2L_1}{L_m\sigma\left(L_m^2R_1 + L_1^2R_2\right)} \right); \\ \Psi_{2v} = \frac{M}{p\Psi_1L_m\sigma}. \end{cases}$$

На основе полученной информации расчетным образом определены значения составляющих векторов потокосцеплений статора и ротора и угла между ними, электромагнитного момента, токов статора и ротора, при которых величина электрических потерь минимальна для данного режима работы.

Для примера получена таблица оптимальных заданных величин для машины двойного питания, параметры которой соответствуют асинхронному двигателю марки 4A80A4Y3, при условии, что электромагнитный момент равен номинальному значению 7 Нм. Результаты расчета для различных требуемых заданий потокосцепления статора представлены в табл. 1.2.1.

В Приложении А на рис. А.1 – рис. А.5 показаны графики зависимостей полученных величин от потокосцепления статора. Все зависимости, кроме угла между потокосцеплениями, имеют экстремум. Это свидетельствует о том, что для достижения наиболее энергоотпимальных показателей следует задавать величины близкие к экстремуму.

Таблица 1.2.1

W. R6	W. R6	V FRAT	LA	L.A	AP BT				
<b>1</b> 1, <b>D</b> 0	1 2,DU	у, град	1],A	12,A					
0,1	0,8278	82,9713	35,00	36,27	15766,4390				
0,2	0,4580	63,7488	17,50	18,14	3943,0546				
0,3	0,4091	42,0251	11,67	12,11	1755,2513				
0,4	0,4542	26,8815	8,77	9,11	991,5429				
0,5	0,5324	17,9747	7,04	7,33	640,2742				
0,6	0,6230	12,6967	5,90	6,18	451,8161				
0,7	0,7187	9,3987	5,10	5,39	340,6350				
0,8	0,8168	7,2226	4,53	4,84	271,0027				
0,9	0,9162	5,7181	4,11	4,46	225,8505				
1	1,0162	4,6370	3,79	4,20	196,1888				
1,1	1,1167	3,8349	3,57	4,04	176,9171				
1,2	1,2174	3,2238	3,40	3,95	164,9671				
1,3	1,3183	2,7477	3,30	3,92	158,4030				
1,4	1,4193	2,3696	3,23	3,94	155,9544				
1,5	1,5203	2,0645	3,20	3,99	156,7598				
1,6	1,6215	1,8147	3,21	4,08	160,2184				

Расчетные величины переменных, обеспечивающих минимизацию омических потерь при постоянстве  $\Psi_1^*$ 

Использование рассчитанных величин в качестве заданных для систем управления электроприводами горных машин обеспечит наиболее эффективное решение для построения энергооптимальной системы управления электроприводом для горных машин, поскольку относится к беспоисковым методам оптимизации по потерям, в частности аналитическм регуляторам, реализующим критерии оптимальности.

# 2. Разработка дополнительных программных средств

Экспериментальное исследование энергооптимального закона управления, полученного в подразделе 1.1, выполнено с использованием компьютерной модели, в которой в качестве объекта управления выступает машина двойного питания, построенная на базе математической модели, полученной в предыдущих исследованиях, у которой напряжение питания формируется с помощью широтноимпульсной модуляции. Компьютерная модель реализована в среде программирования *Delphi*. Стартовое окно программы представлено на рис. 2.1, листинг программы приведен в приложении С.

7	Concession and the		-			
ПУСК Сохр.	нить Загрузить	График Параметры				
Umax 311,126984 Lss 0,01 Lrs 0,013 Lm 0,275 Bs 75		Управление интегральный регул Задаем d1 интергально-пропор Задаем d1, d2 У знаковый регулятор	іятор 1 циональный регулятор 0,001	-Каэффици h1 h2 h3 h4	100000 0 0 1000	
Rr 5 Mc 7		Задаем d3 Потери	513	h5 Точность Поме	0,01	
3 0,01 Р 2 t пуска 2		Потери 0 Индуктивность Пасыщение		<ul> <li>Потон</li> <li>Потон</li> </ul>	< ротора < статора	13 346655274932
Yrz 1,016 Mz 7 Ysz 1		Задание потока ротора О Синусоидальный	💮 Нарастающий	Статичес Статичес Ошибка ШИМ	жая ошибка 1 кая ошибка 2 перегулирования	0 -29,6476285943022
Угол 4,636978 Tm 0,0002		Задание потока статор © Синусоидальный	а 🔘 Ограниченный	🔽 ШИМ		

Рис. 2.1. Внешний вид программы

Данный программный продукт позволяет исследовать энергооптимальное управление как с точки зрения количественной оценки потерь в каждом режиме работы, так и с точки зрения оценки его влияния на точность регулирования, а также его чувствительности к настроечном параметрам, в частности весовым коэффициентам.

# 3. Теоретические исследования степени энергоэффективности функционирования электропривода горной машины, управляемого по синтезированным зависимостям

#### 3.1. Оценка энергооптимальности полученных способов управления

Для оценки энергооптимальности полученных способов управления экспериментально определим потери мощности. В экспериментах применялись регуляторы следующих типов: интегральный, пропорционально-интегральный и знаковый. Указанные регуляторы исследовались при всех возможных комбинациях заданий целей управления, в частности: 1-2-3; 1-2-4; 1-2-5; 1-3-4; 1-3-5; 1-4-5, согласно формулы (1.1.1). Исходя из условия, что исходные значения напряжения за один шаг расчета не превышало максимального значения, был определен допустимый диапазон коэффициентов, представленный в табл. 3.1.1.

Таблица 3.1.1.

	целей управления									
Комбинации	$h_1$	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	h <sub>5</sub>					
1-2-3	100000	1000000	1000000	-	-					
1-2-4	100000	100000	-	10000	-					
1-2-5	100000	100000	-	-	0,01					
1-3-4	100000	-	100000	10000	-					
1-3-5	100000	-	100000	-	0,01					
1-4-5	100000	-	-	1000	0,01					

Значение настроечных коэффициентов при различных комбинациях

Результатами моделирования являются интегральные оценки потерь, рассчитанные в течение 2,5 секунд работы электропривода, представленные в табл.3.1.2.

Таблица 3.1.2.

Величина электрических потерь за 2,5 секунды										
Тип		Величина электрических потерь, Вт								
регулятора	1-2-3 1-2-4 1-2-5 1-3-4 1-3-5									
И-регул	510	554	1280	570	1390	1091				
ПИ-рег	496	545	784	556	840	896				
Знак-рег	490	490 577 785 547 655 733								

Banunun anarthunacrus notani an 25 carving

Таким образом, используя данные табл. 3.1.2 наиболее энергооптимальной комбинацией целей управления исследуемого закона управления является 1-2-3 при реализации всех типов регуляторов, а использование пятой цели является наименее эффективным.

Для оценки качества регулирования, проанализирована точность регулирования электромагнитного момента, потокосцеплений ротора и статора. А именно, при номинальном значении  $\Psi_l = l B \delta$  в качестве заданных значений, определены статические и динамические ошибки регулирования момента, потокосцеплений статора и ротора. Сравнительные показатели качества регулирования представлены в табл. 3.1.3 – табл. 3.1.8.

#### Точность регулирования электромагнитного момента

Все способы регулирования момента продемонстрировали себя как достаточно точные, а статическая ошибка регулирования в среднем менее одного процента. Исключением являются результаты при использовании пропорциональноинтегрального регулятора, где статическая ошибка составляет около двух процентов. В динамике наибольшее отклонение наблюдается в начале пуска в первые 0,04 секунды. При этом максимальное отклонение от заданного значения наблюдается при использовании интегрального регулятора, особенно задавая первую, вторую и третью цели управления. Наилучшие результаты показывает использование знакового регулятора.

Таблица 3.1.3

Тип		Статическая ошибка, %								
регулятора	1-2-3	-2-3 1-2-4 1-2-5 1-3-4 1-3-5 1-								
И	0,28	0,51	0,61	0,76	0,8	0,98				
ПИ	2,26	0,92	1,69	1,22	0,8	1,98				
Знаковый	0,53	0,63	0,49	0,52	0,52	0,53				

Величина статической ошибки регулирования момента

Таблица 3.1.4

Величина динамической ошибки регулирования момента

Тип		Динамическая ошибка, %					
регулятора	1-2-3	1-2-4	1-2-5	1-3-4	1-3-5	1-4-5	
И	248	90	88	86	85	67	
ПИ	60	32	31	27	26	20	
Знаковый	27	13	13	13,3	12	11,8	

## Точность регулирования потока статора

Максимально точное формирование потокосцепления статора наблюдается в том случае, если в комбинации целей управления присутствует вторая цель, а именно формирование амплитуды потокосцепления статора. В динамике лучшие результаты, показывает использование второй цели управления в комплексе со знаковым регулятором.

Таблица 3.1.5

Тип		Статическая ошибка, %								
регулятора	1-2-3	2-3 1-2-4 1-2-5 1-3-4 1-3-5 1-4-5								
И	0,0035	0,016	0,035	1,38	14,2	4,3				
ПИ	0,018	0,098	0,52	2,7	15	6,1				
Знаковый	0,144	0,39	0,7	1,13	4,5	13,3				

Величина статической ошибки формирования потока статора

Таблица 3.1.6

Тип		Динамическая ошибка, %								
регулятора	1-2-3	-2-3 1-2-4 1-2-5 1-3-4 1-3-5								
И	30	25	22,7	15,5	17,4	27,5				
ПИ	17	20,7	19	9	21	75				
Знаковый	7	1,9	2,26	5,7	12,5	29,7				

Величина	линамической	ошибки	ർറ	пми	пования	потока	стато	na
БСличина	динамической	ошноки	ψυ		рования	потока	ciaio	pa

#### Точность регулирования потока ротора

Максимально точное формирование потока ротора, как и следовало ожидать, наблюдается в том случае, если в комбинации целей управления присутствует третья цель, а именно формирование потока ротора. В динамике лучшие результаты, снова показывает использование знакового регулятора.

Таблица 3.1.7

Величина статической ошибки формирования потока ротора

Тип		Статическая ошибка, %						
регулятора	1-2-3	1-2-4	1-2-5	1-3-4	1-3-5	1-4-5		
И	0,0036	1,23	6,3	0,044	0,008	7,2		
ПИ	0,0037	1,39	4,8	0,1	0,042	5,2		
Знаковый	0,018	3	4	0,12	0,16	12		

Таблица 3.1.8

Величина динамической ошибки формирования потока ротора

Тип	Динамическая ошибка, %					
регулятора	1-2-3	1-2-4	1-2-5	1-3-4	1-3-5	1-4-5
И	37	8	10,4	28	26	27
ПИ	11	13,3	13,5	20	18,8	77
Знаковый	0,86	10	15,4	1,97	1,45	29,9

Более подробно результаты моделирования представлены на рис. А.6 – рис. А.23, расположенных в Приложении А.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным способом реализации полученного закона регулирования является использование знакового регулятора с заданием трех первых целей управления.

## 3.2. Адаптация на асинхронный двигатель

В данном разделе рассмотрена адаптация энергооптимального закона регулирования для асинхронного двигателя. Приведены исследования показателей качества регулирования данного закона и сравнение с уже существующими законами управления. По результатам моделирования сделаны выводы.

#### Адаптация на асинхронный двигатель

Проведем исследование разработанного энергооптимального закона для управления асинхронным электроприводом. Для этого дополним компьютерную модель уравнением, описывающим асинхронный двигатель.

Математическое описание процессов электромеханического преобразования энергии наиболее удобно получить в произвольных осях *u*, *v*, при этом, как было показано в разделе 2, синусоидально изменяющиеся реальные переменные машины преобразуются в постоянные величины, характеризующие проекции изображающего вектора на координатные оси *u*, *v*. Наиболее компактной записью уравнений механической характеристики является комплексная форма. В осях *u*, *v*, при  $\omega_{\kappa}=0$  эти уравнения можно получить с помощью формулы (2.1.4), положив **u**<sub>2</sub> = 0:

$$\frac{d}{dt}\psi_{1\alpha} = u_{1\alpha} - i_{1\alpha}R_{1};$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{1\beta} = u_{1\beta} - i_{1\beta}R_{1};$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{2\alpha} = e_{2\alpha} - i_{2\alpha}R_{2};$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{2\beta} = e_{2\beta} - i_{2\beta}R_{2};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - M_{c}}{J}.$$

Так как на обмотку ротора асинхронного двигателя напряжение питания не подается, третья цель управления автоматически исключается из полученного закона.

Для оценки энергооптимальности управления асинхронным двигателем произведем аналогичные исследования, что и с машиной двойного питания, а именно, экспериментально определим потери мощности и показатели качества регулирования электромагнитного момента. В экспериментах применялись те же регуляторы, при всех возможных комбинациях заданий целей управления, в частности, 1-2-4; 1-2-5 ; 1-2-4-5; 1-3-4; 1-3-5; 1-4-5, в соответствии с формулой (1.1.1). Результатами моделирования являются интегральные оценки потерь в течении 2,5 секунд, представленные в табл. 4.1.1, и оценки точности регулирования, представленные в табл. 3.2.1 – табл. 3.2.3.

Таблица 3.2.1

Тип	Величина электрических потерь, Вт				
регулятора	1-2-4 1-2-5		1-2-4-5		
И-регул	722	722	718		
ПИ-рег	715	715	713		
Знак-рег	701	701	700		

Величина электрических потерь за 2,5 секунды

# Таблица 3.2.2

Тип	Статическая ошибка, %				
регулятора	1-2-4 1-2-5		1-2-4-5		
И-регул	0,3	0,26	0,3		
ПИ-рег	0,05	0,003	0,02		
Знак-рег	0,7	0,68	0,66		

Величина статической ошибки

# Таблица 3.2.3

Тип	Динамическая ошибка, %				
регулятора	1-2-4 1-2-5		1-2-4-5		
И-регул	40	43	31		
ПИ-рег	17	13	10		
Знак-рег	3,5	5	2		

Таким образом, все способы реализации полученного закона управления являются одинаково энергооптимальными и достаточно точными для регулирования координат асинхронного электропривода..

Подробнее полученные результаты моделирования показаны на рис. В.1 – рис. В.9, расположенные в Приложении В.

Достоинством полученного закона управления является то, что возможно изменение настроечных коэффициентов в зависимости от приоритетов целей управления. К примеру, если допустимо снижение требований к точности регулирования электромагнитного момента, следует уменьшить коэффициент первой цели управления. При этом, уменьшение коэффициента второй цели управления, реализует уменьшение пусковых токов, что дополнительно позволит уменьшить энергопотребление. Результат изменения настроек показан на рис. 3.1.

# Сравнение энергооптимального закона с существующими способами управления

Для проведения более полного анализа энергооптимального управления, выполним его сравнение со скалярным частотным, полеориентированным и градиентным способами управления. Для этого проанализируем обеспечиваемое им качество управления аналогично предыдущей главе. Результаты моделирования представлены в табл. 3.2.4.



Рис. 3.1. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора, комбинацией целей управления 1-2-4-5 и изменением настроечных коэффициентов

Таблица 3.2.4

Тип управления	$\Delta P$ , BT	$\delta_{cmam}, \%$	$\delta_{\partial u h}, \%$	$T_{nn}$ , c
U/f=const	1215	6,5	128	0,3
Полеориентированное	653	1,08	5,1	0,3
Градиентное	727	0,15	38	0,03
Энергооптимальное	678	0,47	4,9	0,22

Величина электрических потерь за 2,5 секунды

Анализ полученных результатов показывает, что сформированный в данной работе закон управления незначительно уступает в энергооптимальности полеориентированному управлению, при этом он имеет отличную точность регулирования электромагнитного момента и его наименьшее отклонение от заданного значения. К тому же полученный закон имеет минимальное время переходного процесса.

Подводя итоги, отметим, что за счет изменения настроечных коэффициентов полученный закон управления может реализовать как свойства градиентного, так и полеориентированного управления, при этом имея высокую энергооптимальность.

#### Заключение

Научно-технический отчет представляет собой описание разработки алгоритмов энергосберегающего управления. Сравнение полученного закона управления с уже имеющимися способами управления электродвигателями переменного тока показывает, что полученный закон управления незначительно уступает в энергооптимальности полеориентированному управлению и эти показатели могут быть улучшены после проведения дополнительного исследования, обосновывающего значения настроечных коэффициентов, при этом он имеет высокую точность регулирования электромагнитного момента и его наименьшее отклонение от заданного значения. В качестве дополнительных характеристик следует отметить, что полученный закон управления имеет минимальное время переходного процесса.

#### Список использованных источников

- 1. Кочубиевский И.Д. Системы нагружения для исследования испытаний машин и механизмов М.: Машиностроение, 985. 224 с.
- 2. Хватов С.В. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства / С.В. Хватов, В.Г. Титов, А.А. Поскробко, В.Ф. Цыпкайкин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
- 3. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. К.: "МК-Пресс", 2006. 400 с.
- 4. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Меда. Руководство пользователя. – М.: "Додэка –ХХІ", 2007. – 592 с.
- 5. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR микроконтроллеров. К.: "МК-Пресс", 2006. 208 с.
- 6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
- 7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин М.: Высш. шк., 2001. 327 с.
- 8. Ещин Е.К. Моделирование систем управления электромеханическими объектами – Кемерово: КузГТУ, 2001. - 146 с.
- 9. Дьяконов В.П. Matlab 6 СПб.: Питер, 2001. 592 с.
- 10. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247с.
- 11. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980. 384 с.
- Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
- Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.



Рис. А.1. Зависимость потокосцепления ротора от величины потокосцепления статора



Рис. А.2. Зависимость величины электрических потерь от потокосцепления статора



Рис. А.З. Зависимость угла между потокосцеплениями статора и ротора от величины потокосцепления статора  $\Psi_{l}, B\delta$ 



Рис. А.4. Зависимость тока статора от величины потокосцепления статора



Рис. А.5. Зависимость тока ротора от величины потокосцепления статора



Рис. А.6. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-3



Рис. А.7. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-3



Рис. А.8. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей



Рис. А.9. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-4



Рис. А.10. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управ-



Рис. А.11. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей управления 1-2-4



Рис. А.12. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управ-



Рис. А.13. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-5



Рис. А.14. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей



ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управления 1-3-4



Рис. А.16. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-5



Рис. А.17. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей управления 1-2-5



Рис. А.18. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управ-



Рис. А.19. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-3-5



Рис. А.20. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей



Рис. А.21. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управления 1-4-5



Рис. А.22. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управ-*М*, Н·м *Ψ*, Вб ления 1-4-5 1)-4)-5)



ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей управления 1-4-5

# 5. ПРИЛОЖЕНИЕ В



Рис. В1. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-4



Рис. В2. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-4



управления 1-2-4



Рис. В4. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием ПИ-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-5



Рис. В5. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-5



Рис. В6. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей управления 1-2-5



ния 1-2-4-5



Рис. В8. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием И-регулятора и комбинацией целей управления 1-2-4-5



Рис. В9. Зависимости электромагнитного момента, потокосцеплений статора и ротора от времени, с использованием знакового регулятора и комбинацией целей управления 1-2-4-5

# 6. ПРИЛОЖЕНИЕ С

```
Текст программы
   unit Unit1;
   interface
   uses
     Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,
Graphics, Controls, Forms,
     Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls,
TeeProcs, Chart, IniFiles,
     XPMan, Math, ComCtrls, BubbleCh;
   type
     TForm1 = class(TForm)
       Panel1: TPanel;
       SaveDialog1: TSaveDialog;
       OpenDialog1: TOpenDialog;
       Button1: TButton;
       Edit1: TEdit;
       Edit2: TEdit;
       Edit3: TEdit;
       Edit4: TEdit;
       Edit5: TEdit;
       Edit6: TEdit;
       Edit7: TEdit;
       Edit8: TEdit;
       Label1: TLabel;
       Label2: TLabel;
```

Label3: TLabel; Label4: TLabel; Label5: TLabel; Label6: TLabel; Label7: TLabel; Label8: TLabel; Label10: TLabel; Edit9: TEdit; XPManifest1: TXPManifest; PageControl1: TPageControl; TabSheet1: TTabSheet; Chart1: TChart; Series1: TLineSeries; Series2: TLineSeries: Label11: TLabel; Edit10: TEdit; Label9: TLabel; Edit11: TEdit; Label12: TLabel; Edit12: TEdit; Label13: TLabel; Edit13: TEdit; Button2: TButton; Button3: TButton; TabSheet2: TTabSheet; GroupBox3: TGroupBox; GroupBox2: TGroupBox; Label15: TLabel; GroupBox4: TGroupBox; Label16: TLabel; Label17: TLabel; Label18: TLabel; Label19: TLabel; Label20: TLabel; Label21: TLabel; RadioButton10: TRadioButton; Series3: TLineSeries; RadioButton11: TRadioButton; RadioButton12: TRadioButton; GroupBox5: TGroupBox; RadioButton13: TRadioButton; GroupBox6: TGroupBox; RadioButton14: TRadioButton; RadioButton15: TRadioButton; GroupBox7: TGroupBox;

RadioButton16: TRadioButton; RadioButton17: TRadioButton; Series4: TLineSeries; Label24: TLabel; Edit17: TEdit; Label25: TLabel; Edit18: TEdit; Label26: TLabel; Edit19: TEdit; Label27: TLabel; Edit20: TEdit; CheckBox1: TCheckBox; Label28: TLabel; Edit21: TEdit; GroupBox1: TGroupBox; CheckBox2: TCheckBox; CheckBox3: TCheckBox; CheckBox4: TCheckBox; Edit22: TEdit; Label29: TLabel; Label30: TLabel; Edit23: TEdit; Label31: TLabel; Edit24: TEdit; Label14: TLabel; Edit14: TEdit; Edit15: TEdit; Label22: TLabel; GroupBox8: TGroupBox; CheckBox5: TCheckBox; procedure Button1Click(Sender: TObject); procedure Button2Click(Sender: TObject); procedure Button3Click(Sender: TObject); private { Private declarations } public { Public declarations } procedure Uravnenie(x:extended); procedure Rungekutta(t:extended); procedure Upravlenie; procedure PWM; procedure VKL vektora ; end;

```
N=4;
   var
      Form1: TForm1;
       F{функции}, Y{текущие значения}, Y0{начальные зна-
чения}:Array [0..N] of Extended;//Массив
      Isu, Isv, Iru, Irv,
     Usu, Usv, Uru, Urv, M, Im, fi,
     Umax, Mc, frequency: Extended; //фазные токи и напря-
жения, момент
UmaxN, J, Mcn, L1, L2, Lm, Lss, Lrs, Rr, Rs, p, time, P2, Ppot,
     h1, h2, h3, h4, h5, d1, d2, d3, IUsu, IUsv, IUru, IUrv,
dUsu, Dusv, dUru, dUrv, Km, Kl, Kim, Kfm, LmN, ugolN, ugol: Extend
ed;// Постоянные величины
     t:Extended; //Время
     h:Extended; //Шаг
     x:Extended;
     Eru, Erv: Extended;
     //переменные для векторного и градиентного управ-
ления
      Isaz, Isbz, Iscz {заданные токи статора},
Uz, Ush, Usa, Usb, Usc,
      Isdz, Isqz {проекции заданного тока статора на оси
dq},
     Mz{заданный момент}, Mras, Mzz, Yrz, YrzN{заданное
потокосцепление ротора},
     gamma{yroл между ab и dq},
      Yra, Yrb{проекция потокосцепления ротора на
ab},Yr,
     Ysa, Ysb, Ys, Ysn, Ysz, YszN{notokocuennehue ctatopa},
     Ualz, Ubtz {закон градиентного управле-
ния}, Proba:Extended;
   //переменные для определения ошибок регулирования
oshibka3, oshibka2, oshibka1, Xdin, Nol, Ystat, Ymin, Ymax, Zst
at, Zmin, Zmax, Nol2, Nol3,
     KYrz,KYsz:Extended;
   //переменныедля ШИМ
Ts, Ual, Ubt, Ud, T0, T1, T2, Tm, sektor, kratnost, fi sek, kratno
```

```
st sek:Extended;
```

```
implementation
   {$R *.dfm}
   procedure TForm1.Uravnenie(x:extended);
   Var
   L1, L2:Extended;
   i:integer;
   begin
   //toki
   //Задаем кривую намагниченности
     if RadioButton13.Checked then begin
       Kim:=2*pi*50*LmN/UmaxN;
       Kfm:=Kim/LmN;
       Lm:=-
0.0465*power(Im*Kim,4)/Kfm+0.3859*power(Im*Kim,3)/Kfm-
1.1592*power(Im*Kim,2)/Kfm+1.745*Im*Kim/Kfm+0.0004/Kfm;
     end
     else Lm:=LmN;
     L1:=Lss+Lm;
     L2:=Lrs+Lm;
     Isu:=(L2*Y[0]-Lm*Y[2])/(L1*L2-Lm*Lm);
     Isv:=(L2*Y[1]-Lm*Y[3])/(L1*L2-Lm*Lm);
     Iru:=(L1*Y[2]-Lm*Y[0])/(L1*L2-Lm*Lm);
     Irv:=(L1*Y[3]-Lm*Y[1])/(L1*L2-Lm*Lm);
     Im:=sqrt(sqr(Isu+Iru)+sqr(Isv+Irv));
     M:=p*Lm*(Iru*Isv-Isu*Irv);
    // Mc:=Mcn*Y[4]/(314/p);
     if Y[4]<>0 then Mc:=Mcn*Sign(y[4])
     else If M>Mcn then Mc:=Mcn else Mc:=M;
     Eru:=-p*Y[4]*Y[3];
     Erv:=p*Y[4]*Y[2];
         //Правые части диф уравнений
     F[0]:=Usu-Rs*Isu; //потокосцепление статора (Fsa)
     F[1]:=Usv-Rs*Isv; //Потокосцепление статора (Fsb)
     F[2]:={Uru+}Eru-Rr*Iru; //Потокосцепление ротора
(Fra)
     F[3]:={Urv+}Erv-Rr*Irv; //Потокосцепление ротора
(Frb)
     F[4] := (M-Mc) / J; // Скорость вращения ротора (W)
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
Var
    i:integer;
begin
//начальные условия
  For i:=0 to N do Y[i]:=0;
  Y0:=Y;
  t:=0;
  h:=1e-5; //Шаг расчета
  Umax:=0; //амплитуда напряжения
  fi:=0; //угол
  frequency:=0; //частота
  Ppot:=0;
 { Usu:=1;
  Usv:=1;
  Uru:=1;
  Urv:=1; }
  IUsu:=1;
  IUsv:=1;
  IUru:=1;
  IUrv:=1;
  Isu:=0;
  Isv:=0;
  Iru:=0;
  Irv:=0;
  oshibka3:=0;
  Ymax:=0;
  Zmax:=0;
  Ymin:=100;
  Zmin:=100;
  oshibka1:=0;
  oshibka2:=0;
  Nol:=0;
  Nol3:=0;
  Nol2:=0;
  Yrz:=0;
  Ysz:=0;
  Yr:=0;
  Ys:=0;
  Lm:=1e-6;
  Ts:=0; //время в течении которого формируется
```

for i:=0 to 3 do Chart1.Series[i].Clear; //очистить график

```
//задаем извесные параметры
     UmaxN:=strtoFloat(Edit1.Text);
     Lss:=strtoFloat(Edit2.Text);
     Lrs:=strtoFloat(Edit3.Text);
     LmN:=strtoFloat(Edit4.Text);
     Rs:=strtoFloat(Edit5.Text);
     Rr:=strtoFloat(Edit6.Text);
     Mcn:=strtoFloat(edit7.Text);
     J:=strtoFloat(Edit8.Text);
     p:=strtoFloat(Edit9.Text);
     time:=strtoFloat(Edit10.Text);
     Yrz:=strtoFloat(Edit11.Text);
     Mz:=strtoFloat(Edit12.Text);
     Ysz:=strtoFloat(Edit13.Text);
     ugolN:=strtoFloat(Edit14.Text);
     h1:=strtoFloat(Edit17.Text);//100000;
     h2:=strtoFloat(Edit18.Text);//1000000;
     h3:=strtoFloat(Edit19.Text);//1000000;
     h4:=strtoFloat(Edit20.Text);//10000000;
     h5:=strtoFloat(Edit21.Text);//0,001;
     //настроечные коэф-ты для регуляторов
     //интергальный
       d1:=strtoFloat(Edit22.Text);
     //пропорцыонально-интегральный
       d2:=strtoFloat(Edit23.Text);
     //знаковый
       d3:=strtoFloat(Edit24.Text);
     //Период модуляции
       Tm:=strtoFloat(Edit15.Text);
   //Начало цикла
     While t<5 do begin
       Upravlenie;
       Rungekutta(t);
       P2:=Rr*(Iru*Iru+Irv*Irv)+Rs*(Isu*Isu+Isv*Isv);
       Ppot:=P2*h+Ppot;
       Y0:=Y;
       t:=t+h;
Chart1.Series[0].AddXY(t, sqrt(Y[2]*y[2]+y[3]*y[3]));
```

Chart1.Series[2].AddXY(t, sqrt(Y[1]\*y[1]+y[0]\*y[0]));

```
Chart1.Series[3].AddXY(t,M);
       application.ProcessMessages; //проверяем сосед-
ние процессы
     end;
   end;
   procedure TForm1.Upravlenie;
   Begin
   //меторд скоростного градиента
       Km:=p*Lm/(L1*L2-Lm*Lm);
       Kl:=1/(L1*L2-Lm*Lm);
   //Напряжение с учетом 5 критериев (угла и потерь)
       dUsu:=h1*{Km*}(-Y[3])*(M-
M_{Z}) +2*Y[0]*h2*(Y[0]*Y[0]+Y[1]*Y[1]-
Ysz*Ysz)+h4*Y[2]*(Y[2]*Y[0]+Y[3]*Y[1]-
cos(uqol)*Ysz)+h5*{2*Kl*}((Isu*Isu+Isv*Isv)*Rs+(Iru*Iru
+Irv*Irv) *Rr) * (Isu*L2*Rs-Iru*Lm*Rr);
       dUsv:=h1*{Km*}Y[2]*(M-
Mz) +2*Y[1]*h2*(Y[0]*Y[0]+Y[1]*Y[1]-
Ysz*Ysz)+h4*Y[3]*(Y[2]*Y[0]+Y[3]*Y[1]-
cos(uqol)*Ysz)+h5*{2*Kl*}((Isu*Isu+Isv*Isv)*Rs+(Iru*Iru
+Irv*Irv) *Rr) * (Isv*L2*Rs-Irv*Lm*Rr);
       dUru:=h1*{Km*}Y[1]*(M-
Mz)+2*Y[2]*h3*(Y[2]*Y[2]+Y[3]*Y[3]-
Yrz*Yrz)+h4*Y[0]*(Y[2]*Y[0]+Y[3]*Y[1]-
cos(ugol)*Ysz)+h5*{2*Kl*}((Isu*Isu+Isv*Isv)*Rs+(Iru*Iru
+Irv*Irv)*Rr)*(Iru*L1*Rr-Isu*Lm*Rs);
       dUrv:=h1*{Km*}(-Y[0])*(M-
Mz)+2*Y[3]*h3*(Y[2]*Y[2]+Y[3]*Y[3]-
Yrz*Yrz)+h4*Y[1]*(Y[2]*Y[0]+Y[3]*Y[1]-
cos(uqol)*Ysz)+h5*{2*Kl*}((Isu*Isu+Isv*Isv)*Rs+(Iru*Iru
+Irv*Irv) *Rr) * (Irv*L1*Rr-Isv*Lm*Rs);
       IUsu:=IUsu-d1*dUsu*h;
       IUsv:=IUsv-d1*dUsv*h;
       IUru:=IUru-d1*dUru*h;
       IUrv:=IUrv-d1*dUrv*h;
   //Интегральный регулятор
    if CheckBox2.Checked then begin
       Usu:=IUsu;
       Usv:=IUsv;
       Uru:=IUru;
       Urv:=IUrv;
    end;
```

```
//Пропорцыонально-интергальный регулятор
```

```
if CheckBox3.Checked then begin
       Usu:=IUsu-d2*dUsu;
       Usv:=IUsv-d2*dUsv;
       Uru:=IUru-d2*dUru;
       Urv:=IUrv-d2*dUrv;
    end:
   //Знаковый регулятор
    if CheckBox4.Checked then begin
       Usu:=0.1-d3*sign(dUsu);
       Usv:=0.1-d3*sign(dUsv);
//коэф-т 0,01
       Uru:=0.1-d3*sign(dUru);
       Urv:=0.1-d3*sign(dUrv);
    end;
       If abs(Usu)>600 then Usu:=600*sign(Usu);
       If abs(Usv)>600 then Usv:=600*sign(Usv);
       If abs(Uru)>600 then Uru:=600*sign(Uru);
       If abs(Urv)>600 then Urv:=600*sign(Urv);
       if CheckBox5.Checked then PWM;// PWM если нажа-
та кнопка
       //считаем потери
     if CheckBox1.Checked then begin
       if t<time+0.5 then Label15.Caption:= Floatto-
str(Ppot);
     end;
   //считаем ошибку по моменту
     If (Nol<1) and ((M-Mz)>0) Then Nol:=1;
     if RadioButton10.Checked then begin
      (* if (t>time-0.011) and (t<time-0.01) then beg
      in
         Ystat:=(M-Mz)/Mz*100;
         if Ystat>Ymax then Ymax:=Ystat;
         if Ystat<Ymin then Ymin:=Ystat;</pre>
         oshibka1:=(Ymax+Ymin)/2;
         Label16.Caption:= Floattostr(oshibka1);
       end; *)
       if (4.5 < t) and (t < 5) then begin
         Zstat:=(M-Mz)/Mz*100;
         if Zstat>Zmax then Zmax:=Zstat;
         if Zstat<Zmin then Zmin:=Zstat;
         oshibka2:=(Zmax+Zmin)/2;
```

```
Label19.Caption:= Floattostr(oshibka2);
       end;
       if
           (Nol>0) and (t<time-0.01) then begin
         Xdin:=(M-Mz)/Mz*100;
         if abs(Xdin)>abs(oshibka3) then
oshibka3:=Xdin;
         Label21.Caption:= Floattostr(oshibka3);
       end;
     end;
   //считаем ошибку по потоку ротора
     If (Nol2<1) and ((Yr-Yrz)>0) Then Nol2:=1;
     if RadioButton11.Checked then begin
       Yr:=sqrt(Y[2]*Y[2]+Y[3]*Y[3]);
       if (4 < t) and (t < 5) then begin
         Ystat:=(Yr-Yrz)/Yrz*100;
         if Ystat>Ymax then Ymax:=Ystat;
         if Ystat<Ymin then Ymin:=Ystat;
         oshibka1:=(Ymax+Ymin)/2;
         Label16.Caption:= Floattostr(oshibka1);
       end;
            (Nol2>0) and (t<5) then begin
       if
         Xdin:=(Yr-Yrz)/Yrz*100;
         if abs(Xdin)>abs(oshibka3) then
oshibka3:=Xdin;
         Label21.Caption:= Floattostr(oshibka3);
       end;
     end;
     //считаем ошибку по потоку статора
     If (Nol3<1) and ((Ys-Ysz)>0) Then Nol3:=1;
     if RadioButton12.Checked then begin
       if (4 < t) and (t < 5) then begin
         Ystat:=(Ys-Ysz)/Ysz*100;
         if Ystat>Ymax then Ymax:=Ystat;
         if Ystat<Ymin then Ymin:=Ystat;</pre>
         oshibka1:=(Ymax+Ymin)/2;
         Label16.Caption:= Floattostr(oshibka1);
       end;
       if (Nol3>0) and (t<5) then begin
         Xdin:=(Ys-Ysz)/Ysz*100;
         if abs(Xdin)>abs(oshibka3) then
oshibka3:=Xdin;
         Label21.Caption:= Floattostr(oshibka3);
       end;
     end;
   end;
```

```
procedure TForm1.Rungekutta(t:extended);
   //рунгекутта
   VAR
     x: extended;
     i: Byte;
     k1,k2,k3,k4: Array [0..N] Of extended;
   BEGIN
     x:=t;
     FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i];
     Uravnenie(x);
     FOR i:=0 TO N DO k1[i]:=h * F[i];
     x := t + h/2;
     FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i] + k1[i]/2;
     Uravnenie(x);
     FOR i:=0 TO N DO k2[i]:=h * F[i];
     FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i] + k2[i]/2;
     Uravnenie(x);
     FOR i:=0 TO N DO k3[i]:=h*f[i];
     x:=t + h;
     FOR i:=0 TO N DO Y[i]:=Y0[i] + k3[i];
     Uravnenie(x);
     FOR i:=0 TO N DO k4[i]:=h * f[i];
     FOR i:=0 TO N DO
     Y[i]:=Y0[i] + (k1[i] + 2*k2[i] + 2*k3[i] +
k4[i])/6;
   END;
   procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
   begin
     saveDialog1.DefaultExt:='wmf'; //Задаем расши-
рение в окно диалога
   //Здесь мы напишем как сохранять график
     SaveDialog1.Execute;// Вызываем окно диалога со-
хранения
Chart1.SaveToMetafile (SaveDialog1.FileName);//сохраняем
график в то имя кот указано в диалоге
   end;
```

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject); var file23:TIniFile; // begin //Зугружаем данные OpenDialog1.Execute; // Вызываем окно диалога открытия file23:=TiniFile.create(OpenDialog1.FileName); //создали внутренний фаил и приравняли к файлу кот был на жестком диске Edit1.Text:=file23.ReadString('parametry','Umax','2 00'); //загружаем информацию из файла на форму Edit2.Text:=file23.ReadString('parametry', 'Lss', '0,0001') ; Edit3.Text:=file23.ReadString('parametry', 'Lrs', '0,0001') ; Edit4.Text:=file23.ReadString('parametry', 'Lm', '0,05'); Edit5.Text:=file23.ReadString('parametry', 'Rs', '0, 5'); Edit6.Text:=file23.ReadString('parametry', 'Rr', '0,05'); Edit7.Text:=file23.ReadString('parametry', 'Mc', '20'); Edit8.Text:=file23.ReadString('parametry', 'J', '0, 6'); Edit9.Text:=file23.ReadString('parametry', 'p', '2'); Edit10.Text:=file23.ReadString('parametry','t','1'); File23.Free; //отпускаем файл end; procedure TForm1.PWM;

```
Begin
       //Ud:=1.35*UmaxN/sqrt(2)*sqrt(3);
       Ud:=1.35*UmaxN;
       Ual:=Usu; //проекция напряжения на ось альфа
       Ubt:=Usv; //проекция напряжения на ось бетта
      // Ual:=100*cos(2*pi*50*t);
      // Ubt:=100*sin(2*pi*50*t);
       //T0:=Tm*(Ud/(sqrt(2)/(sqrt(1-sqr(0.5))))-
sqrt(Ual*Ual+Ubt*Ubt))/(Ud/(sqrt(2)/(sqrt(1-
sqr(0.5))));
       //TO:=Tm*(UmaxN-
sqrt(Ual*Ual+Ubt*Ubt))/UmaxN;//время при векторах рав-
ных нулю
        //T0:=Tm*sqrt(Ual*Ual+Ubt*Ubt)/Ud;
      // If TO<0 then TO:=0;
       if(Ubt>0) then fi sek:=arcTan2(Ubt,Ual)
//Угол в секторе
       else fi sek:=arcTan2(Ubt,Ual)+pi*2;
       sektor:=Floor(fi sek/(pi/3)); //Сектор
       //T1:={ (Tm-T0) } Tm*Umax1/Ud*sin(pi/3-fi sek) { (1-
fi sek/(pi/3))};
                        //Время включения первого век-
тора
      // T2:= \{ (Tm -
T0) }Tm*Umax1/Ud*sin(fi sek) { (fi sek/(pi/3)) };
//Время включения второго вектора
      // T1:=(Tm-T0)*(1-fi sek/(pi/3));
       // T2:=(Tm-T0)*(fi_sek/(pi/3));
T1:=(sqrt(3)*sqrt(Ual*Ual+Ubt*Ubt)/Ud*Tm)*sin((pi/3)*(s
ektor+1)-fi sek);
T2:=(sqrt(3)*sqrt(Ual*Ual+Ubt*Ubt)/Ud*Tm)*sin(fi sek-
(pi/3) * (sektor));
       //поочередное включение векторов
       if Ts<=T1 then begin
           VKL vektora
       end else if (Ts \le (T2+T1)) then begin
```

```
sektor:=sektor+1;
        if sektor>5 then sektor:=0;
        VKL vektora;
    end else begin
        Sektor:=6;
        VKL vektora;
        end;
    Ts:=Ts+h;
    if Ts>=Tm then Ts:=0;
// переход к двухфазному напряжению Кс
    Usu:=sqrt(2/3) * (Usa-0.5*Usb-0.5*Usc);
    Usv:=1/sqrt(2) * (Usb-Usc);
 end;
 procedure TForm1.VKL vektora;
 Begin
    if sektor=0 then
   begin
      Usa:=2/3*Ud; Usb:=-1/3*Ud; Usc:=-1/3*Ud;
    end:
    if sektor=1 then
    begin
      Usa:=1/3*Ud; Usb:=1/3*Ud; Usc:=-2/3*Ud;
    end;
    if sektor=2 then
    begin
      Usa:=-1/3*Ud; Usb:=2/3*Ud; Usc:=-1/3*Ud;
    end;
    if sektor=3 then
    begin
      Usa:=-2/3*Ud; Usb:=1/3*Ud; Usc:=1/3*Ud;
    end;
    if sektor=4 then
    begin
      Usa:=-1/3*Ud; Usb:=-1/3*Ud; Usc:=2/3*Ud;
    end;
    if sektor=5 then
    begin
      Usa:=1/3*Ud; Usb:=-2/3*Ud; Usc:=1/3*Ud;
    end:
      if sektor=6 then
    begin
      Usa:=0; Usb:=0; Usc:=0;
```

```
end;
end;
end.
```

### Симтема управления асинхронным двигателем

```
procedure TForm1.Upravlenie;
   Begin
   //прямой пуск
     if RadioButton4.Checked then begin
       Umax:=UmaxN;
       fi:=2*pi*50*t;
       Usu:=Umax*cos(fi);
       Usv:=Umax*sin(fi);
     end;
   //плавное увеличение напряжения
     if RadioButton5.Checked then begin
       fi:=2*pi*50*t;
       if Umax<UmaxN then Umax:=UmaxN/time*t
       else Umax:=UmaxN;
       Usu:=Umax*cos(fi);
       Usv:=Umax*sin(fi);
     end;
   //плавный разгон U/f=const
     if RadioButton6.Checked then begin
           frequency<50 then frequency:=50/time*t</pre>
       if
         else frequency:=50;
         Umax:=UmaxN*frequency/50;
         fi:=fi+2*pi*frequency*h;
       Usu:=Umax*cos(fi);
       Usv:=Umax*sin(fi);
     end;
   //векторное управление
     if RadioButton7.Checked then begin
      { Mras:=J*2*pi*50/p/time+Mcn;
       if t>time then Mzz:=Mcn
       else Mzz:=Mras;
                                       //нарастающий мо-
                            }
мент используем для определения
        Mzz:=Mz;
                                       //потерь при раз-
личных способах управления
       if Yrz=0 then Yrz:=1e-5;
       Isdz:=Yrz/Lm;
       Isqz:=Mzz*(Lrs+Lm)/(Yrz*p*Lm);
```

```
Yra:=Y[2];
       Yrb:=Y[3];
       Yr:=sqrt(Y[2]*Y[2]+Y[3]*Y[3]);
       If Yra=0 then gamma:=0;
       If (Yra > 0) and (Yrb >= 0) then
                                           gam-
ma:=arcTan(Yrb/Yra);
       If (Yra < 0) and (Yrb \ge 0) then
                                           gam-
ma:=arcTan(Yrb/Yra)+pi;
       If (Yra < 0) and (Yrb <= 0) then
                                           gam-
ma:=arcTan(Yrb/Yra)+pi;
       If (Yra > 0) and (Yrb <= 0) then
                                           gam-
ma:=arcTan(Yrb/Yra)+pi*2;
       Isaz:=Isdz*cos(gamma)-Isqz*sin(gamma);
       Isbz:=Isdz*sin(gamma)+Isgz*cos(gamma);
       Usu:=Usu+100000000*(Isaz-Isu)*h;
       Usv:=Usv+100000000*(Isbz-Isv)*h;
       If Abs(Usu)>380 Then Usu:=380*Sign(Usu);
       If Abs(Usv)>380 Then Usv:=380*Sign(Usv);
     end;
   //градиентное управление
     if RadioButton8.Checked then begin
     { Mras:=J*2*pi*50/p/time+Mcn;
       if t>time then Mzz:=Mcn
       else Mzz:=Mras;
                         }
                                  //нарастающий момент
используем для определения
        Mzz:=Mz;
                                      //потерь при раз-
личных способах управления
       Ysa:=Y[0];
       Ysb:=Y[1];
       Ys:=sqrt(Ysa*Ysa+Ysb*Ysb);
      // Ualz:=Ualz-19000*(-Ysb*(M-
Mzz) *550+Ysa* (Ys*Ys-Ysz*Ysz) *45) *h;
      // Ubtz:=Ubtz-19000*(Ysa*(M-Mzz)*550+Ysb*(Ys*Ys-
Ysz*Ysz)*45)*h;
```

```
Ualz:=Ualz-2800000*(-Ysb*(M-Mzz)/7+Ysa*(Ys*Ys-
Ysz*Ysz)/1)*h;
Ubtz:=Ubtz-2800000*(Ysa*(M-Mzz)/7+Ysb*(Ys*Ys-
Ysz*Ysz)/1)*h;
Usu:=Ualz;
Usv:=Ubtz;
If Abs(Usu)>380 Then Usu:=380*Sign(Usu);
```

If Abs(Usv)>380 Then Usv:=380\*Sign(Usv);

58