МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Институт энергетики
Кафедра электропривода и автоматизации

Составители
А. В. Григорьев
А. Н. Гаргаев

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Методические указания к практическим занятиям для аспирантов всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией
направления подготовки 13.06.01«Электро- и теплотехника
для использования в учебном процессе

Кемерово 2016

Рецензенты:

Григорьев А. В. – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации

Семыкина И. Ю. – доктор технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации, председатель учебно-методической комиссии направления 13.06.01 «Электро- и теплотехника»

Григорьев Александр Васильевич
Гаргаев Андрей Николаевич
Электротехнические комплексы и системы: методические указания к практическим занятиям [Электронный ресурс] для аспирантов направления подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника», образовательная программа «Электротехнические комплексы и системы», всех форм обучения / сост.: А. В. Григорьев, А. Н. Гаргаев; КузГТУ. – Электрон. дан. – Кемерово, 2016.

Приведено содержание практических занятий, основные теоретические сведения, порядок выполнения работ, список литературы, индивидуальные задания.

© КузГТУ, 2016
© Григорьев, А. В., Гаргаев, А. Н., составление, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1 **4**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ (АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ) В СРЕДЕ SCICOS 4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2 **18**
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КАБЕЛЕМ В СТАТОРНОЙ ЦЕПИ В СРЕДЕ SCICOS 18
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3 **30**
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КАБЕЛЕМ В СТАТОРНОЙ ЦЕПИ В СРЕДЕ SCICOS 30
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4 **43**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ (АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ) В СРЕДЕ LAZARUS 43
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5 **65**
МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СРЕДЕ LAZARUS 65
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6 **98**
МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ В СРЕДЕ LAZARUS 98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ **126**
ПРИЛОЖЕНИЕ **128**

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ (АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ) В СРЕДЕ SCICOS

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: изучение динамических и статических характеристик асинхронного электродвигателя при различных режимах работы в среде визуального программирования SCICOS.

Задачи работы

1. Получить навыки моделирования электромеханических систем при помощи средств вычислительной техники.
2. Изучить основные режимы работы асинхронных электродвигателей.
3. Научиться анализировать влияние различных параметров на характеристики одиночного асинхронного электродвигателя в различных режимах работы с целью их улучшения.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронный электродвигатель (АД) является наиболее распространенным электромеханическим преобразователем, используемым в промышленности. Это обусловлено следующими достоинствами: низкая стоимость; небольшие затраты на обслуживание; высокая надежность; малая инерционность ротора. К недостаткам АД можно отнести: сложное описание электромеханических процессов и, как следствие, высокая сложность синтеза и расчета управляющих устройств; асинхронный электродвигатель может работать только в режиме потребления реактивной мощности; при работе с малой нагрузкой КПД и коэффициент мощности АД значительно уменьшаются; высокая сложность идентификации параметров модели двигателя, особенно, с короткозамкнутым ротором.

Подавляющее большинство асинхронных электродвигателей являются трехфазными, для описания которых необходимо использовать систему из 8 нелинейных дифференциальных уравнений. Долгое время не удавалось синтезировать управляющие устройства

таким сложным объектом, пока не было введено понятие обобщенной электрической машины (ОЭМ). ОЭМ представляет собой идеализированную электрическую машину, имеющую по две обмотки на статоре и роторе, сдвинутые друг относительно друга на 90 электрических градусов. При таком расположении обмоток количество переменных и уравнений, описывающих электродвигатель, уменьшается, но сохраняется основа электромеханического преобразования энергии вращающееся магнитное поле. Решение системы уравнений ОЭМ возможно только численными методами.

Модель обобщенной электрической машины, имеющей трехфазную обмотку на статоре и на роторе можно представить следующей системой уравнений

$$\frac{d\Psi_{su}}{dt} = U_{su} - R_s K_1 \Psi_{su} + R_s K_2 \Psi_{ru} + \omega_k \frac{\left(\Psi_{sv} - \Psi_{sw}\right)}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - R_s K_1 \Psi_{sv} + R_s K_2 \Psi_{rv} + \omega_k \frac{\left(\Psi_{sw} - \Psi_{su}\right)}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{sw}}{dt} = U_{sw} - R_s K_1 \Psi_{sw} + R_s K_2 \Psi_{rw} + \omega_k \frac{\left(\Psi_{su} - \Psi_{sv}\right)}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{ru}}{dt} = U_{ru} - R_r K_3 \Psi_{ru} + R_r K_2 \Psi_{su} + \left(\omega_k - p\omega\right) \frac{\left(\Psi_{rv} - \Psi_{rw}\right)}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{rv}}{dt} = U_{rv} - R_r K_3 \Psi_{rv} + R_r K_2 \Psi_{sv} + \left(\omega_k - p\omega\right) \frac{\left(\Psi_{rw} - \Psi_{ru}\right)}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{rw}}{dt} = U_{rw} - R_r K_3 \Psi_{rw} + R_r K_2 \Psi_{sw} + \left(\omega_k - p\omega\right) \frac{\left(\Psi_{ru} - \Psi_{rv}\right)}{\sqrt{3}},$$

$$M = C_3 \left[\left(\Psi_{sa}\Psi_{rc} + \Psi_{sb}\Psi_{ra} + \Psi_{sc}\Psi_{rb}\right) - \left(\Psi_{sa}\Psi_{rb} + \Psi_{sb}\Psi_{rc} + \Psi_{sc}\Psi_{ra}\right) \right],$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}\left(M - M_c\right),$$

где $U_{su,v,w}$, $U_{ru,v,w}$ – напряжения, подаваемые на фазы статора и ротора электродвигателя; $\Psi_{su,v,w}$, $\Psi_{ru,v,w}$ – потокосцепления обмоток статора и ротора по осям системы координат u–v–w, вращающейся с произвольной частотой ω_k; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; L_{sl}, L_{rl} – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – индуктивность взаимной индукции; p – число пар полюсов; $K_1 = \frac{\left(2L_{rl} + 3L_m\right)}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m\left(L_{sl} + L_{rl}\right)}$,

$K_2 = \frac{3L_m}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m\left(L_{sl} + L_{rl}\right)}$, $K_3 = \frac{\left(2L_{sl} + 3L_m\right)}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m\left(L_{sl} + L_{rl}\right)}$, $C_3 = \sqrt{3}p\frac{L_m}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m\left(L_{sl} + L_{rl}\right)}$;

J – момент инерции; ω – круговая частота вращения ротора; M_c – момент сопротивления нагрузки.

Более простая модель АД получается, если принять ряд допущений, изложенных в теории обобщенной электрической машины (ОЭМ)

$$\begin{cases} \dfrac{d\Psi_{su}}{dt} = U_{su} - R_s\left(\dfrac{\Psi_{su}}{L_s'} - \dfrac{k_r}{L_s'}\Psi_{ru}\right) + \omega_0\Psi_{sv}, \\ \dfrac{d\Psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - R_s\left(\dfrac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \dfrac{k_r}{L_s'}\Psi_{rv}\right) - \omega_0\Psi_{su}, \\ \dfrac{d\Psi_{ru}}{dt} = U_{ru} - R_r\left(\dfrac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \dfrac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right) + (\omega_0 - p\omega)\Psi_{rv}, \\ \dfrac{d\Psi_{rv}}{dt} = U_{rv} - R_r\left(\dfrac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \dfrac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right) - (\omega_0 - p\omega)\Psi_{ru}, \\ M = \dfrac{3}{2}p\dfrac{k_r}{L_s'}(\Psi_{sv}\Psi_{ru} - \Psi_{su}\Psi_{rv}), \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{J}(M - M_c), \end{cases}$$

где U_{su}, U_{sv}, U_{ru}, U_{rv} – составляющие векторов напряжений, подводимых к статору и ротору, в осях системы координат u-v, вращающейся с произвольной частотой ω_0; Ψ_{su}, Ψ_{sv}, Ψ_{ru}, Ψ_{rv} – составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора в осях системы координат u-v; ω – круговая частота вращения ротора двигателя; p – число пар полюсов статора; R_s, R_r, L_s', L_r', k_s, k_r – активные сопротивления статора, ротора, переходные индуктивности статора и ротора, коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно.

Обе модели АД являются идеализированными, но первая модель позволяет без дополнительных преобразований моделировать режимы, возникающие при работе трехфазной машины (например, изменение чередования фаз, изменение числа пар полюсов, неполнофазные режимы, разрывы и короткие замыкания отдельных фаз и пр.), а вторая – позволяет упростить процедуру синтеза управляющих устройств.

Основными допущениями, принимаемыми в теории ОЭМ, являются:

- МДС обмоток синусоидальны;
- воздушный зазор равномерен;

- магнитная цепь машины не насыщается.

В работах многих авторов можно встретить различные дополнения к представленным моделям, касающиеся приближения к реальной машине, но при динамической и предварительной идентификации, а также при синтезе управляющих устройств подобные дополнения не используются.

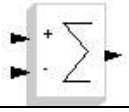
Процедура создания модели АД в среде визуального программирования SCICOS обладает рядом особенностей, напоминающих работу на аналоговых вычислительных машинах (АВМ). Для поиска значений потокосцеплений машины в каждый момент времени, необходимо переписать систему уравнений ОЭМ следующим образом

$$
\begin{aligned}
\Psi_{su} &= \int\left(U_{su} - R_s\left(\frac{\Psi_{su}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{ru}\right) + \omega_0\Psi_{sv}\right)dt,\\
\Psi_{sv} &= \int\left(U_{sv} - R_s\left(\frac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{rv}\right) - \omega_0\Psi_{su}\right)dt,\\
\Psi_{ru} &= \int\left(U_{ru} - R_r\left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right) + (\omega_0 - p\omega)\Psi_{rv}\right)dt,\\
\Psi_{rv} &= \int\left(U_{rv} - R_r\left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right) - (\omega_0 - p\omega)\Psi_{ru}\right)dt,\\
\omega &= \frac{1}{J}\int\left(\frac{3}{2}p\frac{k_r}{L_s'}(\Psi_{sv}\Psi_{ru} - \Psi_{su}\Psi_{rv}) - M_c\right)dt.
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Из примера видно, что для решения системы уравнений ОЭМ и механической подсистемы необходимо использовать пять интегросумматоров, роль которых в АВМ выполняли модули, основанные на операционных усилителях. Также как на коммутационном поле АВМ, пользователь SCICOS может размещать на рабочем поле различные блоки: сумматоры, интеграторы, перемножители, делители, константы, блоки вывода графиков и пр. Соединяются блоки при помощи изображений проводов. Основные блоки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Блоки SCICOS

№	Наименование	Изображение	Функция
Раздел палитры «linear»			
1	Сумматор (SUMMATION)		Суммирование, вычитание

№	Наименование	Изображение	Функция
2	Сумматор (SUM_f)		Суммирование
3	Усилитель (GAINBLK)		Умножение сигнала на постоянный коэффициент
4	Интегратор (INTEGRAL_m)		Интегрирование по времени входного сигнала
5	Передаточная функция (CLR)	num(s) / den(s)	Решение линейного диф. уравнения, выраженного передаточной функцией
Раздел палитры «non-linear»			
6	Перемножитель (PRODUCT)		Перемножение, деление входных величин
7	Перемножитель (PROD_f)		Перемножение входных величин
8	Математическое выражение (EXPRESSION)	Mathematical Expression	Вычисление произвольного математического выражения от нескольких переменных
Раздел палитры «sources»			
9	Постоянная (CONST_m)	1	Постоянный сигнал
10	Ступенчатая функция (STEP_FUNCTION)		Формирование ступенчатого сигнала
11	Генератор синусоиды (GENSIN_f)	sinusoid generator	Формирование синусоидального сигнала
12	Время (TIME_f)		Сигнал на выходе является временем симуляции
13	Синхронизирующие часы (CLOCK_c)		Синхронизация графиков, задание частоты выборки
Раздел палитры «sinks»			
14	Одномерный график (CSCOPE)		Построение временных зависимостей в одном поле
15	Двухмерный график (CSCOPEXY)		Построение графиков двух переменных в одном поле
16	Несколько графиков на одной форме (CMSCOPE)	MScope	Построение временных зависимостей на одной форме в разных полях
Раздел палитры «branching»			
17	Мультиплексор (MUX)		Объединяет несколько скалярных величин в одну –

№	Наименование	Изображение	Функция
			векторную
18	Демультиплексор (DEMUX)		Разделяет векторную величину на составляющие
19	Переключатель (SWITCH2_s)	switch	Передает сигнал на выход с одного из нескольких ходов в зависимости от управляющего сигнала

3. СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ В СРЕДЕ SCICOS

Для моделирования электромеханических процессов асинхронного электродвигателя в среде SCICOS необходимо представить модель через систему интегральных уравнений, и затем по ней составить структурную схему из блоков, представленных в табл. 1. Например, система уравнений (3) в среде SCICOS можно представить структурной схемой на рис. 2. Значения констант можно задавать в специальном окне «Context», в котором знак « = » означает присвоение значения, а « ; » является разделителем выражений. Поле «Context» позволяет задавать константы в виде алгебраических выражений, содержащих другие константы. Структурная схема на рис. 2 является не единственной возможной. Например, дифференциальные уравнения ОЭМ можно представить в виде передаточных функций, и тогда структурная схема изменит свой вид коренным образом. Результаты моделирования при этом будут такими же.

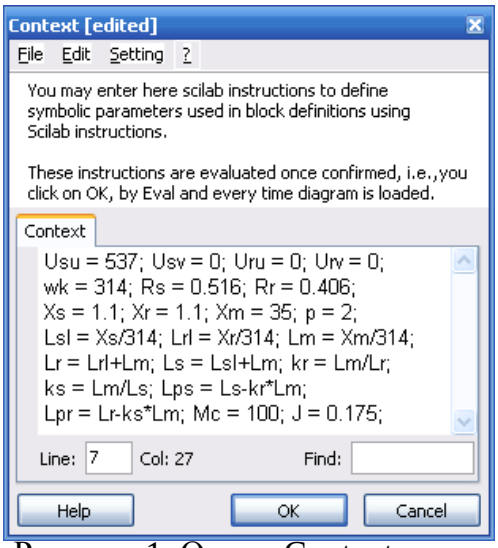


Рисунок 1. Окно «Context» с заданными значениями параметров модели АД

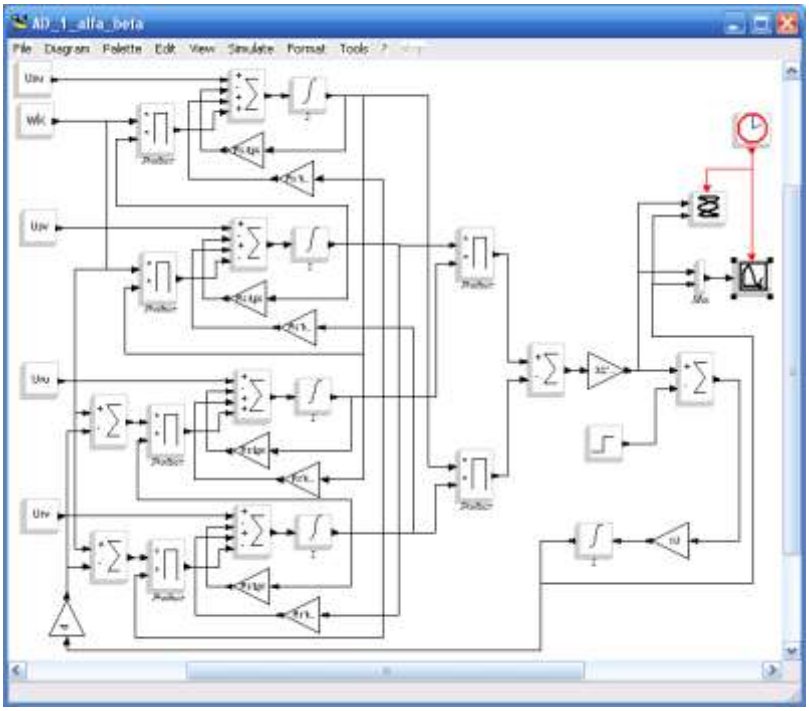


Рисунок 2. Структурная схема АД в среде SCICOS

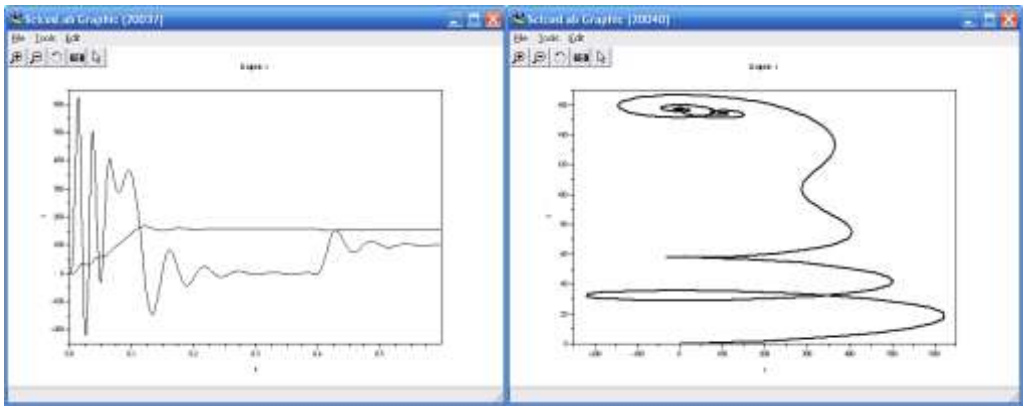


Рисунок 3. Результаты моделирования электромеханических процессов электродвигателя ВРП160М4

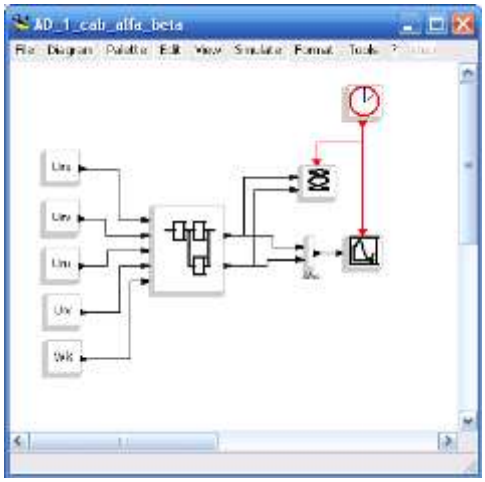


Рисунок 4. Структурная схема с суперблоком

Составленные структурные схемы желательно использовать в дальнейшем при исследовании многодвигательных электроприводов, поэтому можно сложную структурную схемы заключить в суперблок (superblock). Для этого необходимо выделить те **объекты, которые должны входить в** суперблок и щелкнув правой кнопкой мыши по выделенному выбрать из выпадающего списка команду «region to super block». В результате

структурная схема на рис. 2 примет вид схемы на рис. 4. На рис. 4 из суперблока выведены сигналы: электромагнитный момент и частота вращения вала электродвигателя. В суперблок на рис. 4 входят сигналы: составляющие результирующих векторов напряжений статора и ротора, а также круговая частота вращения системы координат.

4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Под режимами работы будем понимать специфические условия работы электропривода. Можно выделить следующие основные режимы работы асинхронного электропривода:

- работа вхолостую;
- работа под нагрузкой;
- короткое замыкание одной, двух и трех фаз обмотки статора АД;
- короткое замыкание одной, двух и трех фаз обмотки ротора (для АД с фазным ротором);
- блокирование вала АД (работа на упор);
- опрокидывание;
- изменение чередования фаз;
- разрыв одной, двух и трех фаз АД;
- изменение числа пар полюсов;
- электродинамическое торможение;
- реверс;
- торможение противовключением;
- самозапуск.

Рассмотрим кратко каждый режим работы.

Работа вхолостую

Режим получается при полном отсутствии нагрузки на валу электродвигателя. В реальных условиях не возможен, так как, в самом электродвигателе существует трение в подшипниковых узлах и сопротивление вращению, вызванное вентилятором охлаждения. Для режима свойственны следующее недостатки: уменьшение коэффициента мощности двигателя, ненужный расход электроэнергии.

Работа под нагрузкой

Основной режим работы электрических машин. Получается при подаче момента сопротивления на вал двигателя. Для режима свойственно: снижение частоты вращения и увеличение амплитуд токов статора и ротора пропорционально моменту сопротивления, изменение коэффициента мощности в зависимости от нагрузки.

Короткое замыкание фаз обмоток статора или ротора

Для моделирования режимов необходимо использовать трехфазную модель АД. Короткое замыкание фаз моделируется сбросом в 0 соответствующих значений фазных напряжений. Для режима свойственно: при отсутствии активной нагрузки – остановка машины, а при активном моменте сопротивления – движение в направлении действия нагрузки; увеличение амплитуды токов фаз машины до недопустимых значений.

Usu = 0 – однофазное короткое замыкание обмотки статора;

Usu = 0, Usv = 0 – двухфазное короткое замыкание обмотки статора;

Usu = 0, Usv = 0, Usw = 0 – трехфазное короткое замыкание обмотки статора.

Блокирование вала АД

Режим характерен для горных машин. Происходит при столкновении рабочего органа машины с непреодолимым препятствием. Режим приводит к опрокидыванию электродвигателя, так как момент сопротивления превышает критический момент АД. Для режима свойственно: увеличение амплитуды токов двигателя и электромагнитного момента до пусковых значений.

Для моделирования режима необходимо использовать следующее уравнение механического движения

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}\left(M - c\varphi - b\omega\right),$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega,$$

где φ – угол поворота вала АД; c, b – коэффициенты жесткости и внутреннего трения вала АД, ω – круговая частота вращения вала АД; J – момент инерции вала АД.

Опрокидывание

Характеристика АД имеет участок с отрицательным значением жесткости, на котором устойчивая работа не возможна. Для по-

падания на этот участок характеристики необходимо, чтобы момент сопротивления на валу электродвигателя превысил значение критического электромагнитного момента. Тогда двигатель начинает останавливаться (опрокидывается), что приводит к увеличению амплитуд фазных токов машины и колебаниям электромагнитного момента. Такой режим может возникнуть по разным причинам: стопорение рабочего органа машины, снижение амплитуды питающего напряжения и др.

Моделирование выполняется при помощи увеличения момента сопротивления выше уровня критического момента и при помощи снижения питающего напряжения при номинальной нагрузке на валу.

Изменение чередования фаз

Для анализа процессов в многофазных электрических цепях применяют векторные диаграммы. Если многофазная электрическая цепь симметрична, то векторы токов и напряжений цепи образуют симметричные плоские фигуры с числом вершин, равным числу фаз цепи. Например, при схеме соединения обмотки двигателя «звезда» векторы напряжений изображаются в виде звезды с тремя вершинами. Порядок чередования фаз считается против часовой стрелки. Прямой порядок фаз: А-В-С. Обратный Порядок фаз: А-С-В. Отсюда видно, что для изменения порядка фаз с прямого на обратный необходимо поменять всего две фазы кабеля местами.

Для моделирования режима необходимо использовать трехфазную модель ОЭМ. Вначале выполняется прямой пуск АД, а затем напряжения фаз В и С меняются местами.

Разрыв фаз АД

Режим возникает при повреждении одной, двух или всех фаз. Разрыв всех фаз АД эквивалентен отключению двигателя от сети при помощи коммутационной аппаратуры. Обычно, студенты пытаются реализовать режим при помощи обнуления значений фазных напряжений, но это не верно. Для реализации режима, необходимо увеличить активное сопротивление обмотки статора до большого значения (10000–100000).

Изменение числа пар полюсов

Изменение числа пар полюсов является одним из способов регулирования частоты вращения АД, а также пуска. Реализуется ре-

жим при помощи переключения схемы соединения обмотки. Распространение получили схемы «треугольник – двойная звезда», «звезда – двойная звезда». Во всех случаях помимо простого изменения числа p необходимо изменять параметры обмотки статора (рис. 5).

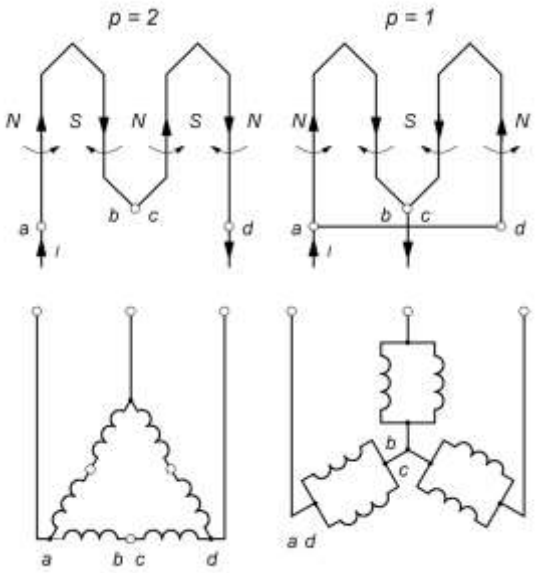


Рисунок 5. Изменение числа пар полюсов

Электродинамическое торможение

Для осуществления режима обмотку статора отключают от сети переменного тока и подключают к сети постоянного тока. При этом значение напряжения сети постоянного тока меньше в несколько раз значения амплитуды напряжения сети переменного тока. Моделирование осуществляется таким образом

$$\omega_k = 0, U_{su} = 50 \div 150, U_{sv} = 0.$$

Реверс

Изменение направления вращения вала АД осуществляется изменением чередования фаз, а также изменением знака частоты питающего напряжения (при использовании преобразователя частоты). В первом случае в цепь статора или ротора вводится добавочное сопротивление с целью ограничения токов обмоток.

Торможение противовключением

Реализуется путем перевода АД в режим «реверс» с введением добавочного сопротивления в цепь статора или ротора, но при достижении частотой вращения вала нулевого значения производится

отключение питающего напряжения и блокируется вал механическим тормозом.

Самозапуск

Этот режим возникает, когда происходит внезапное отключение и повторное включение питающего напряжения в течение короткого промежутка времени. Характерным для этого режима является непредсказуемое поведение электродвигателя: либо запуск проходит удачно и двигатель сразу разгоняется до рабочей частоты вращения, либо он останавливается и затем разгоняется до рабочей частоты вращения с большими колебаниями токов и электромагнитного момента. Эти явления связаны с незатухшим полем ротора, которое вращается вмести с ним. Поведение АД в режиме самозапуска определяется соотношением составляющих векторов питающего напряжения и ЭДС, наводимой в обмотке статора ротором. Моделируется аналогично режиму «разрыв фаз».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Преподаватель назначает студенту тип двигателя из табл. 2 и режим работы из пункта 4 методических указаний. Студент должен выполнить лабораторную работу и составить отчет. Отчет выполняется на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, кегль – 14, междустрочный интервал – 1,5.

При выполнении лабораторной работы студент должен:

1. Сделать краткий конспект по теме лабораторной работы (не более 2 стр.) и повторить режимы работы асинхронных электродвигателей.

2. Составить структурную схему модели асинхронного электропривода. Занести структурную схему и описание к ней в отчет по лабораторной работе (не менее 2 стр.).

3. Составить структурную схему модели электропривода в среде SCICOS пакета SCICOSLab. Занести структурную схему SCICOS и описание модели электропривода в отчет по лабораторной работе (3 стр.).

4. Провести вычислительный эксперимент с целью изучения характеристик однодвигательного асинхронного электропривода в заданном режиме работы.

В результате проведенного вычислительного эксперимента должны быть сняты временные зависимости частоты вращения ротора и электромагнитного момента АД. Студенты должны проанализировать результаты компьютерной симуляции и сделать выводы о влиянии различных параметров АД и режимов работы на характеристики электропривода. Пояснения, графики и выводы заносятся в отчет по лабораторной работе (не менее 6 стр.).

Таблица 2

Параметры асинхронных электродвигателей

Параметры	**ДКВ45**	**ДКВ250КМ**	**ДКВ315L4**	**ДКВ315L4/12**	**ДКВ355L4/12**	**АВР280L4**	**ДКВ355LВ4**
Рн, кВт	45	200	200	160/55	200/65	160	315
Uн, В	1140	1140	1140	1140	1140	1140	1140
Iн, А	29,8	121	125	110/68	127/89	102,9	186
Rs, Ом	0,82	0,087	0,071	0,18/0,64	0,089/0,31	0,072	0,054
Xs, Ом	1,96	0,448	0,423	0,478/1,12	0,323/0,775	0,405	0,183
Rr’, Ом	0,68	0,060	0,111	0,034/0,15	0,041/0,189	0,091	0,047
Xr’, Ом	3,14	0,398	0,684	0,453/2,04	0,372/1,745	0,682	0,287
Xm, Ом	50,6	15,0	15,1	10,2/9,85	11,0/7,622	14,6	10,8
Ki	5,3	7,9	6,2	7,5/3,8	8,2/3,47	8,0	10,0
Км	2,15	3,5	2,5	3,4/2,5	3,94/2,87	3,2	3,9
Кп	2,1	1,5	2,5	1,8/1,9	2,6/2,72	3,3	4,0
cos(φ)	0,846	0,88	0,86	0,8/0,5	0,85/0,45	0,833	0,9
КПД	90,0	94,0	93,7	92,5/81,6	93,0/81,9	94,2	94,6
I0, А	11,3	42,6	42,5	62,0/60,0	58,3/78,6	44,0	60,0
J, кг·м^2	0,31	2,1	2,88	2,88	4,69	2,42	4,69

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common (Дата обращения: 20.06.2014).

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» /

Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для электротехн. и энергет. специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КАБЕЛЕМ В СТАТОРНОЙ ЦЕПИ В СРЕДЕ SCICOS

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: изучение влияния параметров кабельной сети на работу однодвигательного асинхронного электропривода в среде визуального программирования SCICOS.

Задачи работы

1. Получить навыки моделирования электромеханических систем при помощи средств вычислительной техники.
2. Изучить влияние параметров кабельной сети на работу асинхронного электродвигателя.
3. Научиться анализировать электромеханические процессы сложных электромеханических систем с целью улучшения их характеристик.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Модель асинхронного электродвигателя (АД) без учета влияния кабельной сети в системе координат α-β выглядит следующим образом

$$\begin{aligned}
&\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s\left(\frac{\Psi_{s\alpha}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{r\alpha}\right),\\
&\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{r\beta}\right),\\
&\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = U_{r\alpha} - R_r\left(\frac{\Psi_{r\alpha}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{s\alpha}\right) - p\omega\Psi_{r\beta},\\
&\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = U_{r\beta} - R_r\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{s\beta}\right) + p\omega\Psi_{r\alpha},\\
&M = \frac{3}{2}p\frac{k_r}{L_s'}\left(\Psi_{s\beta}\Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha}\Psi_{r\beta}\right),\\
&\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}\left(M - M_c\right),
\end{aligned} \qquad (1)$$

где $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$ – составляющие векторов напряжений, подводимых к статору и ротору, в осях системы координат α-β, неподвижной относительно статора; $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора в осях системы координат α-β; ω – круговая частота вращения ротора двигателя; p – число пар полюсов статора; R_s, R_r, L_s', L_r', k_s, k_r – активные сопротивления статора, ротора, переходные индуктивности статора и ротора, коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно.

Основными допущениями, принимаемыми в модели АД, являются:

- МДС обмоток синусоидальны;
- воздушный зазор равномерен;
- магнитная цепь машины не насыщается.

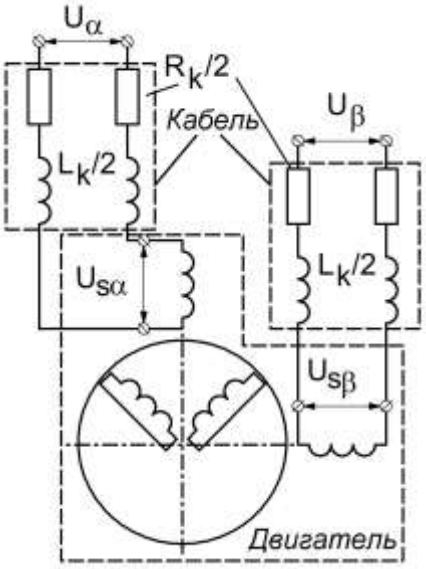


Рисунок 5. АД с кабелем в статорной цепи

Процессы в кабельной сети могут быть исследованы при помощи связей Кирхгофа

$$L_k \frac{di_{s\alpha}}{dt} = U_{k\alpha} - R_k i_{s\alpha},$$

$$L_k \frac{di_{s\beta}}{dt} = U_{k\beta} - R_k i_{s\beta},$$

$$U_{k\alpha} = U_\alpha - U_{s\alpha},$$

$$U_{k\beta} = U_\beta - U_{s\beta},$$

где $U_{k\alpha}$, $U_{k\beta}$ – составляющие падения напряжения на кабеле в системе координат α-β; U_α, U_β – составляющие вектора питающего

напряжения в системе координат α-β; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – составляющие вектора напряжения на клеммах двигателя.

Связи между токами и потоками в асинхронном электродвигателе записываются следующим образом

$$i_{s\alpha} = \frac{\Psi_{s\alpha} - k_r \Psi_{r\alpha}}{L_s'}, \; i_{s\beta} = \frac{\Psi_{s\beta} - k_r \Psi_{r\beta}}{L_s'}.$$

Для определения производных токов статора удобно использовать следующие выражения

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_s'}\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} - \frac{k_r}{L_s'}\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt}, \; \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{L_s'}\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} - \frac{k_r}{L_s'}\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt}.$$

Процедура создания модели АД в среде визуального программирования SCICOS обладает рядом особенностей, напоминающих работу на аналоговых вычислительных машинах (АВМ). Для поиска значений потокосцеплений машины в каждый момент времени, необходимо переписать систему уравнений АД следующим образом

$$\begin{aligned}
\Psi_{s\alpha} &= \frac{L_k k_r}{\left(1+\frac{L_k}{L_s'}\right)L_s'}\Psi_{r\alpha} + \frac{1}{\left(1+\frac{L_k}{L_s'}\right)}\int\left(U_\alpha - \left(R_s + R_k\right)\left(\frac{\Psi_{s\alpha}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{r\alpha}\right)\right)dt, \\
\Psi_{s\beta} &= \frac{L_k k_r}{\left(1+\frac{L_k}{L_s'}\right)L_s'}\Psi_{r\beta} + \frac{1}{\left(1+\frac{L_k}{L_s'}\right)}\int\left(U_\beta - \left(R_s + R_k\right)\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{r\beta}\right)\right)dt, \\
\Psi_{r\alpha} &= \int\left(-R_r\left(\frac{\Psi_{r\alpha}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{s\alpha}\right) - p\omega\Psi_{r\beta}\right)dt, \\
\Psi_{r\beta} &= \int\left(-R_r\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{s\beta}\right) + p\omega\Psi_{r\alpha}\right)dt, \\
\omega &= \frac{1}{J}\int\left(\frac{3}{2}p\frac{k_r}{L_s'}\left(\Psi_{s\beta}\Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha}\Psi_{r\beta}\right) - M_c\right)dt.
\end{aligned} \quad . \qquad (2)$$

Из примера видно, что для решения системы уравнений АД с кабелем в статорной цепи и механической подсистемы необходимо использовать пять интегросумматоров, роль которых в АВМ выполняли модули, основанные на операционных усилителях. Также как на коммутационном поле АВМ, пользователь SCICOS может размещать на рабочем поле различные блоки: сумматоры, интеграторы, перемножители, делители, константы, блоки вывода графиков и пр. Соединяются блоки при помощи изображений проводов. Основные блоки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Блоки SCICOS

№	Наименование	Изображение	Функция
Раздел палитры «linear»			
1	Сумматор (SUMMATION)		Суммирование, вычитание
2	Сумматор (SUM_f)		Суммирование
3	Усилитель (GAINBLK)		Умножение сигнала на постоянный коэффициент
4	Интегратор (INTEGRAL_m)		Интегрирование по времени входного сигнала
5	Передаточная функция (CLR)	num(s) / den(s)	Решение линейного диф. уравнения, выраженного передаточной функцией
Раздел палитры «non-linear»			
6	Перемножитель (PRODUCT)		Перемножение, деление входных величин
7	Перемножитель (PROD_f)		Перемножение входных величин
8	Математическое выражение (EXPRESSION)	Mathematical Expression	Вычисление произвольного математического выражения от нескольких переменных
Раздел палитры «sources»			
9	Постоянная (CONST_m)	1	Постоянный сигнал
10	Ступенчатая функция (STEP_FUNCTION)		Формирование ступенчатого сигнала
11	Генератор синусоиды (GENSIN_f)	sinusoid generator	Формирование синусоидального сигнала
12	Время (TIME_f)		Сигнал на выходе является временем симуляции
13	Синхронизирующие часы (CLOCK_c)		Синхронизация графиков, задание частоты выборки
Раздел палитры «sinks»			
14	Одномерный график (CSCOPE)		Построение временных зависимостей в одном поле

№	Наименование	Изображение	Функция
15	Двухмерный график (CSCOPEXY)		Построение графиков двух переменных в одном поле
16	Несколько графиков на одной форме (CMSCOPE)	MScope	Построение временных зависимостей на одной форме в разных полях
Раздел палитры «branching»			
17	Мультиплексор (MUX)		Объединяет несколько скалярных величин в одну – векторную
18	Демультиплексор (DEMUX)		Разделяет векторную величину на составляющие
19	Переключатель (SWITCH2_s)	switch	Передает сигнал на выход с одного из нескольких входов в зависимости от управляющего сигнала

3. СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ В СРЕДЕ SCICOS

Для моделирования электромеханических процессов асинхронного электродвигателя с кабелем в статорной цепи в среде SCICOS необходимо представить модель через систему интегральных уравнений (2), и затем по ней составить структурную схему из блоков, представленных в табл. 1. Значения констант можно задавать в специальном окне «Context», в котором знак « = » означает присвоение значения, а « ; » является разделителем выражений. Поле «Context» позволяет задавать константы в виде алгебраических выражений, содержащих другие константы.

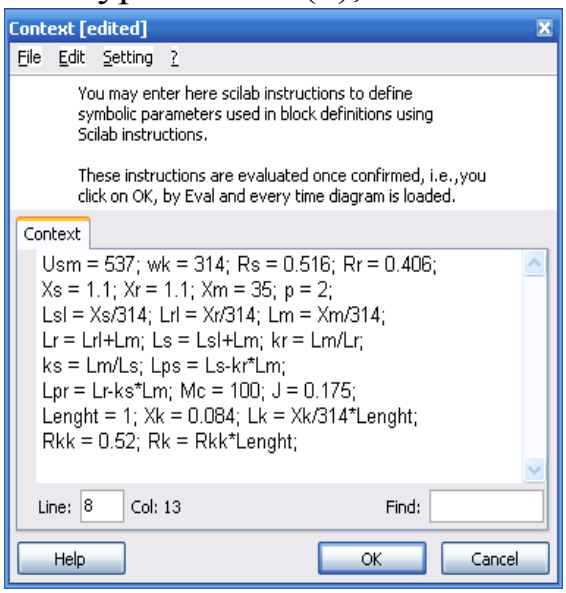


Рисунок 6. Окно «Context»

На рис. 2 обозначено: Lenght – длина кабеля, км; Xk, Rkk – погонные индуктивное и активное сопротивления кабеля в Ом/км.

Структурная схема модели АД с кабелем в статорной цепи в SCICOS показана на рис. 3. На рис. 5 показаны результаты моделирования. На рис. 5 видно, что кабель

значительно изменяет вид переходных процессов в электродвигателе. Изменение амплитуды напряжения, подводимого к электродвигателю, и амплитуды падения напряжения в кабеле можно отследить, используя выражения

$$U_{s\alpha} = U_{\alpha} - R_k i_{s\alpha} - L_k \frac{di_{s\alpha}}{dt}, U_{s\beta} = U_{\beta} - R_k i_{s\beta} - L_k \frac{di_{s\beta}}{dt},$$

$$U_{k\alpha} = R_k i_{s\alpha} + L_k \frac{di_{s\alpha}}{dt}, U_{k\beta} = R_k i_{s\beta} + L_k \frac{di_{s\beta}}{dt},$$

$$U_s = \sqrt{U_{s\alpha}^{\ 2} + U_{s\beta}^{\ 2}}, U_k = \sqrt{U_{k\alpha}^{\ 2} + U_{k\beta}^{\ 2}}.$$

Представленные выражения реализованы в структурной схеме на рис. 5, где sqr – возведение во вторую степень; sqrt – извлечение квадратного корня.

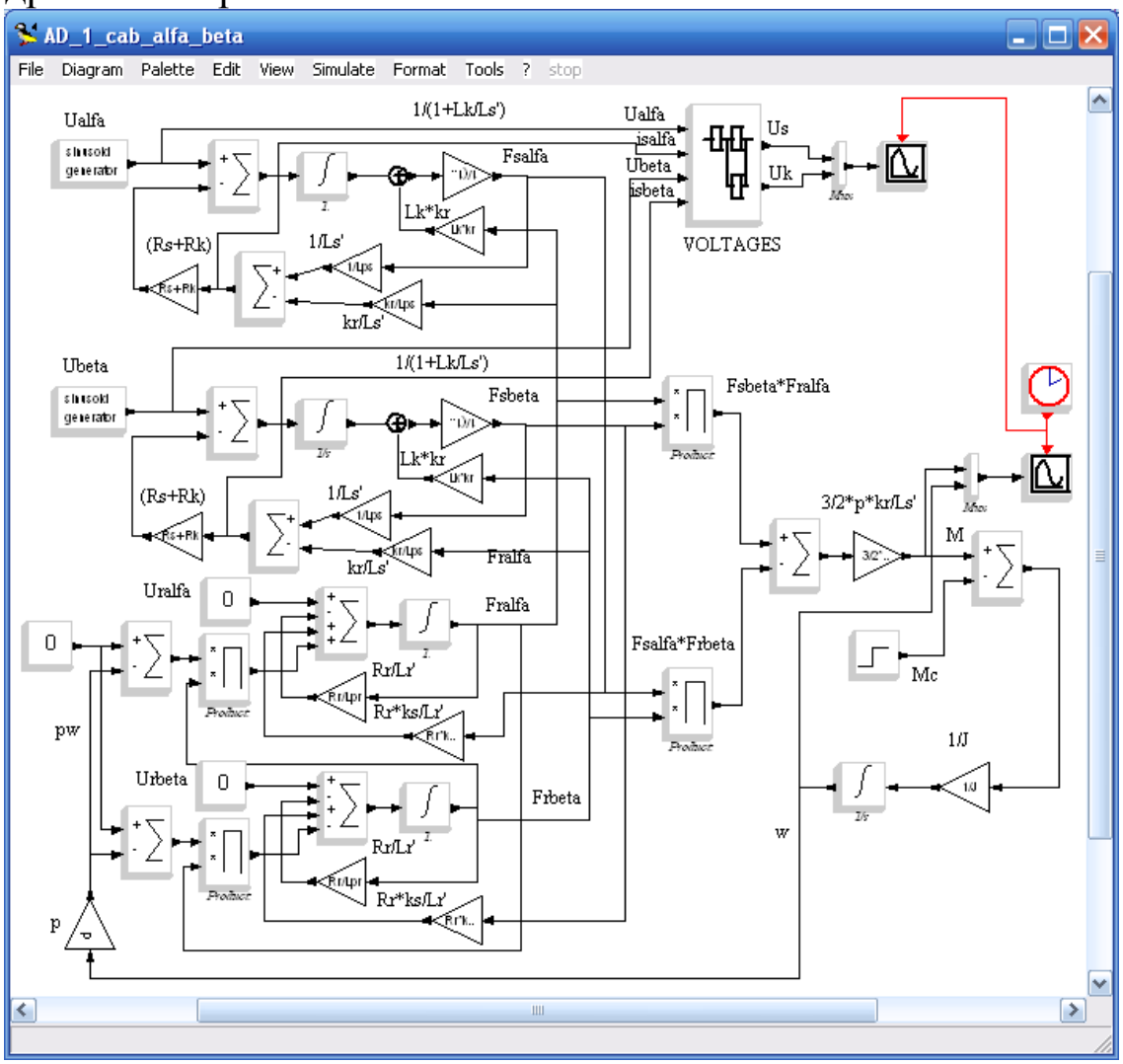


Рисунок 7. Структурная схема АД с кабелем в статорной цепи в среде SCICOS

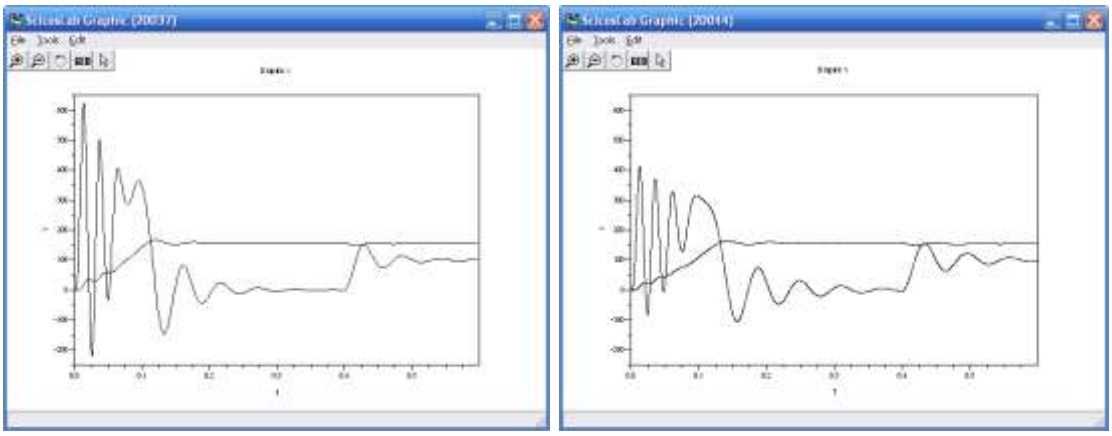


Рисунок 8. Результаты моделирования электромеханических процессов электродвигателя ВРП160М4 без кабеля (слева) и с кабелем длиной 1 км (справа)

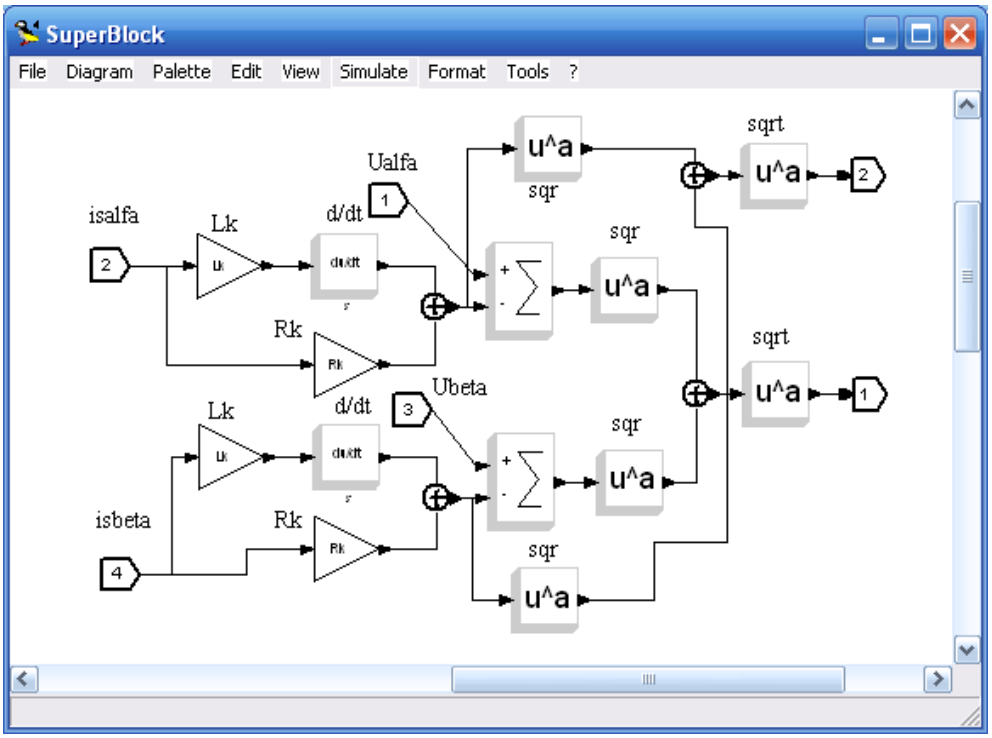


Рисунок 9. Структурная схема суперблока «VOLTAGES»

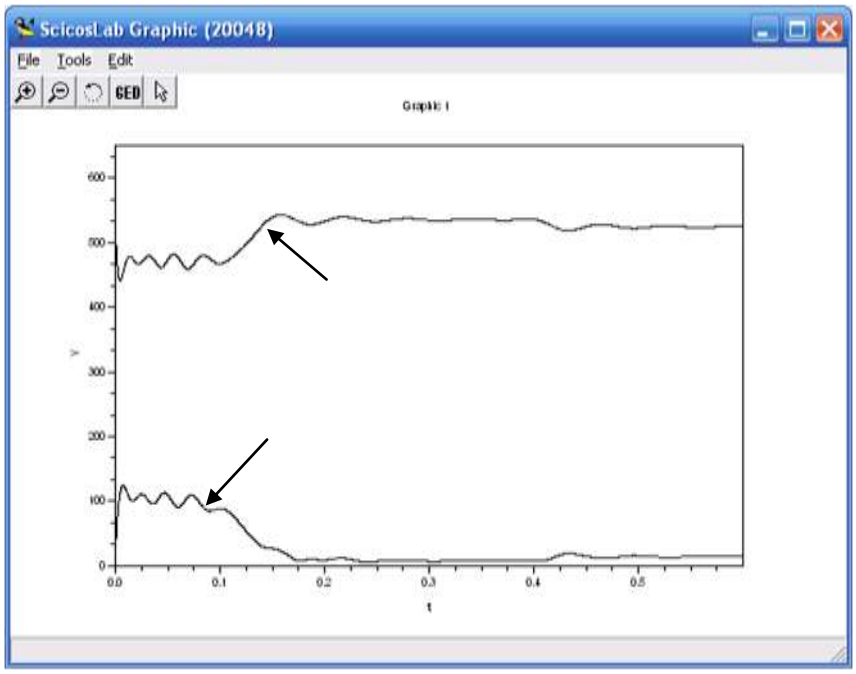


Рисунок 10. Амплитуды напряжения, подводимого к АД
и падения напряжения в кабеле

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Преподаватель назначает студенту тип двигателя из табл. 2 и тип кабеля из табл. 3, а также режим работы. Студент должен выполнить лабораторную работу и составить отчет. Отчет выполняется на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, кегль –14, междустрочный интервал – 1,5.

При выполнении лабораторной работы студент должен:

1. Сделать краткий конспект по теме лабораторной работы (не более 2 стр.) и повторить режимы работы асинхронных электродвигателей.

2. Составить структурную схему модели асинхронного электропривода с кабелем в статорной цепи и повторить теоретический материал по данной теме. Занести структурную схему и описание к ней в отчет по лабораторной работе (не менее 2 стр.).

3. Составить структурную схему модели электропривода в среде SCICOS пакета SCICOSLab. Занести структурную схему SCICOS и описание модели электропривода в отчет по лабораторной работе (3 стр.).

4. Провести вычислительный эксперимент с целью изучения влияния параметров кабельной сети на работу однодвигательного электропривода.

Провести три пуска электропривода с кабелем различной длины (300, 500, 1000 м). Выбор другого кабеля и выполнение симуляции при тех же длинах кабеля. В результате проведенных вычислительных экспериментов должны быть сняты временные зависимости частоты вращения ротора и электромагнитного момента АД, амплитуды напряжения статора и амплитуды падения напряжения в кабеле. Проанализировать результаты компьютерной симуляции и сделать выводы. Пояснения, графики и выводы заносятся в отчет по лабораторной работе (не менее 6 стр.).

Таблица 2

Параметры асинхронных электродвигателей

Параметры	**ДКВ45**	**ДКВ250КМ**	**ДКВ315L4**	**ДКВ315L4/12**	**ДКВ355L4/12**	**АВР280L4**	**ДКВ355LВ4**
Рн, кВт	45	200	200	160/55	200/65	160	315
Uн, В	1140	1140	1140	1140	1140	1140	1140
Iн, А	29,8	121	125	110/68	127/89	102,9	186
Rs, Ом	0,82	0,087	0,071	0,18/0,64	0,089/0,31	0,072	0,054
Xs, Ом	1,96	0,448	0,423	0,478/1,12	0,323/0,775	0,405	0,183
Rr’, Ом	0,68	0,060	0,111	0,034/0,15	0,041/0,189	0,091	0,047
Xr’, Ом	3,14	0,398	0,684	0,453/2,04	0,372/1,745	0,682	0,287
Xm, Ом	50,6	15,0	15,1	10,2/9,85	11,0/7,622	14,6	10,8
Ki	5,3	7,9	6,2	7,5/3,8	8,2/3,47	8,0	10,0
Км	2,15	3,5	2,5	3,4/2,5	3,94/2,87	3,2	3,9
Кп	2,1	1,5	2,5	1,8/1,9	2,6/2,72	3,3	4,0
cos(φ)	0,846	0,88	0,86	0,8/0,5	0,85/0,45	0,833	0,9
КПД	90,0	94,0	93,7	92,5/81,6	93,0/81,9	94,2	94,6
I0, А	11,3	42,6	42,5	62,0/60,0	58,3/78,6	44,0	60,0
J, кг·м^2	0,31	2,1	2,88	2,88	4,69	2,42	4,69

Таблица 3

Параметры кабелей

Сечение жилы, мм^2	Погонное сопротивление, Ом/км		
	Активное бронированного и гибкого кабелей при 20 °С	Индуктивное бронированного кабеля на напряжение до 1000 В	Индуктивное гибкого кабеля на напряжение до 1000 В
35	0,52/0,539	0,064	0,084
50	0,37/0,394	0,063	0,081
70	0,26/0,281	0,061	0,079
95	0,194/0,202	0,060	0,078
120	0,153/0,163	0,060	0,076

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common (Дата обращения: 20.06.2014).

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для электротехн. и энергет. специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С КАБЕЛЕМ В СТАТОРНОЙ ЦЕПИ В СРЕДЕ SCICOS

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: изучение влияния кабельной сети на работу многодвигательного асинхронного электропривода.

Задачи работы

1. Получить навыки моделирования электромеханических систем при помощи средств вычислительной техники.
2. Изучить процессы обмена энергией между двигателями в составе многодвигательного электропривода, имеющего общую кабельную сеть.
3. Научиться анализировать процессы сложных электромеханических систем с целью улучшения их характеристик.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Модель асинхронного электродвигателя (АД) без учета влияния кабельной сети в системе координат α-β выглядит следующим образом

$$\begin{aligned}
&\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s\left(\frac{\Psi_{s\alpha}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{r\alpha}\right),\\
&\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{r\beta}\right),\\
&\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = U_{r\alpha} - R_r\left(\frac{\Psi_{r\alpha}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{s\alpha}\right) - p\omega\Psi_{r\beta},\\
&\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = U_{r\beta} - R_r\left(\frac{\Psi_{r\beta}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{s\beta}\right) + p\omega\Psi_{r\alpha},\\
&M = \frac{3}{2}p\frac{k_r}{L_s'}\left(\Psi_{s\beta}\Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha}\Psi_{r\beta}\right),\\
&\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}\left(M - M_c\right),
\end{aligned} \quad . \qquad (1)$$

где $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$ – составляющие векторов напряжений, подводимых к статору и ротору, в осях системы координат α-β, непо-

движной относительно статора; $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора в осях системы координат α-β; ω – круговая частота вращения ротора двигателя; p – число пар полюсов статора; R_s, R_r, L_s', L_r', k_s, k_r – активные сопротивления статора, ротора, переходные индуктивности статора и ротора, коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно.

Основными допущениями, принимаемыми в модели АД, являются:

- МДС обмоток синусоидальны;
- воздушный зазор равномерен;
- магнитная цепь машины не насыщается.

Схема включения многодвигательного электропривода в кабельную сеть показана на рис. 1.

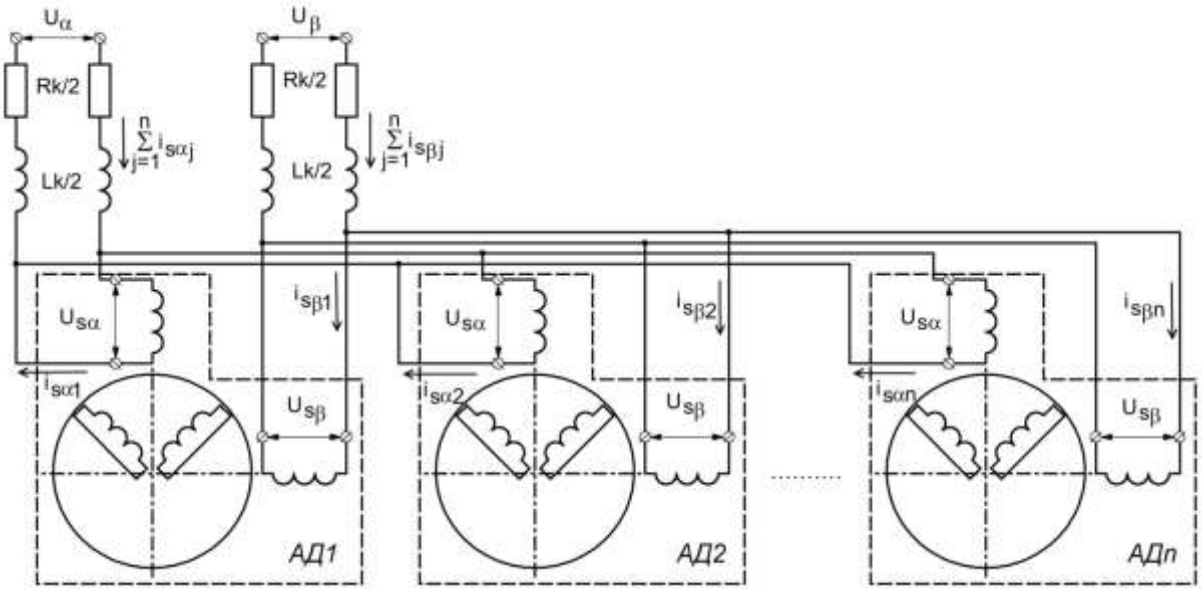


Рисунок11. Многодвигательный асинхронный электропривод с кабелем в статорной цепи

Процессы в кабельной сети (рис. 1) могут быть исследованы при помощи связей Кирхгофа

$$L_k \frac{d\sum_{j=1}^{n} i_{s\alpha j}}{dt} = U_{k\alpha} - R_k \sum_{j=1}^{n} i_{s\alpha j},$$

$$L_k \frac{d\sum_{j=1}^{n} i_{s\beta j}}{dt} = U_{k\beta} - R_k \sum_{j=1}^{n} i_{s\beta j},$$

$$U_{k\alpha} = U_\alpha - U_{s\alpha},$$

$$U_{k\beta} = U_\beta - U_{s\beta},$$

,

где $U_{k\alpha}$, $U_{k\beta}$ – составляющие падения напряжения на кабеле в системе координат α-β; U_α, U_β – составляющие вектора питающего напряжения в системе координат α-β; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – составляющие вектора напряжения на клеммах двигателя; n – число двигателей, включенных параллельно.

Связи между токами и потоками в асинхронном электродвигателе записываются следующим образом

$$i_{s\alpha i} = \frac{\Psi_{s\alpha i} - k_r \Psi_{r\alpha i}}{L_s'}, \; i_{s\beta i} = \frac{\Psi_{s\beta i} - k_r \Psi_{r\beta i}}{L_s'},$$

где i – номер двигателя.

Для определения производных токов статора удобно использовать следующие выражения

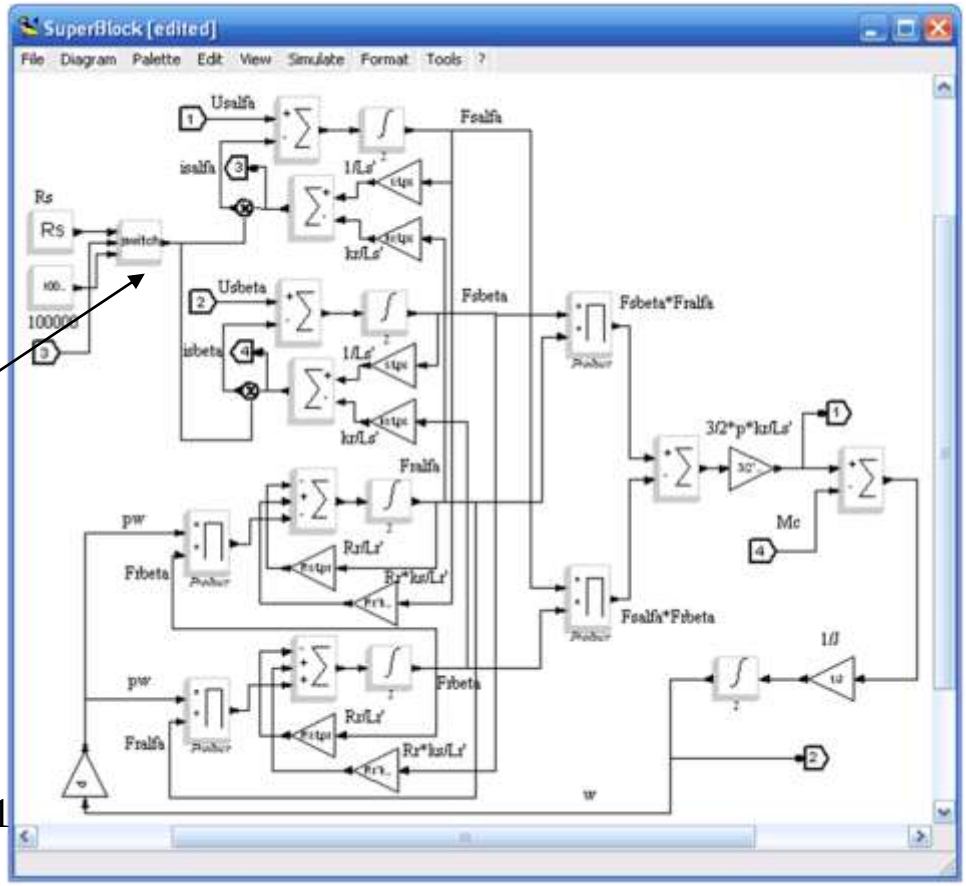
$$\frac{di_{s\alpha i}}{dt} = \frac{1}{L_s'}\frac{d\Psi_{s\alpha i}}{dt} - \frac{k_r}{L_s'}\frac{d\Psi_{r\alpha i}}{dt}, \; \frac{di_{s\beta i}}{dt} = \frac{1}{L_s'}\frac{d\Psi_{s\beta i}}{dt} - \frac{k_r}{L_s'}\frac{d\Psi_{r\beta i}}{dt},$$

где i – номер двигателя.

Для оценки влияния двигателей, включенных в одну кабельную сеть, друг на друга необходимо реализовать пуск каждого из них в разные моменты времени. Пуск эквивалентен устранению разрыва цепи статора, который реализуется путем введения бесконечного сопротивления в течение заданного промежутка времени. Так как время симуляции при этом значительно увеличивается, то значение сопротивления устанавливается на конечном уровне (10000–100000). Пример реализации разрыва цепи статора АД в среде SCICOS показан на рис. 2, 3.

Подключение нескольких двигателей к одному кабелю в среде SCICOS может быть реализовано при помощи объединения нескольких суперблоков «MOTOR» и суперблока «CABEL», структурная схема которого показана на рис. 4. В результате этого объединения может быть составлена структурная схема, представленная на рис. 5. Модель не учитывает ограниченность мощности ис-

точника питания и еще один контур обмена энергией между двигателями – механическую подсистему.



Здесь реализуется разрыв цепи статора

Рисунок 1

Многодвигательный электропривод обладает рядом преимуществ в сравнении с однодвигательным электроприводом такой же мощности:

- меньший момент инерции;
- равномерное распределение нагрузки между узлами трансмиссии;
- широкие возможности в формировании механических характеристик электропривода;
- увеличение диапазона мощности электропривода при том же классе двигателя по напряжению.

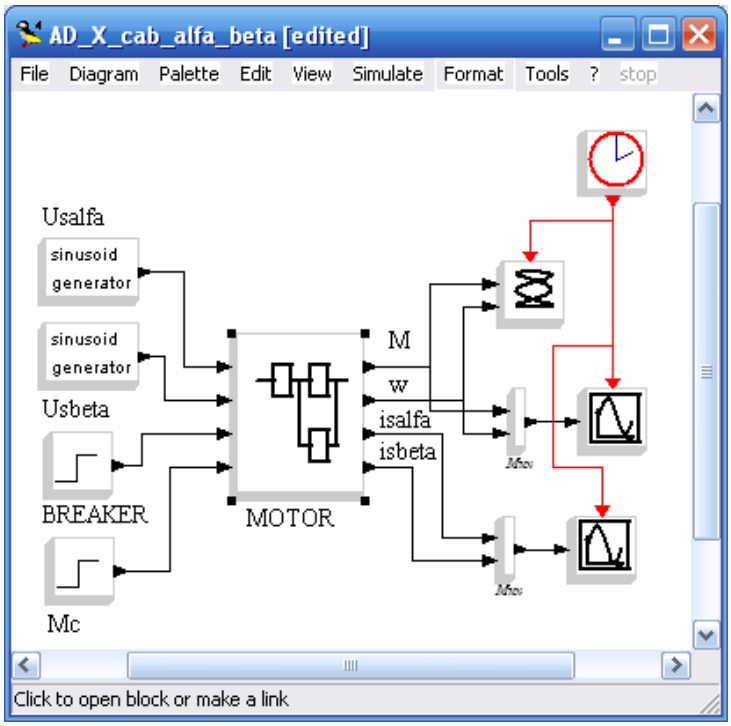


Рисунок 13. Структурная схема модели АД с возможностью реализации пуска и отключения в заданные моменты времени

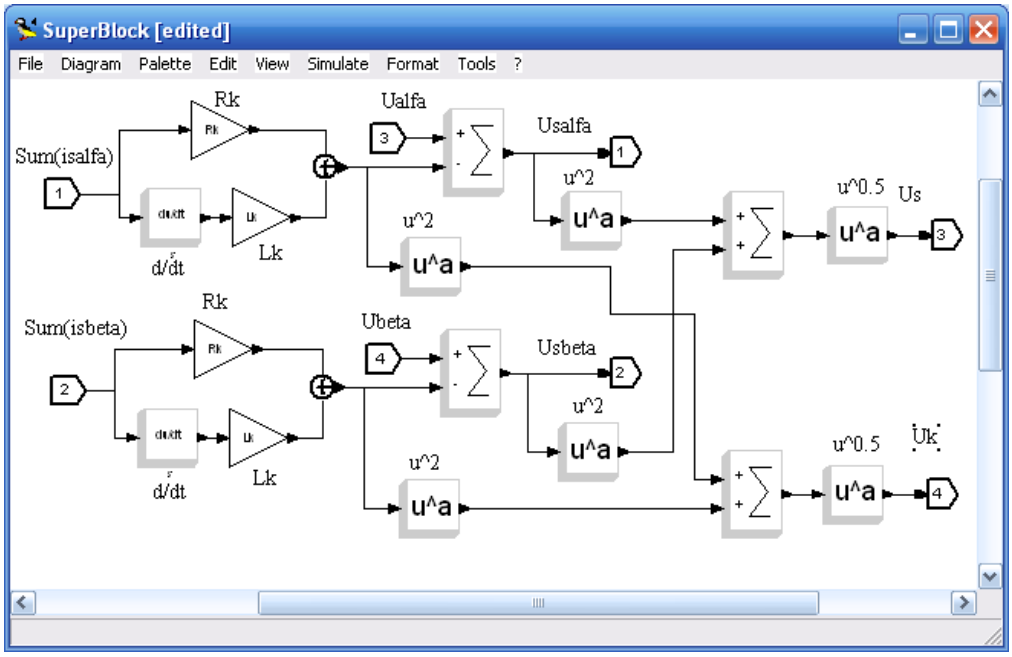


Рисунок 14. Структурная схема суперблока «CABEL»

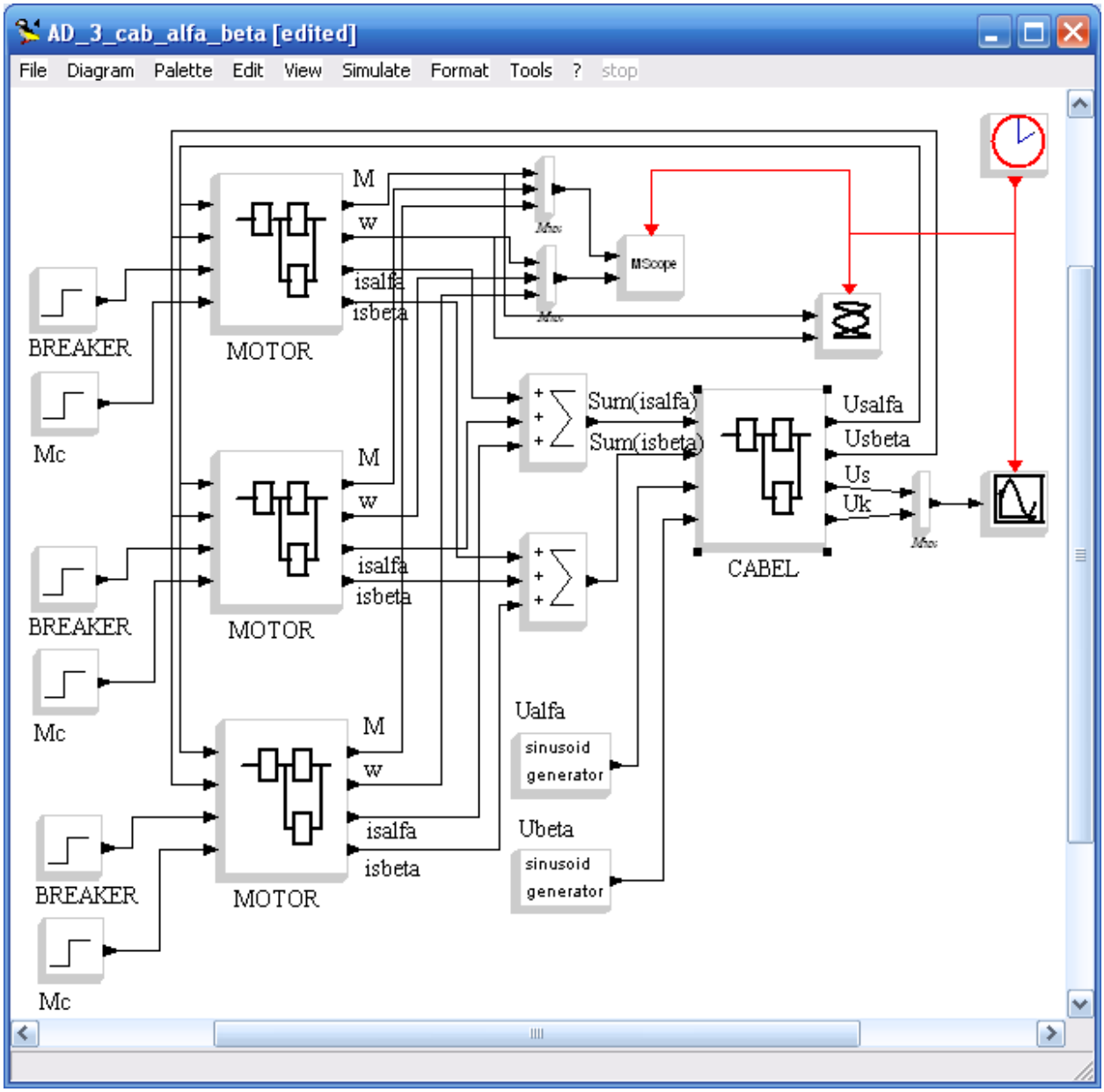


Рисунок 15. Модель SCICOS многодвигательного асинхронного электропривода с общим кабелем в статорной цепи

Основные блоки SCICOS приведены в табл. 1.

Таблица 1

Блоки SCICOS

№	Наименование	Изображение	Функция
Раздел палитры «linear»			
1	Сумматор (SUMMATION)		Суммирование, вычитание
2	Сумматор (SUM_f)		Суммирование
3	Усилитель (GAINBLK)		Умножение сигнала на постоянный коэффициент

№	Наименование	Изображение	Функция
4	Интегратор (INTEGRAL_m)		Интегрирование по времени входного сигнала
5	Передаточная функция (CLR)	num(s) den(s)	Решение линейного диф. уравнения, выраженного передаточной функцией
Раздел палитры «non-linear»			
6	Перемножитель (PRODUCT)		Перемножение, деление входных величин
7	Перемножитель (PROD_f)		Перемножение входных величин
8	Математическое выражение (EXPRESSION)	Mathematical Expression	Вычисление произвольного математического выражения от нескольких переменных
Раздел палитры «sources»			
9	Постоянная (CONST_m)	1	Постоянный сигнал
10	Ступенчатая функция (STEP_FUNCTION)		Формирование ступенчатого сигнала
11	Генератор синусоиды (GENSIN_f)	sinusoid generator	Формирование синусоидального сигнала
12	Время (TIME_f)		Сигнал на выходе является временем симуляции
13	Синхронизирующие часы (CLOCK_c)		Синхронизация графиков, задание частоты выборки
Раздел палитры «sinks»			
14	Одномерный график (CSCOPE)		Построение временных зависимостей в одном поле
15	Двумерный график (CSCOPEXY)		Построение графиков двух переменных в одном поле
16	Несколько графиков на одной форме (CMSCOPE)	MScope	Построение временных зависимостей на одной форме в разных полях
Раздел палитры «branching»			
17	Мультиплексор (MUX)		Объединяет несколько скалярных величин в одну – векторную
18	Демультиплексор (DEMUX)		Разделяет векторную величину на составляющие

№	Наименование	Изображение	Функция
19	Переключатель (SWITCH2_s)		Передает сигнал на выход с одного из нескольких входов в зависимости от управляющего сигнала

3. НАСТРОЙКА БЛОКОВ SCICOS

Сумматор (SUMMATION)

1. Тип данных (Datatype):

- –1 = inherit (тип данных наследуется от входящих значений);
- 1 = real double (число с плавающей запятой двойной точности);
- 2 = complex (комплексное число);
- 3, 4 .. n = int32, int16, int($2^{(8-n)}$) – целое число с разрядностью 32, 16, $2^{(8-n)}$ – бит.

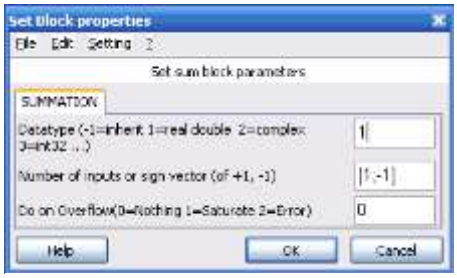


Рисунок 16. Окно настроек блока «SUMMATION»

2. Число входов или вектор знаков (Number of inputs or sign vector). Например, [1;–1;1] означает три входа: первый и третий – положительные, второй – отрицательный.

3. Реакция на переполнение (Do on overflow):

- 0 = Nothing (не реагировать на переполнение);
- 1 = Saturate (ограничивать значение на выходе при переполнении);
- 2 = Error (вызвать сообщение об ошибке).

Сумматор SUM_f

Блок не имеет окна настроек. Выполняет только суммирование сигналов (не более трех).

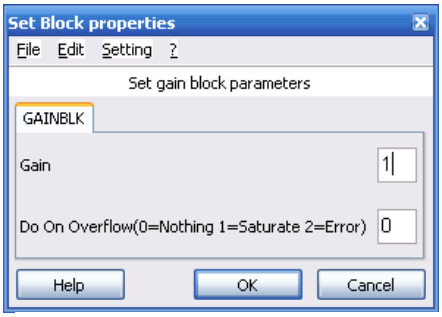


Рисунок 17. Окно настроек блока «GAINBLK»

Усилитель (GAINBLK)

1. Коэффициент усиления (Gain). Число, на которое производится умножение входного сигнала (рис. 7).

2. Реакция на переполнение (Do on overflow).

Интегратор (INTEGRAL_m)

Выполняет интегрирование входного сигнала по методу, задаваемому в настройках симуляции (Simulate->Setup->Solver).

1) Начальное условие (Initial Condition) – значение на выходе интегратора в начале симуляции.

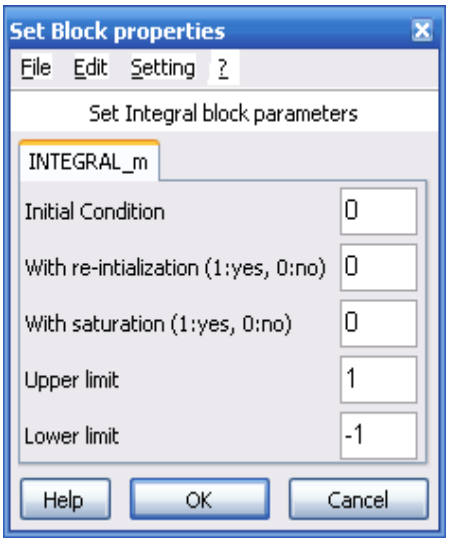


Рисунок 18. Окно настроек блока «INTEGRAL_m»

2) Возврат к начальным условиям (With re-initialization):

- 1 – добавить возможность возврата к начальным условиям;
- 0 – не добавлять эту возможность.

3) Ограничение выходного значения (With Saturation):

- 1 – включить ограничение;
- 0 – не включать ограничение.

4) Верхний предел (Upper limit): максимальное выходное значение (работает, если настройка 3 установлена на уровне 1).

5) Нижний предел (Lower limit): минимальное выходное значение (работает, если настройка 3 установлена на уровне 1).

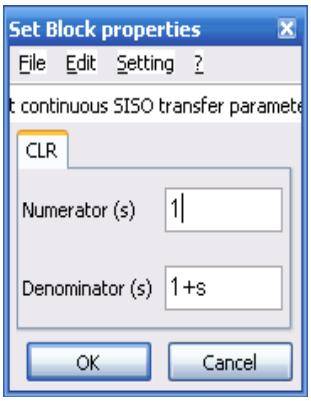


Рисунок 19. Окно настроек блока CLR

Передаточная функция (CLR)

Блок применяется для решения дифференциальных уравнений, выраженных передаточной функцией.

1. Числитель (Numerator (s)).
2. Знаменатель (Denominator (s)).

Перемножитель (PRODUCT)

Блок используется для перемножения или деления нескольких входных сигналов. Блок имеет одну настройку – число входов или вектор знаков (Number inputs or sign vector). Например, настройка [1;1;–1] означает, что блок имеет три входа: первый и второй сигналы перемножаются, а на третий сигнал производится деление.

Перемножитель (PROD_f)

Блок используется для перемножения двух сигналов. Не имеет настроек.

Математическое выражение (EXPRESSION)

Блок позволяет реализовать сложное математическое выражение, содержащее несколько переменных (входных сигналов).

1. Число входов (Number of inputs).

2. Выражение SCICOSLab (Scilab expression). Например, (u1>0)*sin(u2)^2 означает следующее математическое выражение:

$$y = \begin{cases} sin\left(x_2\right)^2, \; x_1 > 0, \\ 0, \; x_1 \le 0. \end{cases}$$

Постоянная (CONST_m)

Блок имеет один настроечный параметр – значение постоянной (Const).

Ступенчатая функция (STEP_FUNCTION)

Блок реализует ступенчатое изменение сигнала.

1. Время изменения (Step time). Значение времени симуляции, при котором происходит ступенчатое изменение сигнала на выходе блока.

2. Начальное значение (Initial value). Значение на выходе блока до момента времени Step time.

3. Конечное значение (Final value). Значение на выходе блока после момента времени Step time.

Генератор синусоиды (GENSIN_f)

Блок генерирует синусоидальный сигнал заданной амплитуды и частоты.

1. Амплитуда (Magnitude).

2. Круговая частота (Frequency) в рад/с.

3. Фазовый сдвиг синусоиды (Phase) в рад.

Время (TIME_f)

Генератор сигнала, значение которого равно текущему времени симуляции. Не имеет окна настроек.

Синхронизирующие часы (CLOCK_c)

Блок используется для синхронизации нескольких блоков, имеющих синхронизирующий вход (изображается красным цветом). У некоторых блоков отсутствует синхронизирующий вход по умолчанию. Для его активации необходимо установить значение 0 напротив свойства «Accept inherited events».

Параметры блока CLOCK_c:

1. Период (Period). Задает период синхронизирующих импульсов.

2. Начальное время (Init time). Задает время, с которого начинают работать часы.

Одномерный график (CSCOPE)

Блок выполняет вывод временных зависимостей переменных. Существует несколько способов вывода графиков: несколько графиков на одном поле, один график. В первом случае необходимо использовать блок «MUX», объединяющий несколько проводов.

1. Вектор цвета (Color or mark vector). Вектор (не более 8 элементов) задает цвета графиков.

2. $Y_{\min}$ – минимальное значение переменной на графике.

3. $Y_{\max}$ – максимальное значение переменной на графике.

4. Период обновления графика (Refresh period). Промежуток времени, отображаемый на графике. Например, если время симуляции установлено на уровне 2 с, а период обновления 1.5 с, то на графике будет отображен промежуток времени от 1 до 2 с, а сам график будет прерываться в 1.5 с.

5. Включение входа синхронизации (Accept inherited events):

- 1 – отключение входа синхронизации;
- 0 – включение входа синхронизации.

Двумерный график (CSCOPEXY)

Блок строит график двух переменных. Например, блок позволяет построить динамическую механическую характеристику асинхронного электродвигателя ($M = f(\omega)$).

1. Число кривых (Number of curves). Параметр задает количество кривых, выводимых на одном поле.

2. Цвет графика (Color or mark). Параметр задает номер цвета.

3. Толщина линии (Line or mark size).

4. $X_{\min}$ – минимальное значение переменной по оси абсцисс.

5. $X_{\max}$ – макисмальное значение переменной по оси абсцисс.

6. $Y_{\min}$ – минимальное значение переменной по оси ординат.

7. $Y_{\max}$ – максимальное значение переменной по оси ординат.

Несколько графиков на одной форме (CMSCOPE)

Блок позволяет построить несколько временных зависимостей на одной форме в разных полях, а, следовательно, в разных масштабах.

1. Размер входных портов (Input ports sizes). Параметр является вектором, размерность которого определяет число входных портов, а значение элемента вектора – размерность каждого порта.

2. Цвета графиков (Drawing color).

3. Y_{min} – минимальное значение по оси ординат.

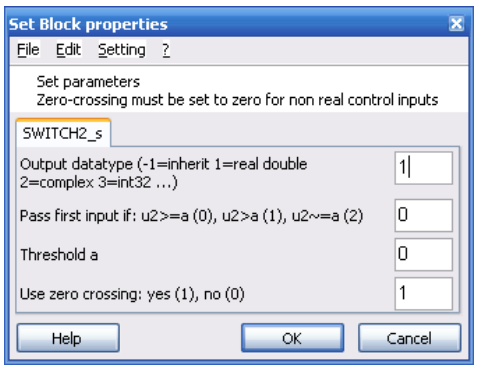


Рисунок 20. Окно настроек блока «SWITCH2_s»

4. Y_{max} – максимальное значение по оси ординат.

5. Период обновления графика (Refresh period). Промежуток времени, отображаемый на графике.

6. Включение входа синхронизации (Accept inherited events):

- 1 – отключение входа синхронизации;
- 0 – включение входа синхронизации.

Переключатель (SWITCH2_s)

Блок выполняет соединение первого или третьего входов с выходом блока в зависимости от сигнала на втором входе (рис. 10).

1. Тип данных на выходе блока (Output datatype).

2. Условие соединения первого входа с выходом (Pass first input if):

- 0 – соединяет, если значение на втором входе больше или равно параметру a;
- 1 – соединяет, если значение на втором входе больше параметра a;
- 2 – соединяет, если значение на втором входе не равно параметру a.

3. Порог срабатывания (Threshold a).

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Преподаватель назначает студенту тип двигателя из табл. 2 и тип кабеля из табл. 3, а также режим работы. Студент должен выполнить лабораторную работу и составить отчет. Отчет выполняется на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, кегль –14, междустрочный интервал – 1,5.

При выполнении лабораторной работы студент должен:

1. Сделать краткий конспект по теме лабораторной работы (не более 2 стр.) и повторить режимы работы асинхронных электродвигателей.

2. Составить структурную схему модели многодвигательного асинхронного электропривода с кабелем в статорной цепи и повторить теоретический материал по данной теме. Занести структурную схему и описание к ней в отчет по лабораторной работе (не менее 2 стр.).

3. Составить структурную схему модели многодвигательного электропривода в среде SCICOS пакета SCICOSLab. Занести структурную схему SCICOS и описание модели электропривода в отчет по лабораторной работе (3 стр.).

4. Провести вычислительный эксперимент с целью изучения процессов обмена энергией между двигателями, включенными параллельно в одну питающую сеть.

Таблица 2

Параметры асинхронных электродвигателей

	ДКВ45	**ДКВ250КМ**	**ДКВ315L4**	**ДКВ315L4/12**	**ДКВ355L4/12**	**АВР280L4**	**ДКВ355LB4**
Рн, кВт	45	200	200	160/55	200/65	160	315
Uн, В	1140	1140	1140	1140	1140	1140	1140
Iн, А	29,8	121	125	110/68	127/89	102,9	186
Rs, Ом	0,82	0,087	0,071	0,18/0,64	0,089/0,31	0,072	0,054
Xs, Ом	1,96	0,448	0,423	0,478/1,12	0,323/0,775	0,405	0,183
Rr’, Ом	0,68	0,060	0,111	0,034/0,15	0,041/0,189	0,091	0,047
Xr’, Ом	3,14	0,398	0,684	0,453/2,04	0,372/1,745	0,682	0,287
Xm, Ом	50,6	15,0	15,1	10,2/9,85	11,0/7,622	14,6	10,8
Ki	5,3	7,9	6,2	7,5/3,8	8,2/3,47	8,0	10,0
Км	2,15	3,5	2,5	3,4/2,5	3,94/2,87	3,2	3,9
Кп	2,1	1,5	2,5	1,8/1,9	2,6/2,72	3,3	4,0

	ДКВ45	ДКВ250КМ	ДКВ315L4	ДКВ315L4/12	ДКВ355L4/12	АВР280L4	ДКВ355LВ4
cos(φ)	0,846	0,88	0,86	0,8/0,5	0,85/0,45	0,833	0,9
КПД	90,0	94,0	93,7	92,5/81,6	93,0/81,9	94,2	94,6
I0, А	11,3	42,6	42,5	62,0/60,0	58,3/78,6	44,0	60,0
J, кг·м^2	0,31	2,1	2,88	2,88	4,69	2,42	4,69

Студенты должны произвести запуск двигателей в различные моменты времени при различной длине кабеля (100, 500, 1000 м). Установить наихудшие варианты пуска многодвигательного электропривода. Предложить свои решения проблемы группового пуска многодвигательного электропривода. Пояснения, графики и выводы занести в отчет по лабораторной работе (не менее 6 стр.).

Таблица 3

Параметры кабелей

Сечение жилы, мм^2	Погонное сопротивление, Ом/км		
	Активное бронированного и гибкого кабелей при 20 °С	Индуктивное бронированного кабеля на напряжение до 1000 В	Индуктивное гибкого кабеля на напряжение до 1000 В
35	0,52/0,539	0,064	0,084
50	0,37/0,394	0,063	0,081
70	0,26/0,281	0,061	0,079
95	0,194/0,202	0,060	0,078
120	0,153/0,163	0,060	0,076

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для электротехн. и энергет. специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ (АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ) В СРЕДЕ LAZARUS

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: изучение динамических и статических характеристик асинхронного электродвигателя при различных режимах работы в среде разработки приложений.

Задачи работы

1. Получить навыки моделирования электромеханических систем при помощи средств вычислительной техники.
2. Изучить основные режимы работы асинхронных электродвигателей.
3. Научиться анализировать влияние различных параметров на характеристики одиночного асинхронного электродвигателя в различных режимах работы с целью их улучшения.
4. Изучить средства решения электротехнической задачи в средах разработки приложений.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронный электродвигатель (АД) является наиболее распространенным электромеханическим преобразователем, используемым в промышленности. Это обусловлено следующими достоинствами: низкая стоимость; небольшие затраты на обслуживание; высокая надежность; малая инерционность ротора. К недостаткам АД можно отнести: сложное описание электромеханических процессов и, как следствие, высокую сложность синтеза и расчета управляющих устройств; асинхронный электродвигатель может работать только в режиме потребления реактивной мощности; при работе с малой нагрузкой КПД и коэффициент мощности АД значительно уменьшаются; высокая сложность идентификации параметров модели двигателя, особенно, с короткозамкнутым ротором.

Большинство асинхронных электродвигателей являются трехфазными, для описания которых необходимо использовать систему

из 8 нелинейных дифференциальных уравнений. Долгое время не удавалось синтезировать управляющие устройства таким сложным объектом, пока не было введено понятие обобщенной электрической машины (ОЭМ). ОЭМ представляет собой идеализированную электрическую машину, имеющую по две обмотки на статоре и роторе, сдвинутые друг относительно друга на 90 электрических градусов. При таком расположении обмоток количество переменных и уравнений, описывающих электродвигатель, уменьшается, но сохраняется основа электромеханического преобразования энергии -вращающееся магнитное поле. Решение системы уравнений ОЭМ возможно только численными методами.

Модель обобщенной электрической машины, имеющей трехфазную обмотку на статоре и на роторе можно представить следующей системой уравнений

$$\frac{d\Psi_{su}}{dt} = U_{su} - R_s K_1 \Psi_{su} + R_s K_2 \Psi_{ru} + \omega_k \frac{(\Psi_{sv} - \Psi_{sw})}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - R_s K_1 \Psi_{sv} + R_s K_2 \Psi_{rv} + \omega_k \frac{(\Psi_{sw} - \Psi_{su})}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{sw}}{dt} = U_{sw} - R_s K_1 \Psi_{sw} + R_s K_2 \Psi_{rw} + \omega_k \frac{(\Psi_{su} - \Psi_{sv})}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{ru}}{dt} = U_{ru} - R_r K_3 \Psi_{ru} + R_r K_2 \Psi_{su} + (\omega_k - p\omega)\frac{(\Psi_{rv} - \Psi_{rw})}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{rv}}{dt} = U_{rv} - R_r K_3 \Psi_{rv} + R_r K_2 \Psi_{sv} + (\omega_k - p\omega)\frac{(\Psi_{rw} - \Psi_{ru})}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\Psi_{rw}}{dt} = U_{rw} - R_r K_3 \Psi_{rw} + R_r K_2 \Psi_{sw} + (\omega_k - p\omega)\frac{(\Psi_{ru} - \Psi_{rv})}{\sqrt{3}},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_C),$$

$$M = C_3\left[(\Psi_{su}\Psi_{rw} + \Psi_{sv}\Psi_{ru} + \Psi_{sw}\Psi_{rv}) - (\Psi_{su}\Psi_{rv} + \Psi_{sv}\Psi_{rw} + \Psi_{sw}\Psi_{ru})\right],$$

где $U_{su,v,w}$, $U_{ru,v,w}$ – напряжения, подаваемые на фазы статора и ротора электродвигателя; $\Psi_{su,v,w}$, $\Psi_{ru,v,w}$ – потокосцепления обмоток статора и ротора по осям системы координат u–v–w, вращающейся с произвольной частотой ω_k; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; L_{sl}, L_{rl} – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; L_m – индуктивность взаимной индукции; p – число пар полюсов; $K_1 = \frac{(2L_{rl} + 3L_m)}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m(L_{sl} + L_{rl})}$, $K_2 = \frac{3L_m}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m(L_{sl} + L_{rl})}$, $K_3 = \frac{(2L_{sl} + 3L_m)}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m(L_{sl} + L_{rl})}$, $C_3 = \sqrt{3}p\frac{L_m}{2L_{sl}L_{rl} + 3L_m(L_{sl} + L_{rl})}$; J – момент инерции;

ω – круговая частота вращения ротора; M_c – момент сопротивления нагрузки.

Более простая модель АД получается, если перейти из трехфазной системы координат в двухфазную

$$\begin{cases} \dfrac{d\Psi_{su}}{dt} = U_{su} - R_s\left(\dfrac{\Psi_{su}}{L_s'} - \dfrac{k_r}{L_s'}\Psi_{ru}\right) + \omega_0\Psi_{sv}, \\ \dfrac{d\Psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - R_s\left(\dfrac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \dfrac{k_r}{L_s'}\Psi_{rv}\right) - \omega_0\Psi_{su}, \\ \dfrac{d\Psi_{ru}}{dt} = U_{ru} - R_r\left(\dfrac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \dfrac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right) + (\omega_0 - p\omega)\Psi_{rv}, \\ \dfrac{d\Psi_{rv}}{dt} = U_{rv} - R_r\left(\dfrac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \dfrac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right) - (\omega_0 - p\omega)\Psi_{ru}, \\ M = \dfrac{3}{2}p\dfrac{k_r}{L_s'}(\Psi_{sv}\Psi_{ru} - \Psi_{su}\Psi_{rv}), \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{J}(M - M_c), \end{cases}$$

где U_{su}, U_{sv}, U_{ru}, U_{rv} – составляющие векторов напряжений, подводимых к статору и ротору, в осях системы координат u-v, вращающейся с произвольной частотой ω_0; Ψ_{su}, Ψ_{sv}, Ψ_{ru}, Ψ_{rv} – составляющие векторов потокосцеплений статора и ротора в осях системы координат u-v; ω – круговая частота вращения ротора двигателя; p – число пар полюсов статора; R_s, R_r, L_s', L_r', k_s, k_r – активные сопротивления статора, ротора, переходные индуктивности статора и ротора, коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора соответственно.

Обе модели АД являются идеализированными, но первая модель позволяет без дополнительных преобразований моделировать режимы, возникающие при работе трехфазной машины (например, изменение чередования фаз, изменение числа пар полюсов, неполнофазные режимы, разрывы и короткие замыкания отдельных фаз и пр.), а вторая – позволяет упростить процедуру синтеза управляющих устройств.

Основными допущениями, принимаемыми в теории ОЭМ, являются:

- МДС обмоток синусоидальны;
- воздушный зазор равномерен;
- магнитная цепь машины не насыщается.

В работах многих авторов можно встретить различные дополнения к представленным моделям, касающиеся приближения к реальной машине, но при динамической и предварительной идентификации, а также при синтезе управляющих устройств подобные дополнения не используются.

Решение дифференциальных уравнений при помощи вычислительной техники целесообразно выполнять численными методами. Существует множество численных методов решения дифференциальных уравнений. Рассмотрим основные два: метод Эйлера, метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

Метод Эйлера относится к методам первого порядка, является наиболее простым, но наименее точным.

Для решения дифференциального уравнения или системы уравнений методом Эйлера сначала необходимо представить уравнение или систему уравнений в форме Коши

$$\frac{dy}{dx} = f\left(y, x, U\right),$$

где x – переменная (например, время), y – функция, U – управляющее воздействие или любая независимая переменная, f – правая часть дифференциального уравнения или системы дифференциальных уравнений.

Затем решение выполняется по следующей формуле

$$y_i = y_{i-1} + \left(x_i - x_{i-1}\right) f\left(x_{i-1}, y_{i-1}, U_{i-1}\right),$$

где $i = 1, 2, 3 \ldots n$ – шаг интегрирования; x_i, x_{i-1} – значение переменной на следующем и на предыдущем шагах; y_i, y_{i-1} – значение функции на следующем и на предыдущем шагах; U_{i-1} – значение независимой переменной на предыдущем шаге интегрирования; $f(x_{i-1}, y_{i-1}, U_{i-1})$ – значение правой части дифференциального уравнения на предыдущем шаге.

Для повышения точности решения дифференциальных уравнений методом Эйлера применяют коррекцию

$$\hat{y}_i = y_{i-1} + \left(x_i - x_{i-1}\right) f\left(x_{i-1}, y_{i-1}, U_{i-1}\right),$$

$$y_i = y_{i-1} + \frac{\left(x_i - x_{i-1}\right)}{2}\left(f\left(x_{i-1}, y_{i-1}, U_{i-1}\right) + f\left(x_i, \hat{y}_i, U_i\right)\right),$$

где $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение функции, yi – уточненное значение функции.

Рассмотрим следующий пример: $T_1^2 \frac{dy}{dt}^2 + T_2 \frac{dy}{dt} + y = kU$.

Представим уравнение в виде системы уравнений второго порядка в форме Коши

$$\frac{dy}{dt} = z,$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{k}{T_1^2}U - \frac{T_2}{T_1^2}z - \frac{1}{T_1^2}y,$$

В качестве переменной в данном уравнении выступает (время). Функция, значение которой необходимо определить в заданное время – y; z – вспомогательная функция, которая представляет собой производную функции y. Исходя из этого, решение дифференциального уравнения второго порядка сводится к решению системы уравнений второго порядка в форме Коши методом Эйлера по следующим выражениям

$$z_i = z_{i-1} + h\left(\frac{k}{T_1^2}U_{i-1} - \frac{T_2}{T_1^2}z_{i-1} - \frac{1}{T_1^2}y_{i-1}\right),$$

$$y_i = y_{i-1} + hz_{i-1},$$

где $h = t_i - t_{i-1}$ – шаг интегрирования (задается исходя из заданной точности).

Выражения для метода Эйлера с коррекцией получаются аналогичным образом

$$\hat{z}_i = z_{i-1} + h\left(\frac{k}{T_1^2}U_{i-1} - \frac{T_2}{T_1^2}z_{i-1} - \frac{1}{T_1^2}y_{i-1}\right),$$

$$\hat{y}_i = y_{i-1} + hz_{i-1},$$

$$z_i = z_{i-1} + \frac{h}{2}\left(\left(\frac{k}{T_1^2}U_{i-1} - \frac{T_2}{T_1^2}z_{i-1} - \frac{1}{T_1^2}y_{i-1}\right) + \left(\frac{k}{T_1^2}U_i - \frac{T_2}{T_1^2}\hat{z}_i - \frac{1}{T_1^2}\hat{y}_i\right)\right),$$

$$y_i = y_{i-1} + \frac{h}{2}\left(z_{i-1} + \hat{z}_i\right),$$

где $\hat{z}_i$, $\hat{y}_i$ – прогнозируемые значения функций.

Существует целое семейство методов Рунге-Кутты, отличающихся порядком (числом узлов интегрирования на шаге). Приемлемыми показателями при решении электротехнических задач обладают методы Рунге-Кутты четвертого порядка. Решение дифференциального уравнения по методу Рунге-Кутты четвертого порядка выполняется в соответствии с выражениями

$$k_1 = f\left(x_{i-1}, y_{i-1}\right),$$
$$k_2 = f\left(x_{i-1} + \frac{h}{2}, y_{i-1} + \frac{h}{2}k_1\right),$$
$$k_3 = f\left(x_{i-1} + \frac{h}{2}, y_{i-1} + \frac{h}{2}k_2\right),$$
$$k_4 = f\left(x_{i-1} + h, y_{i-1} + hk_3\right),$$
$$y_i = y_{i-1} + \frac{h}{6}\left(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4\right),$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – корректировочные коэффициенты; h – шаг интегрирования.

Метод Рунге-Кутты четвертого порядка имеет высокую точность, но при значительном времени интегрирования и резкоизменяющихся управляющих воздействиях будет давать ошибку. Накопление ошибки можно контролировать, если изменять шаг интегрирования, поскольку справедливо утверждение, что с уменьшением шага интегрирования точность увеличивается. Для оценки точности интегрирования производится первичный расчет с первоначальным значением шага (y^*) и вторичный расчет на том же интервале с уменьшенным значением шага (y). По полученным значениям вычисляют относительную погрешность расчетов ($e = |y^*–y|/|y|$) и сравнивают ее с заданным значением ($e_з$). Если значение ошибки превышает заданное, то шаг интегрирования уменьшают и процедуру повторяют снова.

Рассмотрим алгоритм решения дифференциального уравнения методом Эйлера с коррекцией и с контролем погрешности на шаге интегрирования (рис. 1). Вначале выполняется инициализация вспомогательных переменных: $x0$, $y0$ – начальные условия, xk – конец интервала интегрирования, h – шаг интегрирования, eps – заданная относительная точность решения дифференциального уравнения. Затем следует цикл с условием выхода по достижению заданного значения xk. В теле цикла выполняется два решения уравнения на одном интервале: вначале с целым шагом, а затем с половинным. На основе результатов решения уравнения вычисляется относительная погрешность расчетов. Далее следует условие перехода на следующий шаг x: если достигнута заданная точность, то шагу интегрирования возвращаем первоначальное значение ($h = hz$) и выполняем инкремент переменной x, в противном случае, уменьшаем шаг интегрирования в 2 раза и повторяем расчет на том же

шаге. Решение дифференциального уравнения методом Эйлера удобно представить в виде отдельной процедуры.

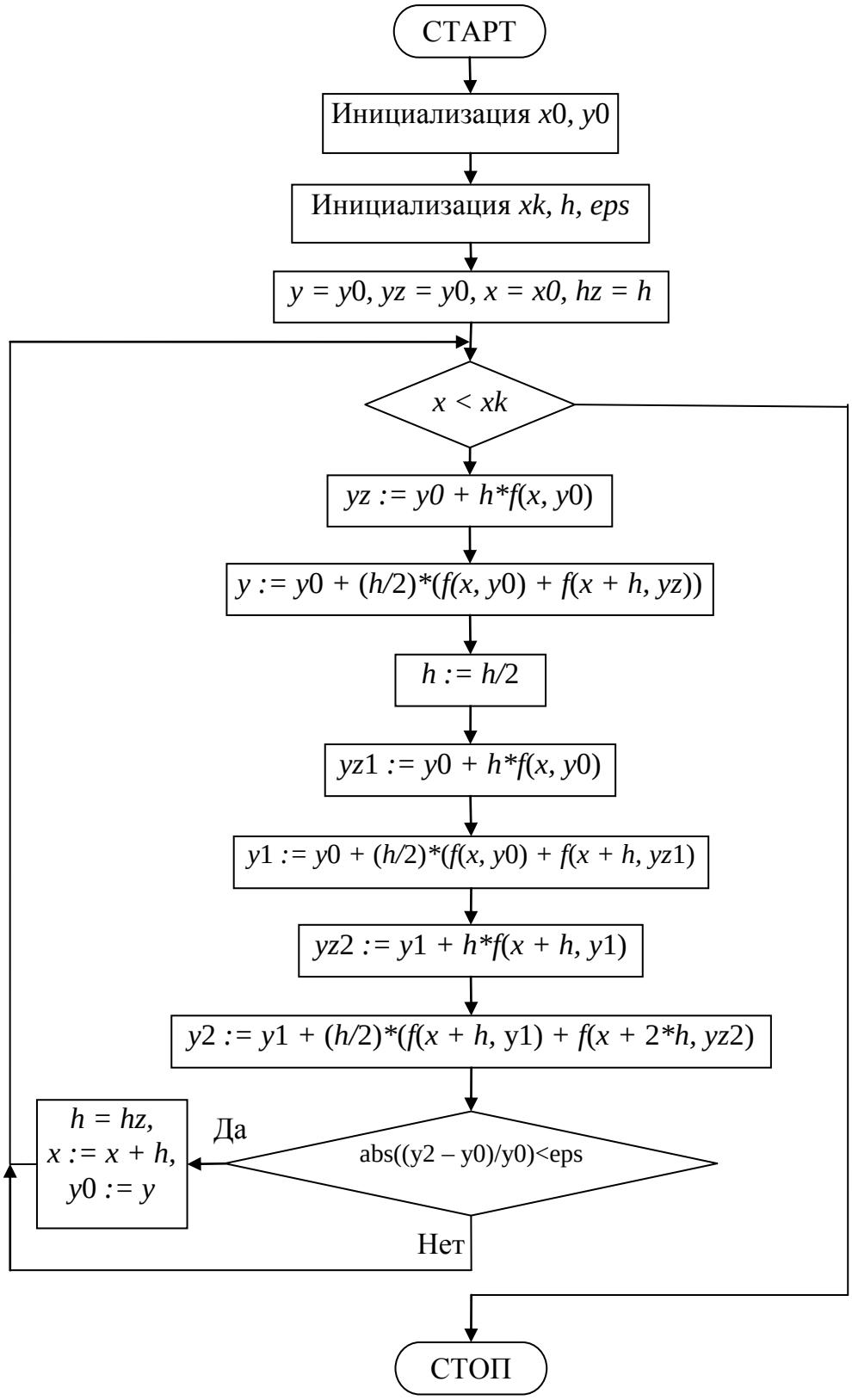


Рисунок 1. Алгоритм решения дифференциального уравнения методом Эйлера

3. НАЧАЛО РАБОТЫ В СРЕДЕ LAZARUS

При запуске приложения (файл lazarus.exe) открывается окно программы с предыдущим проектом. Для его закрытия используем вкладку «Проект», где выбираем команду «Закрыть проект». После закрытия проекта появляется окно выбора дальнейших действий «Project wizard», в котором нажимаем кнопку «Новый проект». Затем выбираем тип проекта из списка – «Приложение». Подтверждаем выбор нажатием кнопки «ok». В результате этих действий на экране появляется форма «Form1» и окно с исходным кодом приложения, где прописано создание формы «Form1» при запуске создаваемого приложения. Выполним сохранение проекта приложения: во вкладке «Файл» выберем команду «Сохранить как», затем в появившемся окне выберем директорию, куда хотим сохранить файлы проекта. Программа предложит сохранить два файла: файл проекта с расширением *.lpi и файл исходного кода на языке программирования Pascal с расширением *.pas. Для компиляции программы во вкладке «Запуск» выбираем команду «Собрать» (сочетание клавиш Ctrl + F9). Для компиляции и последующего запуска проекта выбираем команду «Запустить» вкладки «Запуск» (клавиша F9).

После сохранения файлов проекта и успешного запуска приложения в режиме отладки создается файл с названием, совпадающим с названием проекта и расширением *.exe. Вы создали приложение, которое не выполняет пока что ничего, кроме визуализации формы приложения. Добавим функциональности приложению: во вкладке «Standard» выберем нажатием объект «TButton» (кнопка), а затем нажмем на поле формы. В этом месте должен появиться объект «Button1», который относится к типу TButton. У любого объекта в среде Lazarus есть свойства (Properties) и события (Events). Свойства – это характеристики объекта, задаваемые значениями различных типов данных (цвет, ширина, высота и т. д.). События – это процедуры, вызываемые при совершении некоторого действия над объектом (нажатие правой кнопкой мыши на объекте, выделение объекта и т. д.). Для изменения свойств объектов и назначения реакций на события на этапе создания приложения необходимо использовать «Инспектор объектов». Изменим свойства объекта Button1, воспользовавшись «Инспектором объектов»:

выделим объект; изменим свойство «Caption», задающее текст кнопки, на текстовое значение «Старт»; изменим шрифт текста кнопки (свойство «Font») на «Courier», высоту шрифта зададим 15. Для назначения реакции на события, необходимо во вкладке «События» инспектора объектов выбрать событие (например, OnClick, OnDblClick, OnCreate и т. д.), затем двойным щелчком мыши по нему провоцируем автоматическое создание процедуры в исходном коде, в теле которой прописываем необходимые действия (например, изменение текста кнопки).

Пример оформления формы показан на рис. 2. Текст программы, соответствующей данной форме представлен ниже.

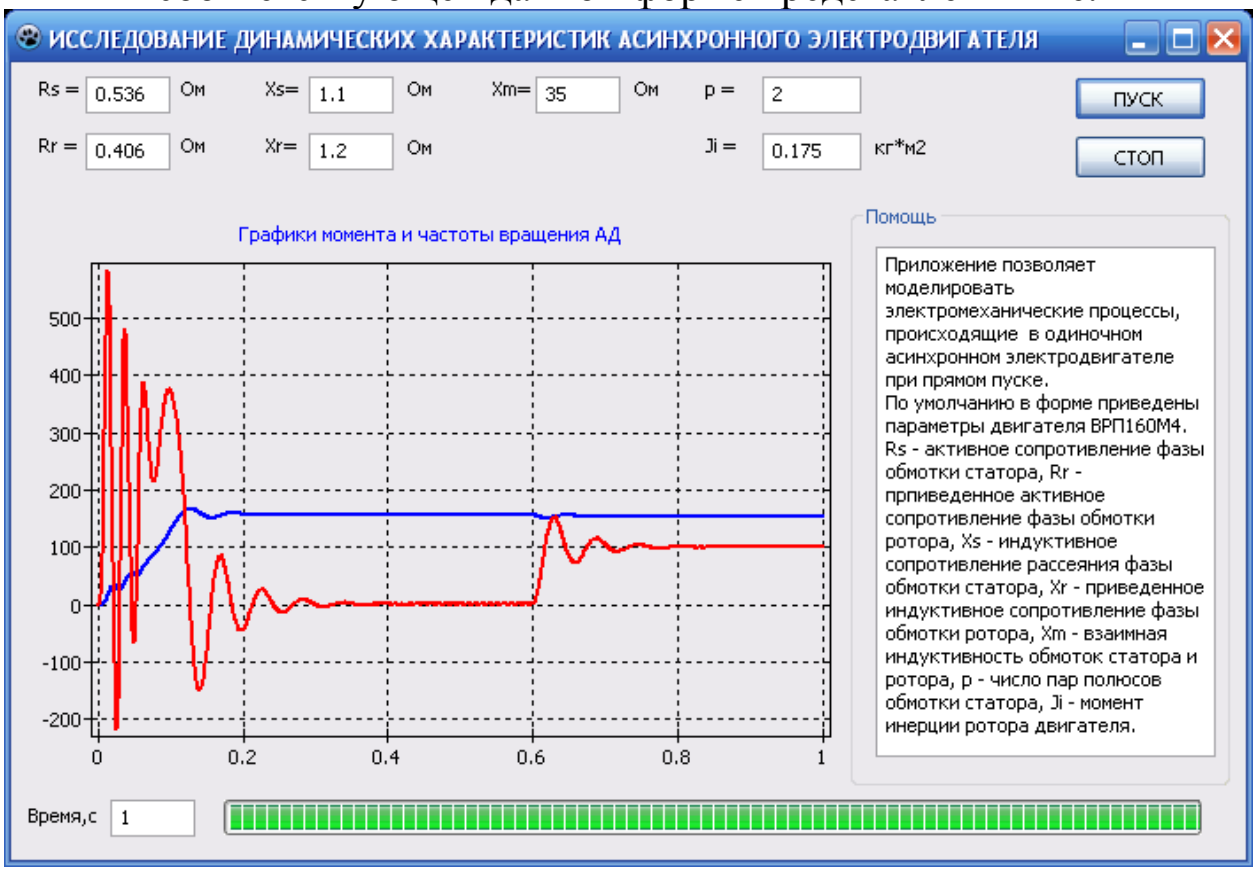


Рисунок 2. Окно приложения, созданного в среде LAZARUS

```
  {Моделирование однодвигательного электропривода
в среде быстрой разработки приложений LAZARUS }
  {==================\\\\\====================}

  unit AD1unit;

  {$mode objfpc}{$H+}

  interface

  uses
    Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls,
Graphics, Dialogs, StdCtrls,
    ComCtrls, TAGraph, TASeries;

  type

    { TForm1 }

    TForm1 = class(TForm)
      Button1: TButton;
      Button2: TButton;
      Chart1: TChart;
      Chart1LineSeries1: TLineSeries;
      Chart1LineSeries2: TLineSeries;
      GroupBox1: TGroupBox;
      Label1: TLabel;
      Label10: TLabel;
      Label11: TLabel;
      Label12: TLabel;
      Label13: TLabel;
      Label14: TLabel;
      Label2: TLabel;
      Label3: TLabel;
      Label4: TLabel;
      Label5: TLabel;
      Label6: TLabel;
      Label7: TLabel;
```

```
      Label8: TLabel;
      Label9: TLabel;
      Memo1: TMemo;
      ProgressBar1: TProgressBar;
      Xkp: TEdit;
      Jid: TEdit;
      Pd: TEdit;
      Xmd: TEdit;
      Xrt: TEdit;
      Xst: TEdit;
      Rrt: TEdit;
      Rst: TEdit;
      procedure Button1Click(Sender: TObject);
      procedure Button2Click(Sender: TObject);
    private
      { private declarations }
    public
      { public declarations }
    end;

  var
    Form1: TForm1;
    Rs,Rr, {активные сопротивления обмоток стато-
ра и ротора}
    Xs,Xr, {индуктивные сопротивления рассеяния
обмоток статора и ротора}
    Xm, {индуктивное сопротивление цепи намагни-
чивания }
    l1,l2, {индуктивности рассеяния обмоток ста-
тора и ротора}
    lm, {индуктивность цепи намагничивания }
    Ji, {момент инерции ротора }
    Lps,Lpr,{переходные индуктивности статора и
ротора }
    Ks,Kr, {коэффициенты электромагнитной связи
статора и ротора}
    p, {число пар полюсов }
    c, {c=3*p*ks/(2*lpr)}
```

```
   Usa,Usb,{составляющие напряжений обмотки ста-
тора по осям координатной системы альфа - бета }
   Isa,Isb,{составляющие токов статора по осям
координатной системы альфа - бета }
   Ira,Irb,{составляющие токов ротора по осям
координатной системы альфа - бета }
   M, { электромагнитный момент }
   Ird,Irq, { составляющие токов статора по осям
координатной системы d-q }
   x0,x0z,xk,x,
   h,hz,eps,
   Wk :real;
   n :Byte;
   y,yz,y0,y0z,f : Array [1..6] of real;
   Working : Boolean = False;      { переменная,
определяющая состояние приложения. По умолчанию
не запущено }
 implementation

 {$R *.lfm}
 {
 процедура вычисления правых частей дифференци-
альных уравнений
 }
 PROCEDURE Uravnenie(x:real);
 BEGIN
 Wk:=0; { Определение скорости вращения коорди-
натной системы}
 { Составляющие напряжений статора}
 Usa:=380.0*sqrt(2.0)*sin((314-Wk)*x);
 Usb:=380.0*sqrt(2.0)*sin((314-Wk)*x-1.57);
 {Составляющие токов статора и ротора}
 Isa:=(y[1]-Kr*y[3])/Lps;            Isb:=(y[2]-
Kr*y[4])/Lps;
 Ira:=(y[3]-Ks*y[1])/Lpr;            Irb:=(y[4]-
Ks*y[2])/Lpr;
 {Преобразование к d-q }
```

```
  Ird:=Ira*cos(y[6])+Irb*sin(y[6]);
Irq:=Irb*cos(y[6])-
  Ira*sin(y[6]);
  {Электромагнитный момент}
  M:=c*(y[3]*y[2]-y[1]*y[4]);
  {Правые части уравнений движения АД}
  f[1] :=Usa-Rs*isa+Wk*Y[2];
  f[2] :=Usb-Rs*isb-Wk*Y[1];
  f[3] :=-Rr*ira+(Wk-p*y[5])*y[4];
  f[4] :=-Rr*irb-(Wk-p*y[5])*y[3];
  if (x < 0.6) then
  f[5] :=(M-0)/Ji
  else
  f[5] :=(M-100)/Ji;
  { y[6] - угол поворота ротора }
  f[6] :=p*y[5];
  END;
  {Процедура, реализующая метод Рунге-Кутта 4-го
порядка}
  PROCEDURE Runge(x0:real);
  VAR
  x:real; i:Byte;
  k1,k2,k3,k4:Array [1..6] Of real;
  BEGIN
  x:=x0;
  FOR i:=1 TO N DO Y[i]:=Y0[i];
  Uravnenie(x);
  FOR i:=1 TO N DO k1[i]:=h*f[i];
  x:=x0+h/2;
  FOR i:=1 TO N DO Y[i]:=Y0[i]+k1[i]/2;
  Uravnenie(x);
  FOR i:=1 TO N DO k2[i]:=h*f[i];
  FOR i:=1 TO N DO Y[i]:=Y0[i]+k2[i]/2;
  Uravnenie(x);
  FOR i:=1 TO N DO k3[i]:=h*f[i];
  x:=x0+h;
  FOR i:=1 TO N DO Y[i]:=Y0[i]+k3[i];
  Uravnenie(x);
```

```
 FOR i:=1 TO N DO k4[i]:=h*f[i];
 FOR i:=1 TO N DO
 Y[i]:=Y0[i]+(k1[i]+2*k2[i]+2*k3[i]+k4[i])/6;
 END;
 {реакция на нажатие кнопки Button1}
 procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
 VAR
 i,j:integer;
 begin
 {количество уравнений}
 N:=6;
 { запустить расчет }
 Working := True;
 { очистить графики }
 Chart1LineSeries1.Clear;
 Chart1LineSeries2.Clear;
 x0:=0; x0z:=x0; { начальное время процесса }
 xk:=StrToFloat(Xkp.text); { конечное время про-
цесса }
 h:=0.001; hz:=h; { начальный шаг интегрирования
}
 eps:=0.0001; { относительная точность }
 {----- определение параметров электродвигателя-
------}
 Rs:=StrToFloat(Rst.text);
 Rr:=StrToFloat(Rrt.text);
 Xs:=StrToFloat(Xst.text);
 Xr:=StrToFloat(Xrt.text);
 Lm:=StrToFloat(Xmd.text)/314;
 p :=StrToFloat(Pd.text);
 l1:=Xs/314; L2:=Xr/314;
 Ji:=StrToFloat(Jid.text);
 {переходные индуктивности и коэффициенты элек-
тромагнитной связи}
 Lps:=l1+l2*lm/(l2+lm); Lpr:=l2+l1*lm/(l1+lm);
 Ks :=lm/(lm+l1); Kr :=lm/(lm+l2);
 c :=3*p*ks/(2*lpr);
```

```
 {== Формирование и запоминание начальных усло-
вий =====}
 FOR i:=1 TO N DO BEGIN
 Y0[i]:=0.0; y0z[i]:=0.0;
 END;
 Y0[5]:=0.001; y0z[5]:=y0[5];
 {Расчет}
 x:=x0;
 {--- цикл с условием выхода – достижение време-
нем заданного значения ---- }
 WHILE (x0<xk) DO BEGIN
 ProgressBar1.Position:=Round(x0/xk*100);
 Application.ProcessMessages;
 { если приложение остановлено, то выйти из цик-
ла }
 if not(Working) then exit;
 Runge(x0);
 FOR i:=1 TO N DO Yz[i]:=Y[i];
 h:=h/2; Runge(x0);
 FOR i:=1 TO N DO Y0[i]:=Y[i];
 x0:=x0+h; Runge(x0);
 j:=0;
 FOR    i:=1    TO    N    DO    IF    Abs(Yz[i]-
Y[i])<eps*Abs(Yz[i]) THEN
 j:=j+1;
 IF j=N THEN BEGIN
 x0:=x0+h; x0z:=x0;
 h:=hz;
 { занести текущие значения момента и частоты
вращения на график }
 Chart1LineSeries1.AddXY(x0,M);
 Chart1LineSeries2.AddXY(x0,y[5]);
 for i:=1 to n do begin
 y0[i]:=y[i]; y0z[i]:=y[i];
 end;
 END
 ELSE begin
 x0:=x0z; x:=x0;
```

```
for i:=1 to n do y0[i]:=y0z[i];
end;
END;
end;
{Реакция на нажатие кнопки «СТОП»}
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
  Working := False;
end;
end.
```

4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Под режимами работы будем понимать специфические условия работы электропривода. Можно выделить следующие основные режимы работы асинхронного электропривода:

- работа вхолостую;
- работа под нагрузкой;
- короткое замыкание одной, двух и трех фаз обмотки статора АД;
- короткое замыкание одной, двух и трех фаз обмотки ротора (для АД с фазным ротором);
- блокирование вала АД (работа на упор);
- опрокидывание;
- изменение чередования фаз;
- разрыв одной, двух и трех фаз АД;
- изменение числа пар полюсов;
- электродинамическое торможение;
- реверс;
- торможение противовключением;
- самозапуск.

Рассмотрим кратко каждый режим работы.

Работа вхолостую

Режим получается при полном отсутствии нагрузки на валу электродвигателя. В реальных условиях не возможен, так как в самом электродвигателе существует трение в подшипниковых уз-

лах и сопротивление вращению, вызванное вентилятором охлаждения. Для режима свойственны следующее недостатки: уменьшение коэффициента мощности двигателя, ненужный расход электроэнергии.

Работа под нагрузкой

Основной режим работы электрических машин. Получается при подаче момента сопротивления на вал двигателя. Для режима свойственно: снижение частоты вращения и увеличение амплитуд токов статора и ротора пропорционально моменту сопротивления, изменение коэффициента мощности в зависимости от нагрузки.

Короткое замыкание фаз обмоток статора или ротора

Для моделирования режимов необходимо использовать трехфазную модель АД. Короткое замыкание фаз моделируется сбросом в 0 соответствующих значений фазных напряжений. Для режима свойственно: при отсутствии активной нагрузки – остановка машины, а при активном моменте сопротивления – движение в направлении действия нагрузки; увеличение амплитуды токов фаз машины до недопустимых значений.

Usu = 0 – однофазное короткое замыкание обмотки статора;

Usu = 0, Usv = 0 – двухфазное короткое замыкание обмотки статора;

Usu = 0, Usv = 0, Usw = 0 – трехфазное короткое замыкание обмотки статора.

Блокирование вала АД

Режим характерен для горных машин. Происходит при столкновении рабочего органа машины с непреодолимым препятствием. Режим приводит к опрокидыванию электродвигателя, так как момент сопротивления превышает критический момент АД. Для режима свойственно: увеличение амплитуды токов двигателя и электромагнитного момента до пусковых значений.

Для моделирования режима необходимо использовать следующее уравнение механического движения

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}\left(M - c\varphi - b\omega\right),$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega,$$

где φ – угол поворота вала АД; c, b – коэффициенты жесткости и внутреннего трения вала АД, ω – круговая частота вращения вала АД; J – момент инерции вала АД.

Опрокидывание

Характеристика АД имеет участок с отрицательным значением жесткости, на котором устойчивая работа не возможна. Для попадания на этот участок характеристики необходимо, чтобы момент сопротивления на валу электродвигателя превысил значение критического электромагнитного момента. Тогда двигатель начинает останавливаться (опрокидывается), что приводит к увеличению амплитуд фазных токов машины и колебаниям электромагнитного момента. Такой режим может возникнуть по разным причинам: стопорение рабочего органа машины, снижение амплитуды питающего напряжения и др.

Моделирование выполняется при помощи увеличения момента сопротивления выше уровня критического момента и при помощи снижения питающего напряжения при номинальной нагрузке на валу.

Изменение чередования фаз

Для анализа процессов в многофазных электрических цепях применяют векторные диаграммы. Если многофазная электрическая цепь симметрична, то векторы токов и напряжений цепи образуют симметричные плоские фигуры с числом вершин, равным числу фаз цепи. Например, при схеме соединения обмотки двигателя «звезда» векторы напряжений изображаются в виде звезды с тремя вершинами. Порядок чередования фаз считается против часовой стрелки. Прямой порядок фаз: А-В-С. Обратный Порядок фаз: А-С-В. Отсюда видно, что для изменения порядка фаз с прямого на обратный необходимо поменять всего две фазы кабеля местами.

Для моделирования режима необходимо использовать трехфазную модель ОЭМ. Вначале выполняется прямой пуск АД, а затем напряжения фаз В и С меняются местами.

Разрыв фаз АД

Режим возникает при повреждении одной, двух или всех фаз. Разрыв всех фаз АД эквивалентен отключению двигателя от сети при помощи коммутационной аппаратуры. Обычно, студенты пытаются реализовать режим при помощи обнуления значений фазных напряжений, но это не верно. Для реализации режима, необходимо увеличить активное сопротивление обмотки статора до большого значения (10000–100000).

Изменение числа пар полюсов

Изменение числа пар полюсов является одним из способов регулирования частоты вращения АД, а также пуска. Реализуется режим при помощи переключения схемы соединения обмотки. Распространение получили схемы «треугольник – двойная звезда», «звезда – двойная звезда». Во всех случаях помимо простого изменения числа p необходимо изменять параметры обмотки статора (см. рис. 3).

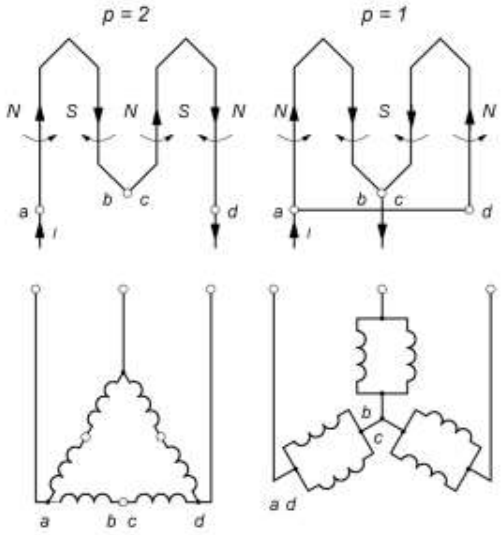


Рисунок 3. Изменение числа пар полюсов

Электродинамическое торможение

Для осуществления режима обмотку статора отключают от сети переменного тока и подключают к сети постоянного тока. При этом значение напряжения сети постоянного тока меньше в несколько раз значения амплитуды напряжения сети переменного тока. Моделирование осуществляется таким образом

$$\omega_k = 0, U_{su} = 50 \div 150, U_{sv} = 0.$$

Реверс

Изменение направления вращения вала АД осуществляется изменением чередования фаз, а также изменением знака частоты питающего напряжения (при использовании преобразователя частоты). В первом случае в цепь статора или ротора вводится добавочное сопротивление с целью ограничения токов обмоток.

Торможение противовключением

Реализуется путем перевода АД в режим «реверс» с введением добавочного сопротивления в цепь статора или ротора, но при до-

стижении частотой вращения вала нулевого значения производится отключение питающего напряжения и блокируется вал механическим тормозом.

Самозапуск

Этот режим возникает, когда происходит внезапное отключение и повторное включение питающего напряжения в течение короткого промежутка времени. Характерным для этого режима является непредсказуемое поведение электродвигателя: либо запуск проходит удачно и двигатель сразу разгоняется до рабочей частоты вращения, либо он останавливается и затем разгоняется до рабочей частоты вращения с большими колебаниями токов и электромагнитного момента. Эти явления связаны с незатухшим полем ротора, которое вращается вмести с ним. Поведение АД в режиме самозапуска определяется соотношением составляющих векторов питающего напряжения и ЭДС, наводимой в обмотке статора ротором. Моделируется аналогично режиму «разрыв фаз».

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Преподаватель назначает студенту тип двигателя из таблицы и режим работы из пункта 4 методических указаний. Студент должен выполнить лабораторную работу и составить отчет. Отчет выполняется на листах формата А4, шрифт – Times New Roman, кегль – 14, междустрочный интервал – 1,5.

При выполнении лабораторной работы студент должен:

1. Сделать краткий конспект по теме лабораторной работы (не более 2 стр.) и повторить режимы работы асинхронных электродвигателей.

2. Составить структурную схему модели асинхронного электропривода. Занести структурную схему и описание к ней в отчет по лабораторной работе (не менее 2 стр.).

3. Создать проект в среде LAZARUS, начиная с создания формы и размещения на ней визуальных компонентов управления. Написать программу на языке Pascal с подробными пояснениями, выполняющую моделирование электромеханических процессов однодвигательного асинхронного электропривода с выводом графиков на форме в визуальном компоненте TChart. Программу и снимок формы представить в отчете (не менее 3 стр.).

4. Провести вычислительный эксперимент с целью изучения характеристик однодвигательного асинхронного электропривода в заданном режиме работы.

В результате проведенного вычислительного эксперимента должны быть сняты временные зависимости частоты вращения ротора и электромагнитного момента АД. Студенты должны проанализировать результаты компьютерной симуляции и сделать выводы о влиянии различных параметров АД и режимов работы на характеристики электропривода. Пояснения, графики и выводы заносятся в отчет по лабораторной работе (не менее 6 стр.).

Параметры асинхронных электродвигателей

Параметры	**ДКВ45**	**ДКВ250КМ**	**ДКВ315L4**	**ДКВ315L4/12**	**ДКВ355L4/12**	**АВР280L4**	**ДКВ355LB4**
Рн, кВт	45	200	200	160/55	200/65	160	315
Uн, В	1140	1140	1140	1140	1140	1140	1140
Iн, А	29,8	121	125	110/68	127/89	102,9	186
Rs, Ом	0,82	0,087	0,071	0,18/0,64	0,089/0,31	0,072	0,054
Xs, Ом	1,96	0,448	0,423	0,478/1,12	0,323/0,775	0,405	0,183
Rr’, Ом	0,68	0,060	0,111	0,034/0,15	0,041/0,189	0,091	0,047
Xr’, Ом	3,14	0,398	0,684	0,453/2,04	0,372/1,745	0,682	0,287
Xm, Ом	50,6	15,0	15,1	10,2/9,85	11,0/7,622	14,6	10,8
Ki	5,3	7,9	6,2	7,5/3,8	8,2/3,47	8,0	10,0
Км	2,15	3,5	2,5	3,4/2,5	3,94/2,87	3,2	3,9
Кп	2,1	1,5	2,5	1,8/1,9	2,6/2,72	3,3	4,0
cos(φ)	0,846	0,88	0,86	0,8/0,5	0,85/0,45	0,833	0,9
КПД	90,0	94,0	93,7	92,5/81,6	93,0/81,9	94,2	94,6
I0, А	11,3	42,6	42,5	62,0/60,0	58,3/78,6	44,0	60,0
J, кг·м^2	0,31	2,1	2,88	2,88	4,69	2,42	4,69

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для электротехн. и энергет. специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5
МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СРЕДЕ LAZARUS

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: изучение влияния параметров кабельной сети и электродвигателей на работу многодвигательного асинхронного электропривода.

Задачи работы

1. Получить навыки моделирования электромеханических систем при помощи сред быстрой разработки приложений.
2. Получить навыки применения численных методов для решения задач моделирования электропривода.
3. Научиться анализировать влияние различных параметров кабельной сети и электродвигателей на характеристики многодвигательного асинхронного электропривода.
4. Уметь работать на среднем уровне в средах разработки приложений.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Модель одиночного асинхронного электродвигателя и методы численного решения систем дифференциальных уравнений рассматриваются в методических указаниях по моделированию одиночного асинхронного электродвигателя в среде LAZARUS. В данных методических указаниях будет дана модель системы: кабельная сеть – многодвигательный асинхронный электропривод. При анализе переходных процессов в многодвигательном асинхронном электроприводе возникает трудность, связанная с существованием не одного, а нескольких каналов обмена энергией между его элементами. Такими каналами являются: кабельная сеть, передаточный механизм (трансмиссия), нагрузка и т. д. Особенно сложно учесть эти явления в наиболее общем случае, т. е. когда одновременно учитываются все каналы обмена энергией. Поэтому целесообразно начать с рассмотрения модели кабельной сети, содержащей один общий кабель и произвольное число асинхронных электро-

двигателей (рис. 1). Кроме того, такая структура модели (типовой электромеханический модуль – ТЭМ) характерна для многих промышленных машин, например, добычных и проходческих комбайнов.

Итак, составляющие результирующего вектора тока кабеля в системе координат *α-β*, можно выразить следующим образом

$$i_{k\alpha} = \sum_{i=1}^{n} i_{s\alpha i} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \Psi_{s\alpha i} - \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} \Psi_{r\alpha i}, \quad i_{k\beta} = \sum_{i=1}^{n} i_{s\beta i} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \Psi_{s\beta i} - \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} \Psi_{r\beta i},$$

где i – номер двигателя; n – число двигателей.

Производные составляющих вектора тока кабеля соответственно будут определяться следующим образом

$$\begin{aligned}
\frac{di_{k\alpha}}{dt} &= \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \frac{d\Psi_{s\alpha i}}{dt} - \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^3, \\
\frac{di_{k\beta}}{dt} &= \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \frac{d\Psi_{s\beta i}}{dt} - \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^4, \\
\frac{d\Psi_{r\alpha i}}{dt} &= f_i^3 = -\frac{R_{ri}}{L_{ri}'} \Psi_{r\alpha i} + \frac{R_{ri} k_{si}}{L_{ri}'} \Psi_{s\alpha i} - p_i \omega_i \Psi_{r\beta i}, \\
\frac{d\Psi_{r\beta i}}{dt} &= f_i^4 = -\frac{R_{ri}}{L_{ri}'} \Psi_{r\beta i} + \frac{R_{ri} k_{si}}{L_{ri}'} \Psi_{s\beta i} + p_i \omega_i \Psi_{r\alpha i},
\end{aligned} \tag{1}$$

где i – индекс, обозначающий принадлежность параметра определенному двигателю.

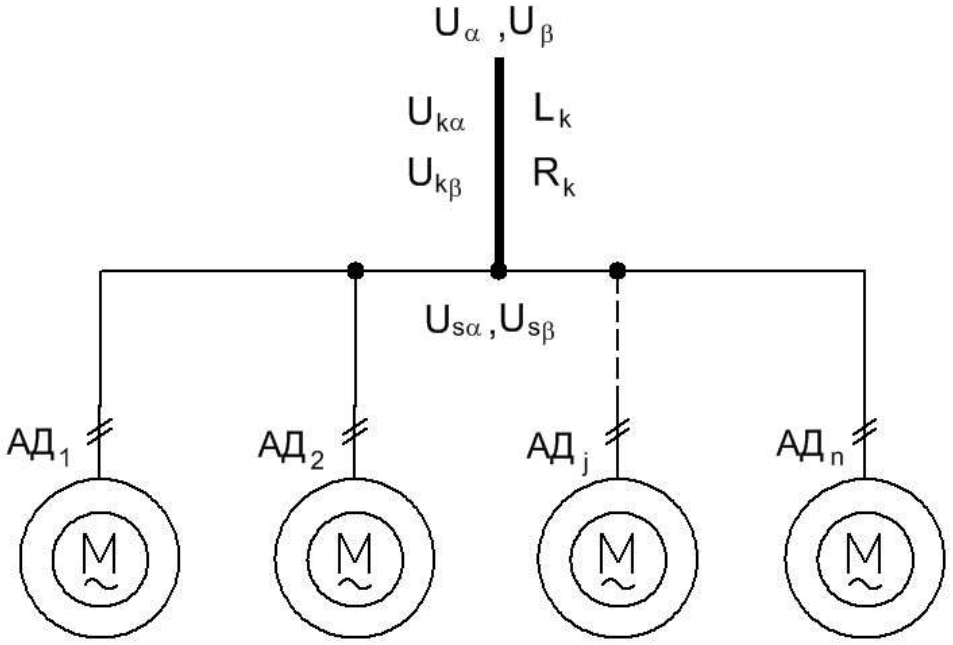


Рисунок 21. Многодвигательный асинхронный электропривод с кабелем в цепи статора

Исходя из этого, напряжение на двигателях может быть определено следующим образом

$$U_{s\alpha} = U_\alpha - L_k \frac{di_{k\alpha}}{dt} - R_k i_{k\alpha},$$
$$U_{s\beta} = U_\beta - L_k \frac{di_{k\beta}}{dt} - R_k i_{k\beta}, \qquad ,(2)$$

где U_α, U_β, – составляющие вектора питающего напряжения; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – составляющие вектора напряжения на обмотках статоров электродвигателей.

Подставим выражения (1) в (2), и совместим эти выражения с моделью одиночного асинхронного электродвигателя

$$\frac{d\Psi_{s\alpha j}}{dt} = U_\alpha - L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \frac{d\Psi_{s\alpha i}}{dt} + L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^3 - R_k \sum_{i=1}^{n} i_{s\alpha i} - R_s i_{s\alpha j},$$
$$\frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} = U_\beta - L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \frac{d\Psi_{s\beta i}}{dt} + L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^4 - R_k \sum_{i=1}^{n} i_{s\beta i} - R_s i_{s\beta j},$$
$$f_j^3 = -\frac{R_{rj}}{L_{rj}'} \Psi_{r\alpha j} + \frac{R_{rj} k_{sj}}{L_{rj}'} \Psi_{s\alpha j} - p_j \omega_j \Psi_{r\beta j}, \qquad .(3)$$
$$f_j^4 = -\frac{R_{rj}}{L_{rj}'} \Psi_{r\beta j} + \frac{R_{rj} k_{sj}}{L_{rj}'} \Psi_{s\beta j} + p_j \omega_j \Psi_{r\alpha j},$$

Перенесем все производные в левую часть системы уравнений и дополним ее моделью одномассовой механической подсистемы

$$\frac{d\Psi_{s\alpha j}}{dt} + L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \frac{d\Psi_{s\alpha i}}{dt} = f_j^1 = U_\alpha + L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^3 - R_k \sum_{i=1}^{n} i_{s\alpha i} - R_s i_{s\alpha j},$$
$$\frac{d\Psi_{s\beta j}}{dt} + L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{L_{si}'} \frac{d\Psi_{s\beta i}}{dt} = f_j^2 = U_\beta + L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^4 - R_k \sum_{i=1}^{n} i_{s\beta i} - R_s i_{s\beta j},$$
$$\frac{d\Psi_{r\alpha j}}{dt} = f_j^3 = -\frac{R_{rj}}{L_{rj}'} \Psi_{r\alpha j} + \frac{R_{rj} k_{sj}}{L_{rj}'} \Psi_{s\alpha j} - p_j \omega_j \Psi_{r\beta j}, \qquad , \quad (4)$$
$$\frac{d\Psi_{r\beta j}}{dt} = f_j^4 = -\frac{R_{rj}}{L_{rj}'} \Psi_{r\beta j} + \frac{R_{rj} k_{sj}}{L_{rj}'} \Psi_{s\beta j} + p_j \omega_j \Psi_{r\alpha j},$$
$$\frac{d\omega_j}{dt} = \frac{1}{J_{mj}} \left(M_j - M_{cj} \right) = \frac{1}{J_{mj}} \left(\frac{3}{2} p_j \frac{k_{rj}}{L_{sj}'} \left(\Psi_{s\beta j} \Psi_{r\alpha j} - \Psi_{s\alpha j} \Psi_{r\beta j} \right) - M_{cj} \right),$$

где M_j, M_{cj} – электромагнитный и момент сопротивления нагрузки j-го двигателя; f_j – правые части дифференциальных уравнений.

Введем обозначения

$$item_jn\alpha = L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^3 - R_k \sum_{i=1}^{n} i_{s\alpha i} - R_s i_{s\alpha j},$$
$$item_jn\beta = L_k \sum_{i=1}^{n} \frac{k_{ri}}{L_{si}'} f_i^4 - R_k \sum_{i=1}^{n} i_{s\beta i} - R_s i_{s\beta j}.$$
.

Возьмем практический случай, когда число двигателей n = 2. Для первого электродвигателя система уравнений запишется следующим образом

$$\frac{d\Psi_{s\alpha 1}}{dt}+L_k\sum_{i=1}^{2}\frac{1}{L_{si}'}\frac{d\Psi_{s\alpha i}}{dt}=U_\alpha+item_12\alpha,$$

$$\frac{d\Psi_{s\beta 1}}{dt}+L_k\sum_{i=1}^{2}\frac{1}{L_{si}'}\frac{d\Psi_{s\beta i}}{dt}=U_\beta+item_12\beta,$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha 1}}{dt}=f_1^3=-\frac{R_{r1}}{L_{r1}'}\Psi_{r\alpha 1}+\frac{R_{r1}k_{s1}}{L_{r1}'}\Psi_{s\alpha 1}-p_1\omega_1\Psi_{r\beta 1},$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta 1}}{dt}=f_1^4=-\frac{R_{r1}}{L_{r1}'}\Psi_{r\beta 1}+\frac{R_{r1}k_{s1}}{L_{r1}'}\Psi_{s\beta 1}+p_1\omega_1\Psi_{r\alpha 1},$$

$$\frac{d\omega_1}{dt}=\frac{1}{J_{m1}}\left(\frac{3}{2}p_1\frac{k_{r1}}{L_{s1}'}\left(\Psi_{s\beta 1}\Psi_{r\alpha 1}-\Psi_{s\alpha 1}\Psi_{r\beta 1}\right)-M_{c1}\right),$$

где $item_12\alpha=L_k\sum_{i=1}^{2}\frac{k_{ri}}{L_{si}'}f_i^3-R_k\sum_{i=1}^{2}i_{s\alpha i}-R_s i_{s\alpha 1}$, $item_12\beta=L_k\sum_{i=1}^{2}\frac{k_{ri}}{L_{si}'}f_i^4-R_k\sum_{i=1}^{2}i_{s\beta i}-R_s i_{s\beta 1}$.

Система дифференциальных уравнений (4) не может быть решена стандартными численными методами, так как в левой части системы уравнений имеется не одна, а несколько производных функций. Для представления системы уравнений (4) в форме Коши, необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений (5) относительно производных

$$\begin{pmatrix} 1+\frac{L_k}{L_{s1}'} & \frac{L_k}{L_{s2}'} & .... & \frac{L_k}{L_{sn}'} \\ \frac{L_k}{L_{s1}'} & 1+\frac{L_k}{L_{s2}'} & .... & \frac{L_k}{L_{sn}'} \\ .... & .... & .... & .... \\ \frac{L_k}{L_{s1}'} & \frac{L_k}{L_{s2}'} & .... & 1+\frac{L_k}{L_{sn}'} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \frac{d\Psi_{s\alpha 1}}{dt} \\ \frac{d\Psi_{s\alpha 2}}{dt} \\ .... \\ \frac{d\Psi_{s\alpha n}}{dt} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} U_\alpha+item_1n\alpha \\ U_\alpha+item_2n\alpha \\ .... \\ U_\alpha+item_nn\alpha \end{pmatrix}, \quad (5)$$

В итоге получаем систему из $5n$ дифференциальных уравнений в форме Коши, где n – количество двигателей. Существует множество численных методов решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В методических указаниях по моделированию одиночного асинхронного электродвигателя в среде быстрой разработки приложений LAZARUS были рассмотрены алгоритм и программа, реализующие основные два методы: метод Эйлера и метод Рунге-Кутты четвертого порядка. В дальнейшем рекомендуется придерживаться их использования.

Для решения системы линейных алгебраических уравнений при помощи вычислительной техники можно использовать несколько различных методов: метод исключений Гаусса, метод Крамера и др.

Рассмотрим первый из них. В общем виде система линейных уравнений представляется следующим образом

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1(n+1)} \\ a_{2(n+1)} \\ \dots \\ a_{n(n+1)} \end{pmatrix},$$

где a_{ij} – коэффициенты системы линейных уравнений; x_i – неизвестные.

Первый шаг при решении системы линейных уравнений методом исключения Гаусса заключается в приведении матрицы коэффициентов к треугольному виду

$$a_{ij}{}^{k} = \frac{a_{ij}{}^{k-1}}{a_{ik}{}^{k-1}} a_{kk}{}^{k-1} - a_{kj}{}^{k-1},$$

где $k = \overline{1,(n-1)}$ – индекс, показывающий номер расчетов в рекуррентном соотношении; $i = \overline{(k+1),n}$ – номер строки; $j = \overline{(k+1),(n+1)}$ – номер столбца.

При этом остальные коэффициенты матрицы обнуляются

$$a_{ij} = 0,\ i = \overline{2,n},\ j = \overline{1,(i-1)}.$$

Определитель матрицы в процессе приведения к треугольному виду будет изменяться, что можно исправить следующей корректировкой

$$k_{cor}{}^{k} = \frac{a_{ik}{}^{k-1}}{a_{ij}{}^{k-1}} k_{cor}{}^{k-1},$$

$$a_{n,n}{}^{k} = a_{n,n}{}^{k-1} k_{cor}{}^{l},$$

$$a_{n,(n+1)}{}^{k} = a_{n,(n+1)}{}^{k-1} k_{cor}{}^{l},$$

где n – количество строк матрицы; $l = \frac{n}{2}(n-1)$ – количество итераций, выполненных для приведения матрицы к треугольному виду; k_{cor} – коэффициент коррекции; $k = \overline{1,(n-1)}$ – индекс, показывающий

номер итерации в рекуррентном соотношении; $i=\overline{(k+1),n}$ – номер строки; $j=\overline{(k+1),(n+1)}$ – номер столбца.

Второй шаг заключается в поиске значений переменных на основе известных коэффициентов треугольной матрицы

$$x_i=\frac{a_{i(n+1)}-\sum_{j=i+1}^{n}a_{ij}x_j}{a_{ii}},\ i=n,(n-1)...1.$$

Недостатком такого подхода является большое количество последовательных операций над числом, что приводит к накоплению ошибки вычисления. Для исключения этого недостатка при решении линейной системы уравнений используются специальные преобразования, которые здесь не рассматриваются.

Метод Крамера основан на соотношениях

$$x_1=\frac{\begin{vmatrix} a_{1(n+1)} & a_{12} & ... & a_{1n} \\ a_{2(n+1)} & a_{22} & ... & a_{2n} \\ ... & ... & ... & ... \\ a_{n(n+1)} & a_{n2} & ... & a_{nn} \end{vmatrix}}{det(A)},\ x_2=\frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{1(n+1)} & ... & a_{1n} \\ a_{21} & a_{2(n+1)} & ... & a_{2n} \\ ... & ... & ... & ... \\ a_{n1} & a_{n(n+1)} & ... & a_{nn} \end{vmatrix}}{det(A)},x_n=\frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & ... & a_{1(n+1)} \\ a_{21} & a_{22} & ... & a_{2(n+1)} \\ ... & ... & ... & ... \\ a_{n1} & a_{n2} & ... & a_{n(n+1)} \end{vmatrix}}{det(A)},$$

$$det(A)=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & ... & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & ... & a_{2n} \\ ... & ... & ... & ... \\ a_{n1} & a_{n2} & ... & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Однако применение этих соотношений затруднено, так как поиск определителя матрицы порядка 4 и больше возможно только при разложении матрицы на определители 3-го порядка. В этом случае поможет свойство треугольных матриц, по которому определитель находится как произведение элементов главной диагонали. Например, для матрицы 3-го порядка

$$det(A)=a_{11}a_{22}a_{33}.$$

Отсюда можно получить общую формулу для поиска определителя треугольной матрицы порядка n

$$det(A)=\prod_{i=1}^{n}a_{ii}.$$

Таким образом, вычисление определителя матрицы произвольного порядка сводится к последовательности действий: приве-

дение матрицы к треугольному виду с последующей коррекцией, вычисление определителя треугольной матрицы.

3. НАЧАЛО РАБОТЫ В СРЕДЕ LAZARUS

При запуске приложения (файл lazarus.exe) открывается окно программы с предыдущим проектом. Для его закрытия используем раздел главного меню «Проект», где выбираем команду «Закрыть проект». После закрытия проекта появляется окно выбора дальнейших действий «Project wizard», в котором нажимаем кнопку «Новый проект». Затем выбираем «Приложение» из списка типов проектов. Подтверждаем выбор нажатием кнопки «ok». В результате этих действий на экране появляется форма «Form1» и окно с исходным кодом приложения, где прописано создание формы «Form1» при запуске создаваемого приложения. Выполним сохранение проекта приложения: в разделе главного меню «Файл» выберем команду «Сохранить как», затем в появившемся окне выберем директорию, куда хотим сохранить файлы проекта. Программа предложит сохранить два файла: файл проекта с расширением *.lpi и файл исходного кода на языке программирования Pasca с расширением *.pas. Для компиляции программы во вкладке «Запуск» выбираем команду «Собрать» (сочетание клавиш Ctrl + F9). Для компиляции и последующего запуска проекта выбираем команду «Запустить» вкладки «Запуск» (клавиша F9).

После сохранения файлов проекта и успешного запуска приложения в режиме отладки создается файл с названием, совпадающим с названием проекта и расширением *.exe. Вы создали приложение, которое не выполняет пока что ничего, кроме визуализации формы приложения. Добавим функциональности приложению: во вкладке «Standard» выберем нажатием объект «TButton» (кнопка), а затем нажмем на поле формы. В этом месте должен появиться объект «Button1», который относится к типу TButton. У любого объекта в среде Lazarus есть свойства (Properties) и события (Events). Свойства – это характеристики объекта, задаваемые значениями различных типов данных (цвет, ширина, высота и т. д.). События – это процедуры, вызываемые при совершении некоторого действия над объектом (нажатие правой кнопкой мыши на объекте, выделение объекта и т. д.). Для изменения свойств объектов

и назначения реакций на события на этапе создания приложения необходимо использовать «Инспектор объектов». Изменим свойства объекта Button1, воспользовавшись «Инспектором объектов»: выделим объект; изменим свойство «Caption», задающее текст кнопки, на текстовое значение «Старт»; изменим шрифт текста кнопки (свойство «Font») на «Courier», высоту шрифта зададим 15. Для назначения реакции на события, необходимо во вкладке «События» инспектора объектов выбрать событие (например, OnClick, OnDblClick, OnCreate и т. д.), затем двойным щелчком мыши по нему провоцируем автоматическое создание процедуры в исходном коде, в теле которой прописываем необходимые действия (например, изменение текста кнопки).

Пример оформления формы показан на рис. 2. Текст программы, соответствующей данной форме представлен ниже.

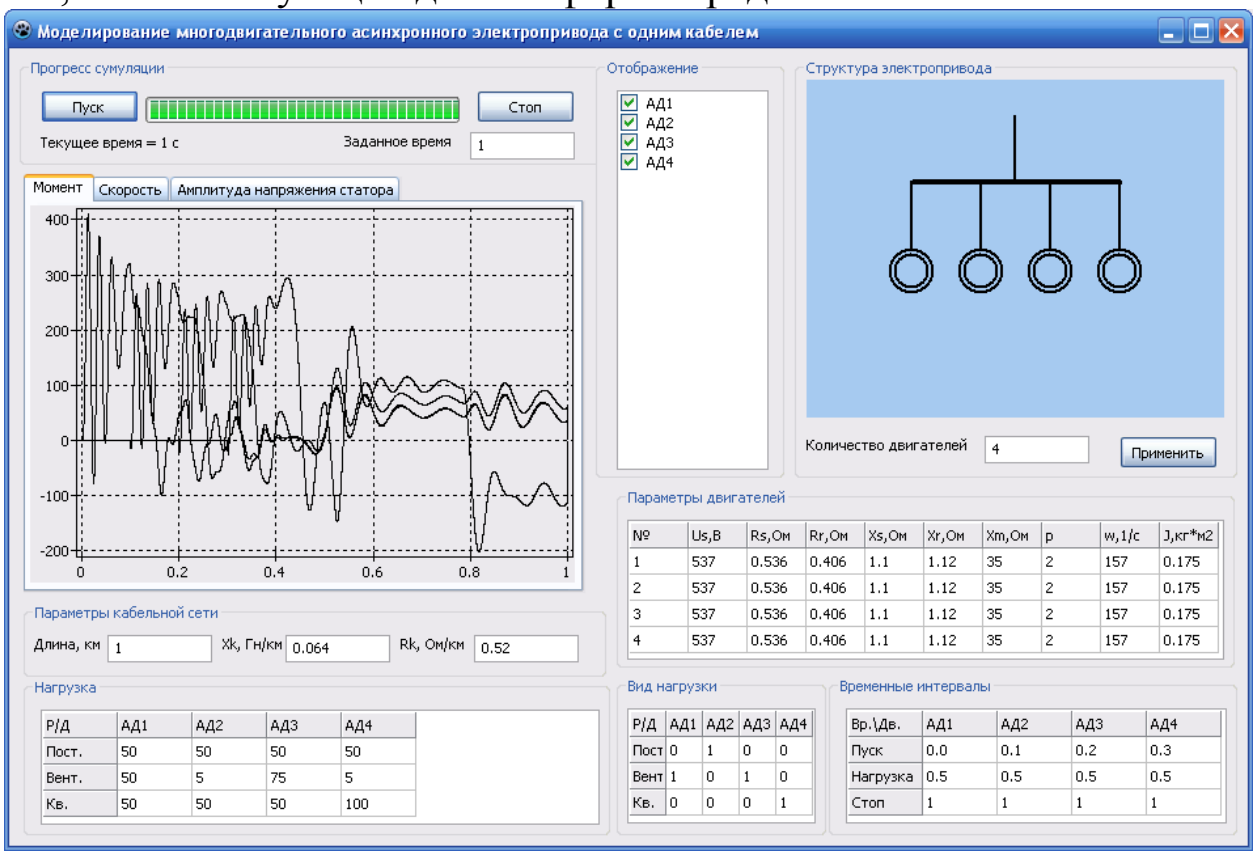


Рис. 2. Окно приложения, созданного в среде LAZARUS

```
unit ADx1CABUn;
{$mode objfpc}{$H+}
interface
uses
  Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls,
Graphics, Dialogs, StdCtrls,
  ExtCtrls, Grids, ComCtrls, CheckLst, TAGraph,
TASeries, Math;
type
  { TForm1 }
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Chart1: TChart;
    Chart1LineSeries1: TLineSeries;
    Chart1LineSeries2: TLineSeries;
    Chart2: TChart;
    Chart2LineSeries1: TLineSeries;
    Chart2LineSeries2: TLineSeries;
    Chart3: TChart;
    Chart3LineSeries1: TLineSeries;
    Chart3LineSeries2: TLineSeries;
    CheckListBox1: TCheckListBox;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    GroupBox1: TGroupBox;
    GroupBox2: TGroupBox;
    GroupBox3: TGroupBox;
    GroupBox4: TGroupBox;
    GroupBox5: TGroupBox;
    GroupBox6: TGroupBox;
    GroupBox7: TGroupBox;
    GroupBox8: TGroupBox;
    Image1: TImage;
```

```
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    PageControl1: TPageControl;
    ProgressBar1: TProgressBar;
    StringGrid1: TStringGrid;
    StringGrid2: TStringGrid;
    StringGrid3: TStringGrid;
    StringGrid4: TStringGrid;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet2: TTabSheet;
    TabSheet3: TTabSheet;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button3Click(Sender: TObject);
    procedure     CheckListBox1ClickCheck(Sender:
TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure  ChangingApply(ADCount1,ADCount2  :
byte);
    procedure Simulation(Sender : TObject);
    procedure Switch(Time : Extended);
    procedure LoadUpdate(Time : Extended);
    procedure       StringGrid3SelectCell(Sender:
TObject; aCol, aRow: Integer;
      var CanSelect: Boolean);
  private
    { private declarations }
  public
    { public declarations }
  end;
TMArray = array[1..20,1..20] of Extended;
TSArray = array [1..20] of Extended;
var
  Form1: TForm1;
```

```
  RefTime: extended; // заданное время
  SimTime: extended; // текущее время симуляции
  { составляющие вектора питающего напряжения }
  Ualfa, Ubeta : Extended;
  { параметры двигателей }
  Rs0, Ls0, Lr0, Lm0, Lps0, Lpr0, ks0, kr0, Rr0,
  Rs, Ls, Lr, Lm, Lps, Lpr, ks, kr, p,
  Rr, Jm : array [1..10] of Extended; { парамет-
ры АД: активное сопротивление, полная индуктив-
ность цепи статора,  }
  TimeStart, TimeStop, TimeLoad : Array [1..10]
of Real; { матрицы временных интервалов }
  { параметры кабеля }
  Rk, Lk, Xkk, Rkk : Extended; { полные активное
сопротивление и индуктивность; погонные индук-
тивное и активное сопротивления }
  CabelLength : Extended; { длина кабеля в км }
  { для решения системы линейных уравнений }
  A1, A2 : TMArray; { квадратные матрицы }
  Item1, Item2 : Array [1..20] of Extended;
  { для решения дифференциальных уравнений }
  f, y, y0, yz : Array [1..50] of Extended;
  h, hz, eps : Extended;
  Mm, Mc : Array [1..20] of Extended;  { элек-
тромагнитный момент АД и момент сопротивления на
валу АД }
  Nad : integer;  { количество двигателей }
  i,j,k : integer;    { счетчик }
  SimState: Boolean = False; { состояние симуля-
ции - по умолчанию не выполняется }
  TimeArray,LoadArray  :  Array  [1..20,1..3]  of
Real; { матрицы временных интервалов и нагрузки
}
  { графики }
  LineSeries  :  Array  [1..20,1..20]  of  TLi-
neSeries;
  Usalfa,Usbeta,Usm : Extended;     { составляю-
щие и амплитуда напряжения статора двигателя }
```

```
implementation
{$R *.lfm}
{ TForm1 }
{приведение матриц к треугольному виду (изменяет
массив, введенный как аргумент)
определитель НЕ изменяется !!!!}
procedure Triangle (var A : TMArray);
Var i, j, k : integer;
    koef, S : Extended;
begin
  koef:=1;
{=============================================}
{     Основной цикл процедуры                 }
{=============================================}
     for k:=1 to (Nad-1) do
       for i:=(k+1) to Nad do
        begin
         if (A[i,k]<>0) then
          begin
           S:=A[k,k]/A[i,k];
           for     j:=1     to     (Nad+1)     do
A[i,j]:=A[i,j]*S-A[k,j];
          { поправочный коэффициент, приводящий
определитель матрицы к исходному значению }
           koef:=koef/S;
          end;
        end;
     { обнуление коэффициентов, стоящих ниже
главной диагонали }
     for i:=2 to Nad do
       for j:=1 to (i-1) do A[i,j]:=0;
     { приводим определитель матрицы к исходному
значению }
     A[Nad,Nad]:=A[Nad,Nad]*koef;
     A[Nad,Nad+1]:=A[Nad,Nad+1]*koef;
end;
{   функция, возвращающая значение детерминанта
треугольной матрицы}
```

```
function TriangDet(A : TMArray) : Extended;
Var i : integer;
    prod : Extended;
begin
  prod := 1;
  for i:=1 to Nad do
     prod:=prod*A[i,i];
 Result := prod;
end;
{  процедура, решающая систему уравнений методом
Крамера}
procedure Kramer(A : TMArray; var X : TSArray;
RowNum : integer);
var detA1, detA2 : Extended;
    A1,A2 : TMArray;
begin
  A1:=A;
  Triangle(A1);            // приведение исходной
матрицы к трегольному виду
  detA1:=TriangDet(A1);  //  поиск  детерминанта
треугольной матрицы
  for i:=1 to RowNum do // RowNum - число строк
матрицы
   begin
    A2:=A;
    { меняем столбцы матрицы местами }
    for       j:=1       to       RowNum       do
A2[j,i]:=A2[j,RowNum+1];
    Triangle(A2);           // приведение модифи-
цированной матрицы к трегольном виду
    detA2:=TriangDet(A2);   // вычисление детер-
минанта модифицированной матрицы
    X[i]:=detA2/detA1;        // решение системы
уравнений
   end;
end;
```

```
{ Процедура обработки события "нажатие кнопки
"Применить""}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
Var LineColor: TColor;
    FilColor: TColor;
    PictWidth, PictHeight : integer;
    kk,l : integer;
    i : integer;
    Radius : integer;
    x1,y1,x2,y2 : integer;
begin
   { цвет линии }
   LineColor := clBlack;
   { цвет заполнения рисунка }
   FilColor := clSkyBlue;
   { ширина рисунка }
   PictWidth := Form1.Image1.Width;
   { высота рисунка }
   PictHeight := Form1.Image1.Height;
   { обновление количества двигателей }

Form1.ChangingApply(Nad,StrToInt(Form1.Edit4.Tex
t));
   { вспомогательные переменные }
   kk := trunc(PictWidth/(Nad+2));
   { высота линий }
   l := trunc(PictHeight/5);
   { радиус внешней окружности }
   Radius := trunc(kk/3);
   With Form1.Image1 do
    begin
      Canvas.Brush.Color := FilColor;
      Canvas.FillRect(0,0,PictWidth,PictHeight);
      Canvas.Pen.Color:=LineColor;
      Canvas.Pen.Width:=2;
      { построение вертикальной центральной ли-
нии }
```

```
 Can-
vas.Line(trunc(PictWidth/2),trunc(PictHeight/2-
l),trunc(PictWidth/2),trunc(PictHeight/2-2*l));
      Canvas.Pen.Width:=4;
      {  построение  центральной  горизонтальной
линии }
      Canvas.Line(trunc(PictWidth/2-
Nad/2*kk+kk/2),trunc(PictHeight/2-
l),trunc(PictWidth/2+Nad/2*kk-
kk/2),trunc(PictHeight/2-l));
      Canvas.Pen.Width:=2;
      { построение изображений двигателей }
      for i:=1 to Nad do
        begin
         { построение линий }
         x1:=trunc(PictWidth/2-(Nad-
1)/2*kk+kk*(i-1));
         y1:=trunc(PictHeight/2-l);
         x2:=x1;
         y2:=trunc(PictHeight/2);
  { построение вертикальных кабельных линий }
         Canvas.Line(x1,y1,x2,y2);
         { построение окружностей }
         x1:=x1-Radius; x2:=x2+Radius;
         y1:=y2; y2:=trunc(y2+2*Radius);
         { внешняя окружность }
         Canvas.Ellipse(x1,y1,x2,y2);
         { внутренняя окружность }          Can-
vas.Ellipse(x1+trunc(Radius/4),y1+trunc(Radius/4
),x2-trunc(Radius/4),y2-trunc(Radius/4));
        end;
    end;
   { заполнение массивов параметров АД }
   for i:=1 to Nad do
     begin

Rs[i]:=StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[2,i]);
```

```
Rr[i]:=StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[3,i]);
      { Ls = (xs + xm)/314 }
Ls[i]:=(StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[4,i])
+ StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[6,i]))/314;
Lr[i]:=(StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[5,i])
+ StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[6,i]))/314;
Lm[i]:=StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[6,i])/
314;

p[i]:=StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[7,i]);

Jm[i]:=StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[9,i]);
      ks[i]:=Lm[i]/Ls[i]; kr[i]:=Lm[i]/Lr[i];
      Lps[i]:=Ls[i]-kr[i]*Lm[i];
      Lpr[i]:=Lr[i]-ks[i]*Lm[i];
     end;
{ запоминание начальных значений активных сопро-
тивлений статоров АД }
   Rs0:=Rs;
   Lps0:=Lps;
   Lpr0:=Lpr;
   Rr0:=Rr;
   { задание времени симуляции }
   RefTime := StrToFloat(Form1.Edit5.Text);
   { обновление параметров кабеля }
   CabelLength := StrToFloat(Form1.Edit1.Text);
   Xkk := StrToFloat(Form1.Edit2.Text);
   Rkk := StrToFloat(Form1.Edit3.Text);
   Lk := Xkk*CabelLength/314;
   Rk := Rkk*CabelLength;
end;
{
  обработка события - нажатие кнопки "Пуск"
}
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
   Simulation(Sender);
```

```
end;
{
 нажатие кнопки "Стоп"
}
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  SimState:=False;
end;
{
 управление отображением графиков
}
procedure  TForm1.CheckListBox1ClickCheck(Sender:
TObject);
Var i : integer;
begin
  for i:=1 to Nad do
     if     not(Form1.CheckListBox1.Checked[i-1])
then
       begin
        LineSeries[1,i].Active:=False;
        LineSeries[2,i].Active:=False;
        LineSeries[3,i].Active:=False;
       end
     else
       begin
        LineSeries[1,i].Active:=True;
        LineSeries[2,i].Active:=True;
        LineSeries[3,i].Active:=True;
       end;
end;
{  включение-выключение двигателей}
procedure TForm1.Switch(Time : Extended);
Var i: integer;
begin
  { параметры соответствующего двигателя }
   for i:=1 to Nad do
   begin
```

```
   if (Time < TimeArray[i,1])or(Time >= TimeAr-
ray[i,3]) then
     begin
     Rs[i]:=1000000;
     Lps[i]:=1000000;
     Lpr[i]:=1000000;
     Rr[i]:=1000000;
     end
  else
     begin
     Rs[i]:=Rs0[i];
     Lps[i]:=Lps0[i];
     Lpr[i]:=Lpr0[i];
     Rr[i]:=Rr0[i];
     end;
  end;
end;
{  Процедура вычисления нагрузки}
procedure TForm1.LoadUpdate(Time : Extended);
Var i : integer;
begin
  for i:=1 to Nad do
   Begin
    if    (Time    >    TimeArray[i,2])    then
Mc[i]:=LoadArray[i,1]+
    LoadArray[i,2]*sqr(p[i]*y[(i-1)*5+5]/314)+
    LoadArray[i,3]*sign(sin(12*Time));
   end;
end;
{  процедура, вычисляющая правые части дифферен-
циальных уравнений}
Procedure Equation(Time: Extended);
Var i,j : integer; { переменная-счетчик должна
быть объявлена в каждой процедуре }
    Sum1, Sum2 : Extended;
    X : TSArray;
begin
  Ualfa := 537*sin(314*Time);
```

```
  Ubeta := -537*cos(314*Time);
  Usalfa:=f[1]+Rs[1]/Lps[1]*y[1]-
Rs[1]*kr[1]/Lps[1]*y[3];
  Usbeta:=f[2]+Rs[1]/Lps[1]*y[2]-
Rs[1]*kr[1]/Lps[1]*y[4];
  Usm:=sqrt(sqr(Usalfa)+sqr(Usbeta));
{ коммутация двигателей }
  Form1.Switch(Time);
{ формирование матриц для решения систем линей-
ных уравнений }
  for i:=1 to Nad do
   begin
    for j:=1 to Nad do A1[j,i]:=Lk/Lps[i];
    for j:=1 to Nad do A2[j,i]:=Lk/Lps[i];
    A1[i,i]:=A1[i,i]+1;
    A2[i,i]:=A2[i,i]+1;
   end;
{  вычисление  вспомогательных  матриц  Item1  и
Item2 }
  {--}
    Sum1:=0;
    for i:=1 to Nad do
        Sum1:=Sum1    +    Lk*kr[i]/Lps[i]*f[(i-
1)*5+3]-
             Rk*y[(i-
1)*5+1]/Lps[i]+Rk*kr[i]/Lps[i]*y[(i-1)*5+3];
    {--}
    Sum2:=0;
    for i:=1 to Nad do
       Sum2:=Sum2    +    Lk*kr[i]/Lps[i]*f[(i-
1)*5+4]-
            Rk*y[(i-
1)*5+2]/Lps[i]+Rk*kr[i]/Lps[i]*y[(i-1)*5+4];
  for j:=1 to Nad do
   begin
    Item1[j]:=Sum1          -          Rs[j]*y[(j-
1)*5+1]/Lps[j]+Rs[j]*kr[j]/Lps[j]*y[(j-1)*5+3];
```

```
    Item2[j]:=Sum2          -          Rs[j]*y[(j-
1)*5+2]/Lps[j]+Rs[j]*kr[j]/Lps[j]*y[(j-1)*5+4];
   end;
{ формирование правых частей линейных алгебраи-
ческих уравнений относительно производных }
   for i:=1 to Nad do
    begin
     A1[i,Nad+1]:=Ualfa+Item1[i];
     A2[i,Nad+1]:=Ubeta+Item2[i];
    end;
   { вычисление правых частей диф. уравнений
статора по оси альфа }
   Kramer(A1,X,Nad);
   for i:=1 to Nad do f[(i-1)*5+1]:=X[i];
   { вычисление правых частей диф. уравнений
статора по оси бета }
   Kramer(A2,X,Nad);
   for i:=1 to Nad do f[(i-1)*5+2]:=X[i];
   { вычисление правых частей диф уравнений ро-
тора }
   for i:=1 to Nad do
    begin
     { частота вращения w = y[(i-1)*5+5]
       Поток ротора по оси альфа Fralfa = y[(i-
1)*5+3]
       Поток статора по оси альфа Fsalfa = y[(i-
1)*5+1]}
     f[(i-1)*5+3]:=-Rr[i]/Lpr[i]*y[(i-1)*5+3]+
                 Rr[i]*ks[i]/Lpr[i]*y[(i-
1)*5+1]-p[i]*y[(i-1)*5+5]*y[(i-1)*5+4];
     { Поток ротора по оси бета Frbeta =
y[round((i-1)*5)+4]
       Поток статора по оси бета Fsbeta =
y[round((i-1)*5+2)] }
     f[(i-1)*5+4]:=-Rr[i]/Lpr[i]*y[(i-1)*5+4]+
                 Rr[i]*ks[i]/Lpr[i]*y[(i-
1)*5+2]+p[i]*y[(i-1)*5+5]*y[(i-1)*5+3];
    end;
```

```
{ вычисление правых частей диф уравнений механи-
ческой подсистемы }
   Form1.LoadUpdate(Time);
   for i:=1 to Nad do
    begin
     Mm[i]:=3/2*p[i]*kr[i]/Lps[i]*(y[(i-
1)*5+2]*y[(i-1)*5+3]-
     y[(i-1)*5+1]*y[(i-1)*5+4]);
{уравнение одномассовой механической системы }
     f[(i-1)*5+5]:=(Mm[i]-Mc[i])/Jm[i];
    end;
end;
{процедура решения системы дифференциальных
уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка}
procedure Runge4(Time : Extended);
Var i : integer;
    Time0 : Extended;
    k1,k2,k3,k4 : array [1..50] of Extended;
begin
   { сохранение времени }
   Time0 := Time;
   { расчет правых частей диф. уравнений }
   Equation(Time0);
 { расчет первого поправочного коэффициента }
   k1 := f;
 { расчет второго поправочного коэффициента }
   Time0 := Time + h/2;
   for i:=1 to 5*Nad do Y[i] := Y0[i] +
h/2*k1[i];
   Equation(Time0);
   k2 := f;
{ расчет третьего поправочного коэффициента }
   for i:=1 to 5*Nad do Y[i] := Y0[i] +
h/2*k2[i];
   Equation(Time0);
   k3:=f;
 { расчет четвертого поправочного коэффициента }
   Time0 := Time + h;
```

```
   for i:=1 to 5*Nad do Y[i] := Y0[i] + h*k3[i];
   Equation(Time0);
   k4 := f;
   for i:=1 to 5*Nad do Y[i] := Y0[i] +
(k1[i]+2*k2[i]+2*k3[i]+k4[i])*h/6;
end;
{ ПРОЦЕДУРА РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ
УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ ЭЙЛЕРА БЕЗ КОРРЕКЦИИ }
procedure Eyler(Time : Extended);
Var i : integer;
begin
  Equation(Time);   // вычисление правых частей
диф. уравнений
  for i:=1 to 5*Nad do y[i]:=y0[i]+h*f[i];
end;
{=============================================}
{  ПРОЦЕДУРА СИМУЛЯЦИИ}
{=============================================}
procedure TForm1.Simulation(Sender: TObject);
Var MinSeries,MaxSeries : TLineSeries;
begin
{ если симуляция не выпоняется, то выполнить }
{ в противном случае - выйти из процедуры }
   if not(SimState) then SimState:=True
   else exit;
   { провоцируем нажатие кнопки "Применить" }
   Form1.Button1Click(Sender);
   { при первом запуске должны быть очищены все
графики и массивы переменных }
   for i:=1 to 5*Nad do
     begin
      f[i]:=0.0; y[i]:=0.0; y0[i]:=0.0;
     end;
   SimTime:=0; h:=0.0001;
{ создаем линейные графики по числу двигателей }
   Form1.Chart1.ClearSeries; { удалить все се-
рии, созданные заранее }
```

```
   Form1.Chart2.ClearSeries;  {  удалить  все  се-
рии, созданные заранее }
   Form1.Chart3.ClearSeries;  {  удалить  все  се-
рии, созданные заранее }
{  устанавливаем  минимум  и  максимум  графика
напряжения - Chart3 }
   MinSeries:=TLineSeries.Create(nil);
   MinSeries.Clear; MinSeries.AddXY(0,0);
   MaxSeries:=TLineSeries.Create(nil);
   MaxSeries.Clear; MaxSeries.AddXY(0,560);
   Form1.Chart3.AddSeries(MinSeries);
   Form1.Chart3.AddSeries(MaxSeries);
   { добавляем на график серии }
   for i:=1 to Nad do
     begin
    LineSeries[1,i]:=TLineSeries.Create(nil);
      LineSeries[1,i].Clear;
 LineSeries[1,i].Title:='Moment'+IntToStr(i);
      Form1.Chart1.AddSeries(LineSeries[1,i]);
      LineSeries[1,i].Active:=True;
     end;
   for i:=1 to Nad do
     begin
    LineSeries[2,i]:=TLineSeries.Create(nil);
      LineSeries[2,i].Clear;
  LineSeries[2,i].Title:='Speed'+IntToStr(i);
      Form1.Chart2.AddSeries(LineSeries[2,i]);
      LineSeries[2,i].Active:=True;
     end;
   for i:=1 to Nad do
     begin
    LineSeries[3,i]:=TLineSeries.Create(nil);
      LineSeries[3,i].Clear;
LineSeries[3,i].Title:='Voltage'+IntToStr(i);
      Form1.Chart3.AddSeries(LineSeries[3,i]);
      LineSeries[3,i].Active:=True;
     end;
   { заполнение матрицы временных интервалов }
```

```
   for i:=1 to Nad do
     for j:=1 to 3 do
        if  Form1.StringGrid2.Cells[i,j]  <>  ''
then
TimeAr-
ray[i,j]:=StrToFloat(Form1.StringGrid2.Cells[i,j
])
        else      begin      TimeArray[i,j]:=0;
Form1.StringGrid2.Cells[i,j]:='0'; end;
   { заполнение матрицы нагрузки }
   for i:=1 to Nad do
     for j:=1 to 3 do
       begin
        if
(Form1.StringGrid3.Cells[i,j]<>'0')and(Form1.Str
ingGrid4.Cells[i,j]<>'0') then
        LoadAr-
ray[i,j]:=StrToFloat(Form1.StringGrid3.Cells[i,j
])*StrToFloat(Form1.StringGrid4.Cells[i,j]);
       end;
   { главный цикл программы симуляции }
   While (SimTime < RefTime) do
   Begin
{Разрешить доступ до элементов управления в цик-
ле}
     Application.ProcessMessages;
{  прекратить  симуляцию,  если  нажата  кнопка
"Стоп" }
     if not(SimState) then Exit;
Form1.ProgressBar1.Position:=round(SimTime/RefTi
me*100); { полоса прогресса симуляции }
     Form1.Label5.Caption:='Текущее    время    =
'+FloatToStrf(SimTime,ffGeneral,5,5)+' с';
     Runge4(SimTime);     {  ешение  системы  диф.
уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка }
     { заполняем графики точками }
     for i:=1 to Nad do
       begin
```

```
        LineSeries[1,i].AddXY(SimTime,Mm[i]);
{ момент }
        LineSeries[2,i].AddXY(SimTime,y[(i-
1)*5+5]);  { скорость }
        LineSeries[3,i].AddXY(SimTime,Usm);
{ амплитуда напряжения }
      end;
    Y0:=Y;  {начальное значение интегрируемых
переменных равно конечному на предыдущем шаге}
    SimTime:=SimTime+h;    { здесь реализуется
приращение времени симуляции }
   end;
  SimState:=False; { обозначить окончание симу-
ляции }
end;
{  обработка события "выбор ячейки таблицы "вид
нагрузки " "}
procedure   TForm1.StringGrid3SelectCell(Sender:
TObject; aCol, aRow: Integer;
  var CanSelect: Boolean);
begin
   if    (Form1.StringGrid3.Cells[aCol,aRow]='1')
then
        Form1.StringGrid3.Cells[aCol,aRow]:='0'
   else Form1.StringGrid3.Cells[aCol,aRow]:='1';
end;

{  обработка изменений в форме
  ADCount1 - предыдущее значение количества дви-
гателей
  ADCount2  - установленное значение количества
двигателей}
Procedure  TForm1.ChangingApply(ADCount1,ADCount2
: byte);
begin
   Nad:=ADCount2;
   Form1.StringGrid1.RowCount:=Nad+1;
   Form1.StringGrid2.ColCount:=Nad+1;
```

```
   Form1.StringGrid3.ColCount:=Nad+1;
   Form1.StringGrid4.ColCount:=Nad+1;
   { изменение листа отображения графиков }
   Form1.CheckListBox1.Items.Clear;
   for i:=1 to Nad do
     begin

Form1.CheckListBox1.Items.Add('АД'+IntToStr(i));
      Form1.CheckListBox1.Checked[i-1]:=True;
     end;
   if (ADCount1 >= ADCount2) then exit;
   if (ADCount1 < ADCount2) then
     Begin
{заполнение таблицы с параметрами двигателей}
      for i:=ADCount1 to ADCount2 do
       With Form1.StringGrid1 do
        begin
         Cells[0,i]:=IntToStr(i);
         Cells[1,i]:='537';
         Cells[2,i]:='0.536';
         Cells[3,i]:='0.406';
         Cells[4,i]:='1.1';
         Cells[5,i]:='1.12';
         Cells[6,i]:='35';
         Cells[7,i]:='2';
         Cells[8,i]:='157';
         Cells[9,i]:='0.175';
        end;
      for i:=ADCount1 to ADCount2 do
        begin
  { заполнение таблицы временных интервалов }
         With Form1.StringGrid2 do
          begin
           Cells[i,0]:='АД'+IntToStr(i);
           Cells[i,1]:='0.0';
           Cells[i,2]:='0.5';
           Cells[i,3]:='1.0';
          end;
```

```
        { заполнение таблицы "вид нагрузки" }
         With Form1.StringGrid3 do
          begin
           Cells[i,0]:='АД'+IntToStr(i);
           Cells[i,1]:='0';
           Cells[i,2]:='0';
           Cells[i,3]:='0';
          end;
        { заполнение таблицы "нагрузка" }
         With Form1.StringGrid4 do
          begin
           Cells[i,0]:='АД'+IntToStr(i);
           Cells[i,1]:='50';
           Cells[i,2]:='5';
           Cells[i,3]:='50';
          end;
        end;
     End;
end;
{  обработка события - "создание формы"}
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
Var i : integer;
begin
  { количество двигателей }
  Nad:=StrToInt(Form1.Edit4.Text);
  { заполнение листа отображения графиков }
  for i:=1 to Nad do
    begin

Form1.CheckListBox1.Items.Add('АД'+IntToStr(i));
     Form1.CheckListBox1.Checked[i-1]:=True;
    end;
  {заполнение шапки таблицы с параметрами двига-
телей }
   With Form1.StringGrid1 do
    begin
     Cells[0,0]:='№';
     Cells[1,0]:='Us,B';
```

```
      Cells[2,0]:='Rs,Ом';
      Cells[3,0]:='Rr,Ом';
      Cells[4,0]:='Xs,Ом';
      Cells[5,0]:='Xr,Ом';
      Cells[6,0]:='Xm,Ом';
      Cells[7,0]:='p';
      Cells[8,0]:='w,1/c';
      Cells[9,0]:='J,кг*м2';
     end;
{ заполнение таблицы с параметрами двигателей }
   for i:=1 to Nad do
     With Form1.StringGrid1 do
       begin
         Cells[0,i]:=IntToStr(i);
         Cells[1,i]:='537';
         Cells[2,i]:='0.536';
         Cells[3,i]:='0.406';
         Cells[4,i]:='1.1';
         Cells[5,i]:='1.12';
         Cells[6,i]:='35';
         Cells[7,i]:='2';
         Cells[8,i]:='157';
         Cells[9,i]:='0.175';
       end;
{ заполнение таблицы с временными интервалами }
   for i:=1 to Nad do
     With Form1.StringGrid2 do
       begin
        Cells[i,1]:='0.0';
        Cells[i,2]:='0.5';
        Cells[i,3]:='1';
       end;
{ заполнение шапки таблицы с временными интерва-
лами }
   With Form1.StringGrid2 do
    begin
      Cells[0,0]:='Вр.\Дв.';
      Cells[0,1]:='Пуск';
```

```
     Cells[0,2]:='Нагрузка';
     Cells[0,3]:='Стоп';
     for        i:=1        to        Nad        do
Cells[i,0]:='АД'+IntToStr(i);
    end;
{ заполнение таблицы "вид нагрузки" }
   With Form1.StringGrid3 do
    begin
     Cells[0,0]:='Р/Д';
     Cells[0,1]:='Пост.'; { Постоянная составля-
ющая }
     Cells[0,2]:='Вент.';{ Вентиляторная состав-
ляющая }
     Cells[0,3]:='Кв.';    { Квадратичная состав-
ляющая }
     for        i:=1        to        Nad        do
Cells[i,0]:='АД'+IntToStr(i);
     for  i:=1  to  Nad  do  for  j:=1  to  3  do
Cells[i,j]:='0';
    end;
   { заполнение таблицы "Нагрузка" }
   With Form1.StringGrid4 do
    begin
     Cells[0,0]:='Р/Д';
     Cells[0,1]:='Пост.'; { Постоянная составля-
ющая }
     Cells[0,2]:='Вент.';  {  Вентиляторная  со-
ставляющая }
     Cells[0,3]:='Кв.';    { Квадратичная состав-
ляющая }
     for        i:=1        to        Nad        do
Cells[i,0]:='АД'+IntToStr(i);
     for i:=1 to Nad do
       begin
        Cells[i,1]:='50';
        Cells[i,2]:='5';
        Cells[i,3]:='50';
       end;
```

```
    end;
   { нажать кнопку "Применить" }
   Form1.Button1Click(Sender);
end;
end.
```

4. ОПИСАНИЕ ШАБЛОНА ПРИЛОЖЕНИЯ

Представленное приложение является шаблоном, по которому студенты должны разработать свое приложение, выполняющее моделирование электромеханических процессов, происходящих в системе «асинхронные электродвигатели – кабельная сеть».

Приложение включает в себя одно окно с группирующими рамками (GroupBox), имеющими названия (свойство Caption). В рамке «Структура электропривода» представлено графическое изображение электрических соединений электропривода. Для задания структуры электропривода служит параметр «Количество двигателей». Вводится этот параметр в «окно редактирования» (Edit). Затем для обновления информации нажимается кнопка «Применить». В результате нажатия кнопки изменяется структура таблиц формы и графическое изображение структуры электропривода. Таблица «Параметры двигателей» необходима для задания параметров каждого двигателя многодвигательного электропривода: *Us* – амплитуда напряжения фазы статора в системе координат *α-β*; *Rs*, *Rr* – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора; *Xs*, *Xr* – индуктивные сопротивления рассеяния фаз обмоток статора и ротора; *Xm* – индуктивное сопротивление воздушного зазора; p – число пар полюсов обмотки статора; *w* – номинальная угловая частота вращения ротора АД. Таблица «Временные интервалы» определяет значения времени, при которых происходит: «Пуск» – неуправляемый пуск; «Нагрузка» – подача нагрузки на вал соответствующего АД; «Останов» – останов соответствующего АД. Таблица «Вид нагрузки» определяет характер нагрузки на валу соответствующего АД: Mc = a = const (Пост.); $M_c = b*\omega^2$ (Вент.); $M_c = c*sign(sin(12t))$ (Кв.). Таблица «Нагрузка» определяет значение нагрузки: a (Пост.), b (Вент.), c (Кв.).

В рамке «Параметры кабельной сети» задаются параметры кабеля: длина (км), погонное индуктивное сопротивление X_k (Ом/км), погонное активное сопротивление R_k (Ом/км).

Длительность времени симуляции устанавливается в рамке «Прогресс симуляции». Управление пуском и остановом симуляции также выполняется в этой рамке соответствующими кнопками.

Вывод графической информации выполняется в рамке с графиками, не имеющей особого названия. На вкладке «Момент» расположен график электромагнитного момента. На вкладке «Скорость» отображается круговая частота вращения ротора АД. На вкладке «Амплитуда напряжения статора» изображена амплитуда напряжения подводимого к статору АД (за вычетом падения напряжения в кабеле).

Рамка «Отображение» располагает «рамкой тестирования» (CheckBox), в которой галочкой отмечается отображение графиков соответствующего АД.

Порядок работы с приложением:

1. Задание количества двигателей.
2. Нажатие кнопки «Применить» для применения изменений структуры.
3. Изменение параметров двигателей, нагрузки и кабеля в соответствующих таблицах.
4. Задание времени симуляции.
5. Нажатие кнопки «Пуск» для начала симуляции.
6. После окончания процесса симуляции сохраняем изображения графиков при помощи снимка формы.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Назначение студентам варианта лабораторной работы, в соответствии с которым выбирается тип и параметры электродвигателей из табл. 1, а также тип и параметры кабелей из табл. 2.

2. Составление структурной схемы модели асинхронного электропривода и повторение теоретического материала по данной теме. Занесение краткого конспекта (2 стр.) по теме лабораторной работы и структурной схемы в отчет по лабораторной работе.

3. Разработка приложения в среде LAZARUS на основе приведенного в данных методических указаниях шаблона (не менее

3 стр.). Разработка сопроводительной документации к приложению для облегчения в дальнейшем работы пользователей.

4. Проведение вычислительного эксперимента с целью изучения характеристик многодвигательного асинхронного электропривода в заданном режиме работы.

В результате проведенных вычислительных экспериментов должны быть сняты временные зависимости частоты вращения ротора и электромагнитного момента АД, а также амплитуда напряжения статоров АД. Студенты должны проанализировать результаты компьютерной симуляции и сделать выводы о влиянии параметров двигателей, кабелей и нагрузки на условия работы многодвигательного асинхронного электропривода. Пояснения, графики и выводы заносятся в отчет по лабораторной работе (не менее 6 стр.).

Таблица 1

Параметры асинхронных электродвигателей

	ДКВ45	**ДКВ250КМ**	**ДКВ315L4**	**ДКВ315L4/12**	**ДКВ355L4/12**	**АВР280L4**	**ДКВ355LВ4**
Рн, кВт	45	200	200	160/55	200/65	160	315
Uн, В	1140	1140	1140	1140	1140	1140	1140
Iн, А	29,8	121	125	110/68	127/89	102,9	186
Rs, Ом	0,82	0,087	0,071	0,18/0,64	0,089/0,31	0,072	0,054
Xs, Ом	1,96	0,448	0,423	0,478/1,12	0,323/0,775	0,405	0,183
Rr’, Ом	0,68	0,060	0,111	0,034/0,15	0,041/0,189	0,091	0,047
Xr’, Ом	3,14	0,398	0,684	0,453/2,04	0,372/1,745	0,682	0,287
Xm, Ом	50,6	15,0	15,1	10,2/9,85	11,0/7,622	14,6	10,8
Ki	5,3	7,9	6,2	7,5/3,8	8,2/3,47	8,0	10,0
Км	2,15	3,5	2,5	3,4/2,5	3,94/2,87	3,2	3,9
Кп	2,1	1,5	2,5	1,8/1,9	2,6/2,72	3,3	4,0
cos(φ)	0,846	0,88	0,86	0,8/0,5	0,85/0,45	0,833	0,9
КПД	90,0	94,0	93,7	92,5/81,6	93,0/81,9	94,2	94,6
I0, А	11,3	42,6	42,5	62,0/60,0	58,3/78,6	44,0	60,0
J, кг·м^2	0,31	2,1	2,88	2,88	4,69	2,42	4,69

Таблица 2

Параметры кабелей

Сечение жилы, мм^2	Погонное сопротивление, Ом/км		
	Активное бронированного и гибкого кабелей при 20 °С	Индуктивное бронированного кабеля на напряжение до 1000 В	Индуктивное гибкого кабеля на напряжение до 1000 В
35	0,52/0,539	0,064	0,084
50	0,37/0,394	0,063	0,081
70	0,26/0,281	0,061	0,079
95	0,194/0,202	0,060	0,078
120	0,153/0,163	0,060	0,076

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Электронный ресурс]: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для электротехн. и энергет. специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6
МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ В СРЕДЕ LAZARUS

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Цель работы: изучение основных вариантов управления состоянием асинхронных электродвигателей.

Задачи работы:

1. Получить навыки моделирования управляемых электромеханических систем при помощи сред быстрой разработки приложений.
2. Получить навыки применения численных методов для решения задач моделирования электропривода.
3. Научиться синтезировать конструкции управляющих устройств при помощи методов теории оптимального управления.
4. Научиться работать на среднем уровне в средах разработки приложений.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Модель одиночного асинхронного электродвигателя и методы численного решения систем дифференциальных уравнений рассматриваются в методических указаниях по моделированию одиночного асинхронного электродвигателя в среде LAZARUS. В данных методических указаниях будет дана модель системы: управляемый электрический преобразователь – асинхронный электродвигатель.

Существует множество вариантов управления состоянием асинхронной машины, которые можно разбить на группы:

- варианты управления с ориентацией вдоль векторов потоков статора и ротора;
- варианты прямого управления моментом;
- варианты скалярного управления;
- варианты оптимального частотного управления;
- варианты оптимального разрывного управления.

В 1925 г. академик М. П. Костенко сформулировал скалярный закон управления асинхронным двигателем (АД), обеспечивающий нормальные условия его работы при различных частотах вращения ротора и характере изменения нагрузки на валу. Этот закон положил начало развитию теории управления асинхронным электродвигателем и был сформулирован в следующем виде – относительное напряжение двигателя $\gamma = U/U_{ном}$ должно изменяться пропорционально произведению относительной частоты $\alpha = f/f_{ном}$ на квадратный корень от величины относительного момента сопротивления

$$\gamma = \alpha\sqrt{\mu},$$

где $\mu = M_c/M_{ном}$ – относительное значение момента сопротивления.

Недостатками вариантов скалярного управления являются: небольшой диапазон регулирования частоты вращения (D = 1 : 3) и неудовлетворительные динамические характеристики. Область применения скалярных законов управления: электроприводы насосных и воздуходувных станций, а также конвейеров малой протяженности.

Методы управления с ориентацией по векторам потоков основаны на координатных преобразованиях системы уравнений, описывающей электрическое состояние машины переменного тока, широко используемых для анализа переходных процессов. Так в 1929 г. для упрощения анализа переходных процессов Р. Х. Парк (R. H. Park) представил уравнения синхронной машины во вращающейся системе координат d-q. А. А. Горев также использовал вращающуюся систему координат, связанную с ротором, для исследования переходных процессов синхронных машин.

Зарождение управления с ориентацией по вектору потока можно отнести к 1964 г., когда Пфафф (Pfaff) исследовал динамику асинхронного двигателя, получающего питание от источника напряжения переменной частоты. Эти публикации совместно с работами Ковача и Раца были кирпичиками для концепции управления с косвенной ориентацией по вектору потока ротора (Indirect Field-Oriented Control – IFOC), представленной К. Хассом (K. Hasse) в 1968 году.

Позже в 1971 г. в компании Сименс (Siemens) Ф. Блашке (F. Blaschke) разработал принцип управления с прямой ориентацией по вектору потока ротора (Direct FOC – DFOC). В отечественной

литературе этот метод управления известен как «векторное управление». В соответствии с этим принципом движения рассматриваются не в стационарной системе координат, а в системе координат Парка-Горева, связанной с потокосцеплением ротора. В этой системе координат все основные переменные изменяются не по гармоническому закону, а как в двигателе постоянного тока (ДПТ). Это позволило строить системы управления АД по тем же принципам, что и системы управления ДПТ, в частности, по подчиненному принципу. Заданный момент и амплитуда потока ротора достигаются при помощи регулирования продольной и поперечной составляющих вектора тока статора. В качестве регуляторов составляющих вектора тока используются пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ).

На рис. 1 показана структурная схема системы косвенного полеориентированного управления (IFOC) с заданием частоты вращения ротора.

На рисунке обозначено: РТ – регуляторы тока; ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции; АД – асинхронный двигатель; ДС – датчик скорости; ПЧ – силовая часть преобразователя частоты.

Внешний контур регулирования частоты вращения воздействует на поперечную составляющую тока статора (i_{sq}). При этом контур регулирования потока ротора воздействует на продольную составляющую тока статора (i_{sd}). По заданным значениям составляющих вектора тока статора (i_{sq}*, i_{sd}*) вычисляется заданная частота тока ротора (ω_r*), которая затем суммируется с электрической частотой вращения ротора АД ($p\omega$), и в результате получается частота поля ротора. Затем для преобразования вектора напряжения из системы координат d-q в α-β вычисляется угол вектора потока ротора (θ_r). Составляющие вектора напряжения статора в системе координат α-β ($U_{s\alpha}$*, $U_{s\beta}$*) подаются в блок ШИМ, в котором преобразуются в дискретные сигналы S_a, S_b и S_c, подводимые к силовым ключам ПЧ.

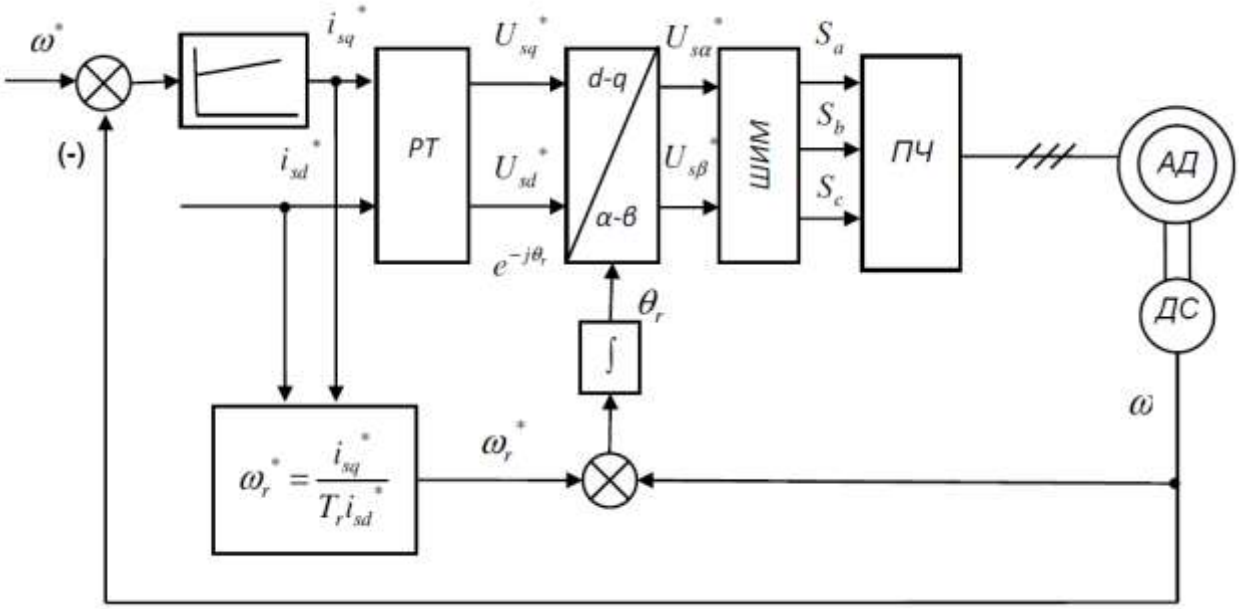


Рисунок 1. Структурная схема системы IFOC

В отличии от системы косвенного полеориентированного управления в DFOC используются непосредственно значения амплитуды вектора потока ротора ($|\boldsymbol{\Psi}_r|$) и его электрического угла (θ_r). Достоинством системы является меньшая чувствительность к изменению параметров АД, чем в схеме IFOC. Но есть и недостаток – это необходимость оценивания составляющих вектора потока ротора. На рис. 2 показана структурная схема DFOC, где оценка угла и амплитуды вектора потока ротора производится при помощи наблюдателя, основанного на модели АД. Входными величинами наблюдателя являются составляющие векторов тока и напряжения статора по осям системы координат α-β, а также значение частоты вращения ротора двигателя.

На рис. 2 обозначено: РС – регулятор скорости; ПФ – блок, реализующий фазные преобразования (преобразования Кларка).

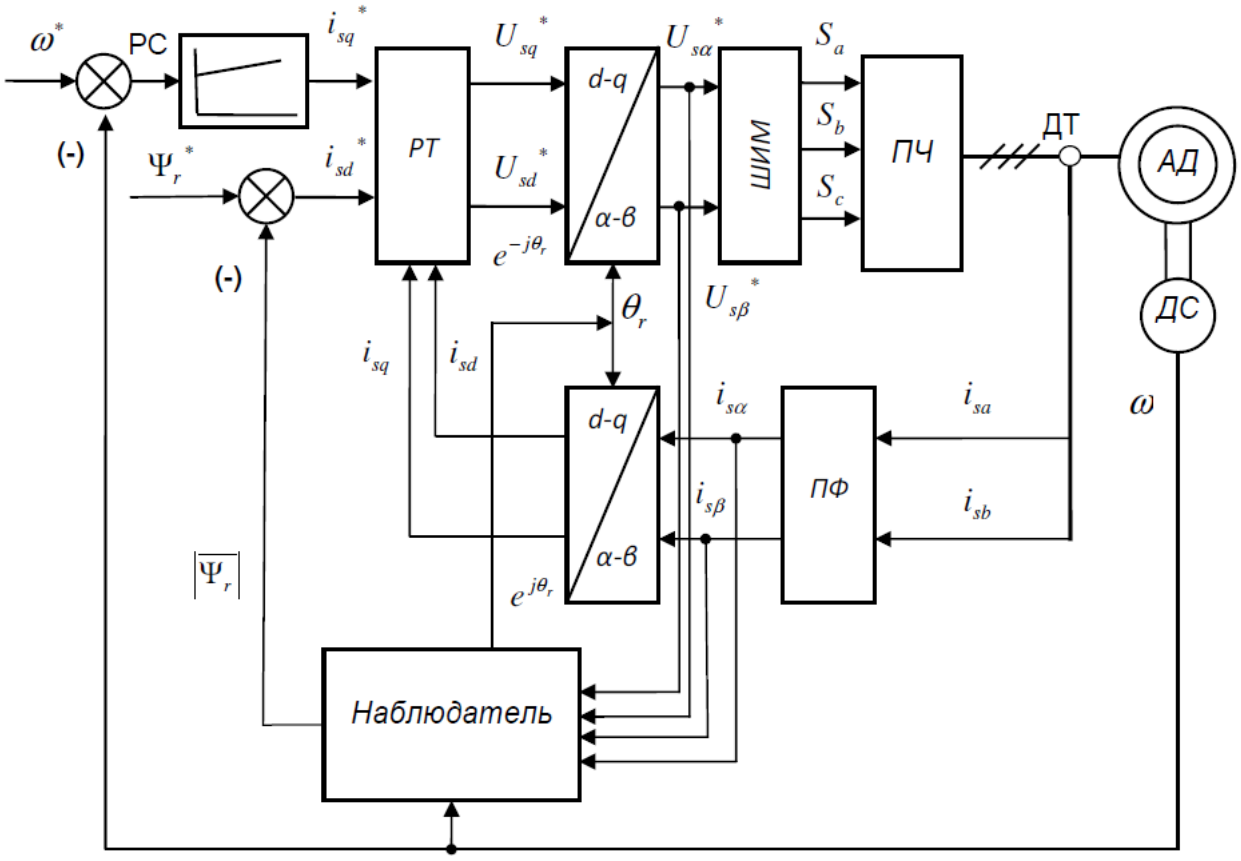


Рисунок 2. Структурная схема DFOC

Для расчета составляющих вектора тока статора в системе координат *α-β* необходимо измерить ток в двух фазах двигателя (i_{sa}, i_{sb}). Ток третьей фазы определяется таким образом: $i_{sc} = -(i_{sa} + i_{sb})$. В блоке ПФ используются следующие уравнения

$$i_{s\alpha} = i_{sa},$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(i_{sb} - i_{sc}\right).$$

Затем наблюдатель состояния на основе значений составляющих токов и напряжений в системе координат *α-β* определяет амплитуду ($|\mathbf{\Psi}_r|$) и угол (θ_r) результирующего вектора потока ротора. В блоке $e^{j\theta r}$ производится вычисление составляющих вектора тока статора (i_{sd}, i_{sq}) в системе координат d-q, неподвижно связанной с вектором потока ротора. На основе вычисленного и заданного значений амплитуды потока ротора ($|\mathbf{\Psi}_r|$, Ψ_r*) формируется сигнал задания тока по продольной оси (i_{sd}*). Разность заданного и измеренного значений частоты вращения ротора двигателя подается на

регулятор скорости (РС), который формирует сигнал задания электромагнитного момента или тока статора по поперечной оси (i_{sq}*).

Достоинства систем управления с ориентацией по вектору потока:

- диапазон регулирования частоты вращения ротора может достигать *D = 1000 : 1*;
- высокое качество управления электромагнитным моментом и потоками в переходных режимах.

Недостатки систем управления с ориентацией по вектору потока:

- необходимость оценки составляющих векторов потока статора и ротора;
- быстродействие контура управления электромагнитным моментом ниже, чем в системах прямого управления моментом из-за инерционности контуров управления составляющими результирующего вектора тока статора;
- наличие прямых и обратных координатных преобразований;
- необходимость использования специальных алгоритмов ШИМ (пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция – SVPWM).

В середине 1980-х, когда большинство исследователей работало над улучшением методов управления с ориентацией вдоль векторов потоков двигателя, М. Депенброк (M. Depenbrock) представил метод «Прямое саморегулирование потока и крутящего момента электрической машины с вращающимся полем» (Direct Self Control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine). В это же время И. Такахаши (I. Takahashi) и Т. Ногучи (T. Noguchi) независимо от М. Депенброка предлагают метод «Прямое управление моментом» (Direct Torque Control), который отличается от DSC структурной реализацией и траекторией движения вектора потокосцепления. В отличие от метода управления FOC, который содержит блок широтно-импульсной модуляции и контур тока, DTC и DSC содержат релейные регуляторы, которые работают непосредственно с потоком статора и моментом без использования внутренних контуров тока.

В данных методических указаниях для объяснения методов управления используется следующая модель асинхронного электродвигателя

$$\frac{d\Psi_{su}}{dt} = U_{su} - R_s\left(\frac{\Psi_{su}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{ru}\right) + \omega_k\Psi_{sv},$$

$$\frac{d\Psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - R_s\left(\frac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'}\Psi_{rv}\right) - \omega_k\Psi_{su},$$

$$\frac{d\Psi_{ru}}{dt} = -R_r\left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right) + \left(\omega_k - p\omega\right)\Psi_{rv},$$

$$\frac{d\Psi_{rv}}{dt} = -R_r\left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right) - \left(\omega_k - p\omega\right)\Psi_{ru},$$

$$M = \frac{3}{2}p\frac{k_r}{L_s'}\left(\Psi_{sv}\Psi_{ru} - \Psi_{rv}\Psi_{su}\right),$$

где Ψ_{su}, Ψ_{sv}, Ψ_{ru}, Ψ_{rv} – составляющие результирующих векторов потоков статора и ротора в системе координат *u-v*, вращающейся с произвольной круговой частотой ω_k; U_{su}, U_{sv} – составляющие результирующего вектора напряжения статора в системе координат *u-v*; k_s, k_r, L_s', L_r' – коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора, а также переходные индуктивности статора и ротора; p – число пар полюсов; ω – частота вращения ротора; M – электромагнитный момент.

В 1984 г. М. Депенброк подал заявку на патент на изобретение, которое назвал Direct Self Control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine (сокращенно DSC). Идея М. Депеброка заключалась в формировании электромагнитного момента путем изменения положения вектора потока статора в заданном направлении. Если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении статора двигателя в виду его относительной малости, то можно получить следующее выражение для вектора потока статора

$$\boldsymbol{\Psi}_s = \int \boldsymbol{U}_s dt,$$

где $\boldsymbol{\Psi}_s = \Psi_{su} + j\Psi_{sv}$; Ψ_{su}, Ψ_{sv} – составляющие вектора потока статора.

Значит, для изменения потока статора в заданном направлении необходимо сформировать вектор напряжения в этом направлении. Величина приращения вектора потока статора определяется временем воздействия и амплитудой вектора напряжения. Изменение по-

ложения вектора потока статора способствует изменению электромагнитного момента двигателя в соответствии с выражением

$$M = \frac{3}{2} p |\boldsymbol{\Psi}_s| |\boldsymbol{\Psi}_r| \sin(\delta) \approx \frac{3}{2} p |\boldsymbol{\Psi}_s| |\boldsymbol{\Psi}_r| \delta ,$$

где $\boldsymbol{\Psi}_r$ – вектор потока ротора; δ – угол между векторами потоков статора и ротора.

Отсюда следует, что изменение электромагнитного момента возможно или при увеличении амплитуд векторов потоков, или при изменении угла δ. КПД асинхронного электродвигателя максимален при номинальном значении амплитуд векторов потоков, а, значит, регулирование электромагнитного момента должно производится при помощи изменения угла δ. В большинстве случаев для питания асинхронного электродвигателя используют автономный инвертор напряжения, выполненный по мостовой схеме (рис. 3).

На рис. 3 обозначено: $SW_{1..6}$ – ключи инвертора; U_{dc} – напряжение шины постоянного тока; L_a, L_b, L_c – обмотки статора АД.

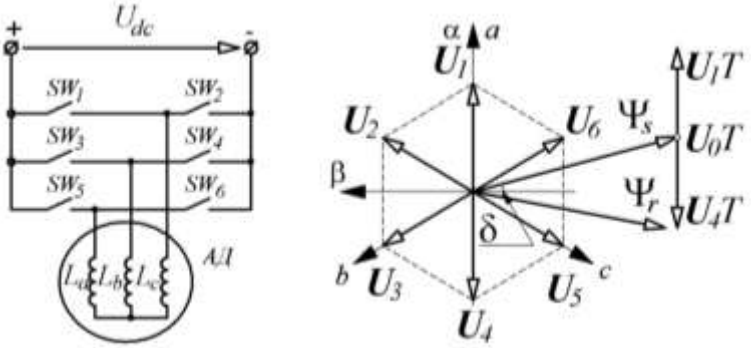


Рисунок 3. Структурная схема автономного инвертора напряжения и векторы напряжения, которые он формирует

Если принять, что АД симметричен, т. е. активные и индуктивные сопротивления фаз равны, то трехфазный мостовой инвертор может сформировать 8 векторов напряжения, два из которых нулевые (U_0, U_7). В табл. 1 показаны состояния ключей инвертора и соответствующие им составляющие векторов напряжения в неподвижной двухфазной и трехфазной системах координат.

В табл. 1 обозначено: U_{dc} – напряжение на входе инвертора; 1 – включен ключ SW_1, SW_3 или SW_5; 0 – включен ключ SW_2, SW_4 или SW_6.

Таблица 1

Состояние ключей инвертора

Вектор	SW_1–SW_2	SW_3–SW_4	SW_5–SW_6	U_α	U_β	U_a	U_b	U_c
U_0	0	0	0	0	0	0	0	0
U_1	1	0	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0	$\frac{2}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$
U_2	1	1	0	$\frac{1}{\sqrt{6}}U_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{2}{3}U_{dc}$
U_3	0	1	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}U_{dc}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$
U_4	0	1	1	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0	$-\frac{2}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$
U_5	0	0	1	$-\frac{1}{\sqrt{6}}U_{dc}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{1}{3}U_{dc}$	$\frac{2}{3}U_{dc}$
U_6	1	0	1	$\frac{1}{\sqrt{6}}U_{dc}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$	$-\frac{2}{3}U_{dc}$	$\frac{1}{3}U_{dc}$
U_7	1	1	1	0	0	0	0	0

При воздействии нулевого вектора напряжения приращение потока не происходит (***U***$_0t$ на рис. 3), а за счет падения напряжения на активном сопротивлении статора он незначительно убывает. Кроме того, поток ротора по инерции продолжает движение в первоначальном направлении. Это приводит к уменьшению угла между потоками статора и ротора, и, соответственно, к уменьшению электромагнитного момента.

При формировании активного вектора напряжения статора в направлении, согласном движению вектора потока ротора, происходит увеличение угла δ (***U***$_1t$ на рис. 3), а значит и электромагнитного момента двигателя. При формировании активного вектора напряжения статора в направлении, обратном движению вектора потока ротора, происходит увеличение угла δ (***U***$_4t$ на рис. 3), а значит и электромагнитного момента двигателя. Метод управления DSC поясняется структурной схемой, представленной на рис. 4, где введены следующие обозначения: *ДН* – датчики линейных напряжений; *И* – интеграторы; *М* – блок, вычисляющий абсолютные значения переменных; *ТШ* – триггеры Шмидта. М. Депенброк предложил формировать траекторию вектора потока статора таким образом, чтобы абсолютные значения составляющих вектора потока

по оси β не превышали заданного значения (Ψ_{ref}). Эти составляющие можно приближенно определить интегрированием линейных напряжений, подаваемых на двигатель (e_{bc}, e_{ca}, e_{ab}).

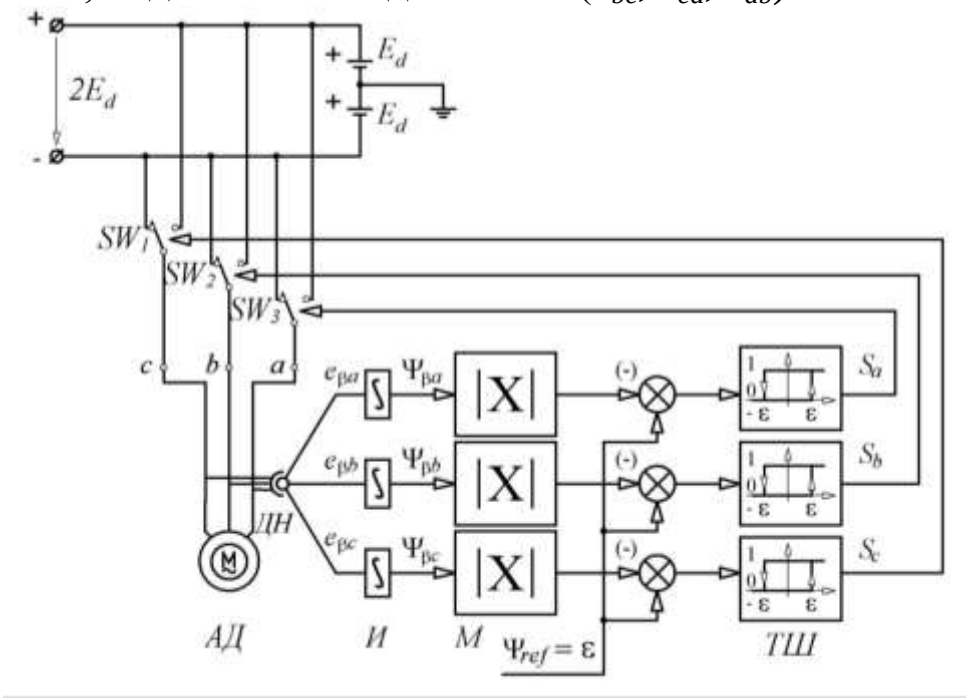


Рисунок 4. Основная схема DSC

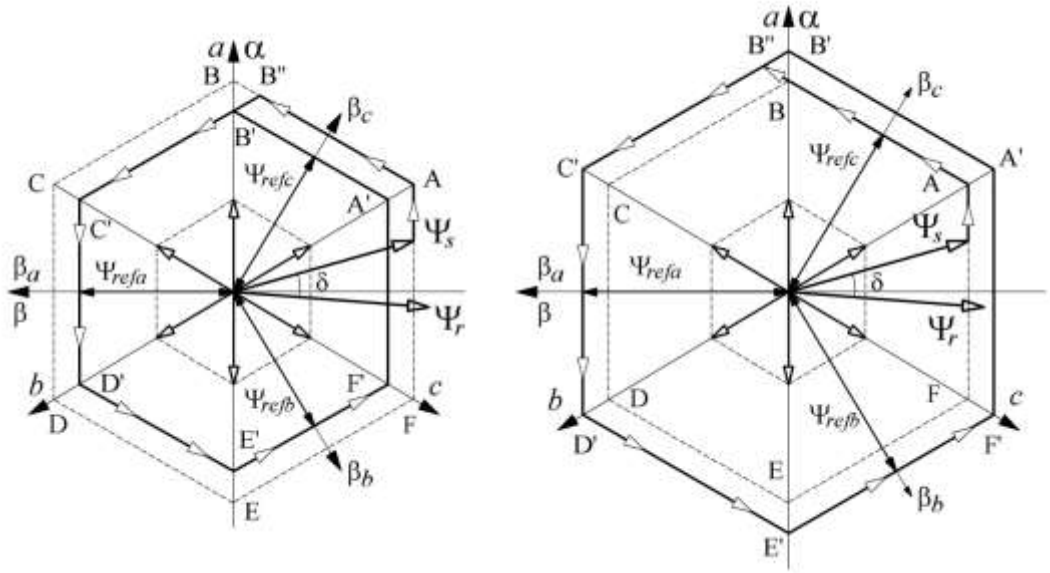


Рисунок 5. Диаграммы потока статора
при управлении по методу DSC

Таким образом, при реализации метода DSC инвертор формирует интегралы линейных напряжений путем воздействия на них линейными напряжениями (т. е. осуществляет «саморегулирова-

ние» – self control). Составляющие вектора ЭДС статора по оси β при совмещении оси α с соответствующими осями фаз a, b, c определяются следующим образом

$$e_{\beta a} = \frac{e_{bc}}{\sqrt{3}} \approx \frac{(U_b - U_c)}{\sqrt{3}},$$

$$e_{\beta b} = \frac{e_{ca}}{\sqrt{3}} \approx \frac{(U_c - U_a)}{\sqrt{3}},$$

$$e_{\beta c} = \frac{e_{ab}}{\sqrt{3}} \approx \frac{(U_a - U_b)}{\sqrt{3}}.$$

Составляющие вектора ЭДС статора интегрируются и получаются составляющие вектора потока статора по осям βa, βb, βc ($\Psi_{\beta a}$, $\Psi_{\beta b}$, $\Psi_{\beta c}$). Затем в блоке *М* определяются их абсолютные значения, которые отнимаются от Ψ_{ref}. Полученные на сумматорах значения подаются на *ТШ*, где сигнал формируется по правилам

$$S_a = \begin{cases} 1, \ \Psi_{ref} - |\Psi_{\beta a}| > \varepsilon, \\ 0, \ \Psi_{ref} - |\Psi_{\beta a}| < -\varepsilon, \end{cases} \quad S_b = \begin{cases} 1, \ \Psi_{ref} - |\Psi_{\beta b}| > \varepsilon, \\ 0, \ \Psi_{ref} - |\Psi_{\beta b}| < -\varepsilon, \end{cases} \quad S_c = \begin{cases} 1, \ \Psi_{ref} - |\Psi_{\beta c}| > \varepsilon, \\ 0, \ \Psi_{ref} - |\Psi_{\beta c}| < -\varepsilon, \end{cases}$$

где $\varepsilon = \Psi_{ref}$ – ширина петли гистерезиса *ТШ*.

Если сигнал на выходе *ТШ* равен 1, то включается правое положение ключа *SW*, если 0, то левое. При этом происходит формирование траектории вектора потока статора в виде шестиугольника. На рис. 5 показаны траектории вектора потока статора при изменении задания Ψ_{ref}. При этом до изменения задания вектор движется по траектории *ABCDEF*, а затем – по траектории *A'B'C'D'E'F'*. Процесс перехода с одной траектории на другую происходит в точке *B''*.

На рис. 5 введены обозначения: βa, βb, βc – оси, перпендикулярные осям a, b, c; $\Psi_{ref} = \Psi_{ref\,a} = \Psi_{ref\,b} = \Psi_{ref\,c}$ – заданные значения составляющих вектора потока статора по осям βa, βb, βc.

Для увеличения электромагнитного момента М. Депенброк предложил формировать активный вектор в соответствии со структурной схемой на рис. 4, а для уменьшения – формировать нулевой вектор напряжения. Полная структурная схема системы управления, реализующей DSC, показана на рис. 6, где обозначено: *ИН* – трехфазный мостовой инвертор напряжения; *ПФ* – блок фазных преобразований; *ТШ* – триггеры Шмидта; *ВМ* – блок вычисления электромагнитного момента; *ВНС* – блок вычисления нулевого по-

ложения ключей; *ВС* – блок выбора сигнала управления; *ДН, ДТ* – датчики напряжения и тока соответственно.

В соответствии с полной структурной схемой DSC процесс управления электромагнитным моментом АД происходит следующим образом. Вначале определяются составляющие вектора потока статора в системе координат *α-β*, затем эти составляющие используются для определения электромагнитного момента и составляющих вектора потока статора в трехфазной системе координат *βa-βb-βc*. Затем в блоке *ТШ* определяются логические сигналы управления ключами инвертора (S_a', S_b', S_c'). Если заданный момент меньше момента действительного, то применяется нулевое состояние ключей инвертора, формируемое в блоке *ВНС*. Если момент необходимо увеличить, то применяется активное состояние ключей, формируемое в блоке *ТШ*.

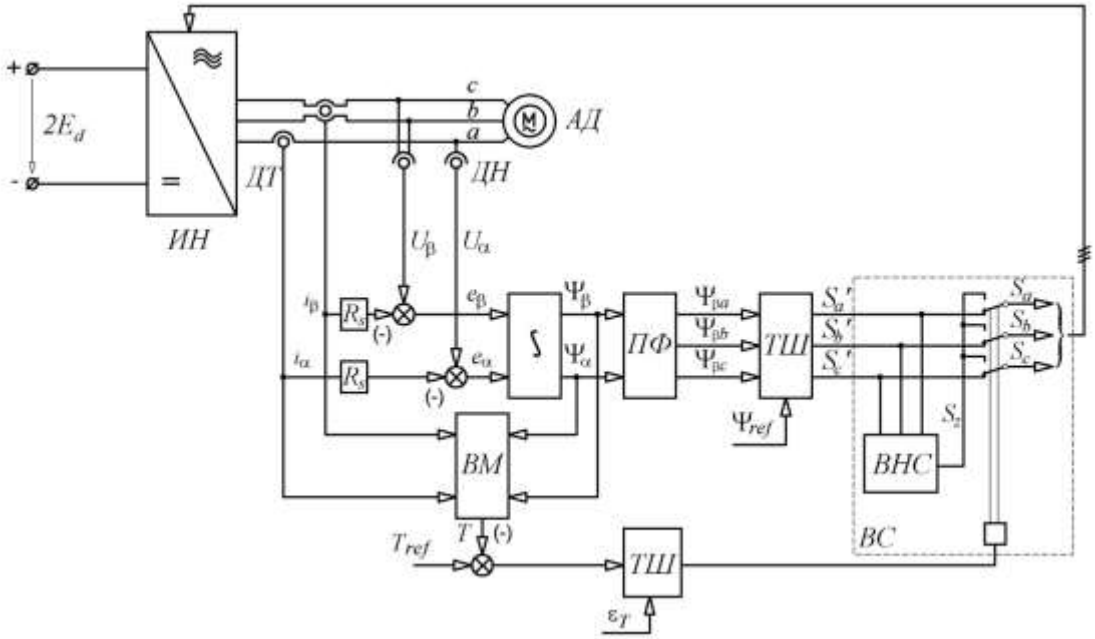


Рисунок 6. Полная структурная схема DSC

Достоинства DSC:

- быстрое изменение электромагнитного момента;
- формируемый электромагнитный момент не зависит от частоты вращения электродвигателя и нагрузки;
- полное использование возможностей инвертора;
- низкая частота коммутации ключей инвертора, а следовательно, возможность применения в тяговых электроприводах;

Недостатки DSC:

- большой размах колебаний электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора;
- большая амплитуда импульсов тока, вызванная шестиугольной траекторией движения вектора потока статора.

Несколькими месяцами позже публикации заявки М. Депенброка, И. Такахаши и Т. Ногучи опубликовали работу «A New Quick-Response and Hight-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor», в которой предложили новый вариант управления электромагнитным моментом и потоком статора АД. Их идея также заключалась в формировании заданного электромагнитного момента путем прямого воздействия на вектор потока вектором напряжения. Однако в работе Такахаши и Ногучи предложен другой алгоритм выбора векторов напряжения, в частности, для снижения электромагнитного момента применяется как нулевой, так и ненулевой вектор напряжения, которые выбираются из таблицы переключения (табл. 2), заложенной в EPROM. В зависимости от выбранного вектора напряжения открывается определенная группа ключей инвертора (табл. 1). Для упрощения выбора векторов напряжения координатное пространство разбивается на шесть секторов (на рис. 5 показаны римскими цифрами). Если вектор потока статора находится в шестом секторе (VI), то для увеличения амплитуды вектора потока статора необходимо использовать векторы напряжения $\boldsymbol{U_1}$ и $\boldsymbol{U_5}$. Если при этом необходимо увеличить момент, то применяется вектор $\boldsymbol{U_1}$, в противном случае – применяется вектор $\boldsymbol{U_5}$.

При управлении по методу DTC траектория движения вектора потока статора описывает фигуру, форма которой приближается к окружности с заданной точностью ε_Ψ (рис. 8), что способствует лучшим условиям электромагнитной совместимости преобразователя. На рис. 9 показана структурная схема устройства управления, предложенного И. Такахаши и Т. Ногучи, где использованы сокращения: *ВА* – блок вычисления амплитуды вектора потока статора, *ВС* – блок вычисления сектора, в котором расположен вектор потока, *РП* и *РМ* – регуляторы потока и момента соответственно. В соответствии со структурной схемой на рис. 7 метод управления DTC реализуется следующим образом. Вначале измеряют токи и напря-

жения фаз статора электродвигателя и вычисляют составляющие результирующих векторов напряжения (U_α, U_β) и тока (i_α, i_β) статора в системе координат α-β. Затем вычисляют составляющие вектора потока статора в системе координат α-β (Ψ_α, Ψ_β). На основе Ψ_α, Ψ_β и i_α, i_β вычисляют значение электромагнитного момента T (блок ВМ), номер сектора θ(N) (блок ВС) и амплитуду вектора потока статора Ψ (блок ВА). Вычисленные значения электромагнитного момента (T) и амплитуды вектора потока статора Ψ сравниваются с заданными (T_{ref}, Ψ_{ref}). Затем ошибки регулирования электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора подаются на входы релейных регуляторов потока (*РП*) и момента (*РМ*).

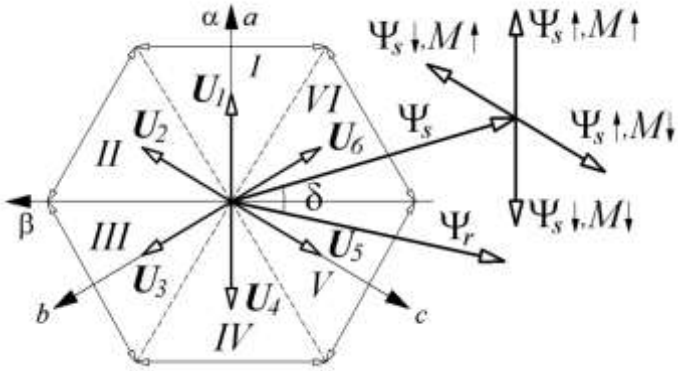


Рисунок 7. Управление моментом и потоком
по методу DTC Такахаши и Ногучи

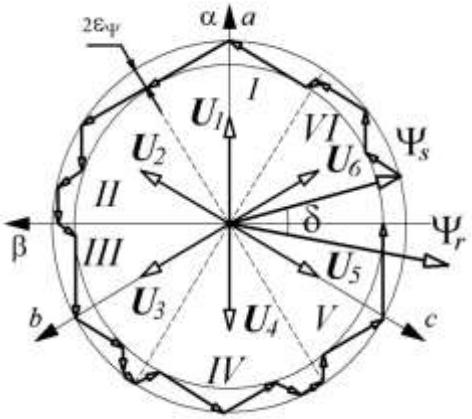


Рисунок 8. Траектория вектора потока статора
при использовании метода DTC Такахаши и Ногучи

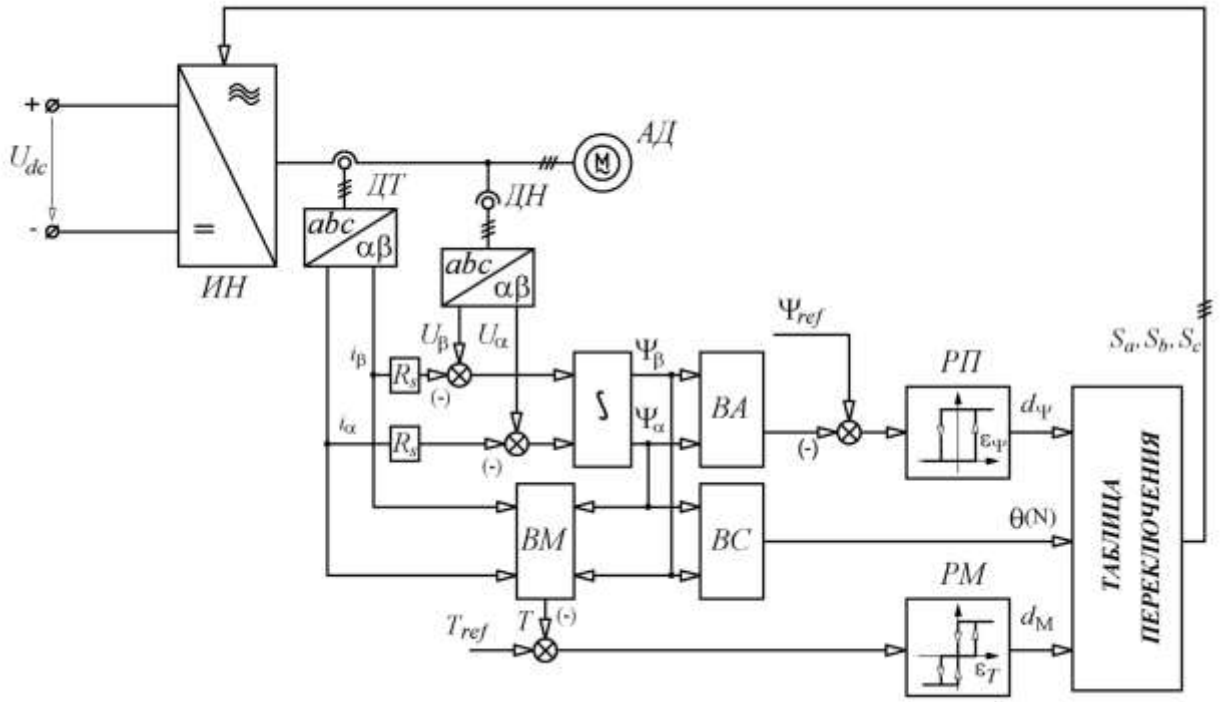


Рисунок 9. Структурная схема DTC Такахаши и Ногучи

На основе сигналов с выходов РП и РМ (d_Ψ, d_M), а также номера сектора θ(N) в таблице переключения (табл. 2) выбирается соответствующая ячейка, в которой заложены значения сигналов управления ключами инвертора *ИН* (S_a, S_b, S_c). Сигналы управления S_a, S_b, S_c подаются на управляющие входы инвертора, который создает заданный вектор напряжения.

Недостатки DTC:

- высокая частота коммутации ключей инвертора;
- большой размах колебаний электромагнитного момента и амплитуды вектора потока статора;
- неполное использование возможности инвертора.

Достоинства метода DTC:

- хорошие условия электромагнитной совместимости преобразователя благодаря круговой траектории движения вектора потока статора;
- быстрое изменение электромагнитного момента.

Таблица 2

Таблица переключения

Секторы $\theta(N)$		$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
$d_\Psi = 1$	$d_M = 1$	$U_2(110)$	$U_3(010)$	$U_4(011)$	$U_5(001)$	$U_6(101)$	$U_1(100)$
	$d_M = 0$	$U_7(111)$	$U_0(000)$	$U_7(111)$	$U_0(000)$	$U_7(111)$	$U_0(000)$
	$d_M = -1$	$U_6(101)$	$U_1(100)$	$U_2(110)$	$U_3(010)$	$U_4(011)$	$U_5(001)$
$d_\Psi = 0$	$d_M = 1$	$U_3(010)$	$U_4(011)$	$U_5(001)$	$U_6(101)$	$U_1(100)$	$U_2(110)$
	$d_M = 0$	$U_0(000)$	$U_7(111)$	$U_0(000)$	$U_7(111)$	$U_0(000)$	$U_7(111)$
	$d_M = -1$	$U_5(001)$	$U_6(101)$	$U_1(100)$	$U_2(110)$	$U_3(010)$	$U_4(011)$

где $U_x(S_aS_bS_c)$, $x = 0...7$.

Развитие теории управления электроприводами с АД в последние годы сводится к усовершенствованию вариантов управления, полученных из двух идей: ориентирование по полю и прямое управление моментом и потоками. Применение теории оптимального управления к задаче управления АД представляет большие трудности в виду нелинейности и сложности объекта управления. Но, несмотря на это, существует несколько работ в этом направлении, представляющие интерес для разработчиков систем управления состоянием электроприводов с АД.

Оптимальное управление электроприводами с АД, основанное на алгоритме скоростного градиента А. Л. Фрадкова, рассматривается в работах В. М. Завьялова и И. Ю. Семыкиной. Выражения для оптимальных управляющих воздействий представляют собой интегральные формы произведений разностей заданных и действительных значений электромагнитного момента, амплитуды вектора потока статора и составляющих вектора потока статора. Достоинства градиентного метода управления: отсутствие координатных преобразований; высокая статическая и динамическая точность канала регулирования электромагнитного момента. Недостатком градиентного метода управления является наличие операции интегрирования, которая порождает проблемы накопления ошибки в канале регулирования переменных.

Другой подход к оптимальному управлению электроприводами с АД развит в работе А. А. Колесникова и Г. Е. Веселова. Подход основан на синергетической теории оптимального управления. Полученные конструкции громоздки и трудно реализуемы на

практике, кроме того они предполагают использование прямых и обратных координатных преобразований, что дополнительно усложняет их реализацию. К достоинству относится высокое качество управления частотой вращения и углом поворота ротора (позиционирование).

Еще один подход к управлению состоянием АД носит название фазового принципа векторного управления. Это направление развито в работах В. А. Мищенко. Отличительной особенностью данного подхода является представление АД через систему дифференциальных уравнений, основанную на фазах и амплитудах векторов напряжений, токов и потоков. В связи с этим представлением электромагнитный момент становится инвариантным относительно активных сопротивлений обмоток статора, ротора и индуктивностей. Недостатками являются: громоздкость системы управления, включающей в себя векторный анализатор, векторный оптимизатор, векторный регулятор и векторный наблюдатель состояния АД; необходимость оценки фаз результирующих векторов АД; использование в конструкциях управляющих устройств тригонометрических функций.

Среди всех вариантов оптимального управления состоянием АД следует отметить варианты, развитые в работах Е. К. Ещина. Отличительной особенностью вариантов является универсальность конструкций управляющих устройств, а также инвариантность относительно систем координат. В работах Е. К. Ещина показано, что, используя различные методы теории оптимального управления (классическое вариационное исчисление, принцип максимума Л. С. Понтрягина, условия абсолютного минимума В. Ф. Кротова), можно прийти к одинаковым результатам. Результаты синтеза оптимальных устройств управления представляются в двух видах: непрерывное управление (управляющее воздействие – частота питающего напряжения), кусочно-непрерывное управление (управляющие воздействия – составляющие вектора напряжения). Недостатками описанных вариантов управления являются: управления формируются в ортогональной системе координат, что в случае управления трехфазным АД дополнительно усложняет систему управления; при непрерывном управлении необходимо определять параметры цепи ротора. Достоинствами оптимальных управляющих устройств являются: отсутствие операций интегрирования, отсут-

ствие координатных преобразований, простота конструкций управляющих устройств, минимум значений параметров, необходимых для реализации управления.

В теории классического вариационного исчисления приведены условия достижения экстремума функционала вида

$$J = \int_{x_0}^{x} F\left(x, y_1..y_n, y_1'..y_n'\right) dx,$$

в задаче с подвижными границами.

Основными из них являются уравнения Эйлера-Лагранжа и условия трансверсальности. Они записываются следующим образом

$$\begin{cases} F_{y_i} - \dfrac{d}{dx} F_{y_i'} = 0, \\ F - \sum\limits_{i=1}^{n} y_i' F_{y_i'} = 0, \\ \sum\limits_{i=1}^{n} F_{y_i'} = 0, \end{cases},$$

где $i = \overline{1,n}$, $F_{y_i} = \dfrac{\partial F}{\partial y_i}$, $F_{y_i'} = \dfrac{\partial F}{\partial y_i'}$.

Рассмотрим случай, когда целевой функционал не содержит производных. При этом условия обеспечения экстремума функционала перепишутся в виде $F_{yi} = 0$, $F = 0$, а сам функционал запишется следующим образом

$$J = \int_{t_0}^{t} f^0\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right) dt,$$

где $\boldsymbol{x} = \left(x^1, x^2, ..., x^n\right)$ – вектор-функция фазовых координат объекта; $\boldsymbol{u} = \left(u^1, u^2, ..., u^n\right)$ – вектор-функция управления.

При этом состояние объекта описывается совокупностью дифференциальных связей $\dot{\boldsymbol{x}} = f\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right)$, где $f = \left(f^1, f^2, ..., f^n\right)$, а точка вверху переменной означает операцию дифференцирования.

В новых обозначениях условия оптимальности перепишутся

$$\frac{\partial f^0\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right)}{\partial u_i} = 0, \quad \frac{\partial f^0\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right)}{\partial x_i} = 0, \quad f^0\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right) = 0.$$

Дифференцирование последнего выражения по времени дает

$$\frac{\partial f^0\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right)}{\partial u_i} \frac{du_i}{dt} + \frac{\partial f^0\left(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}\right)}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dt} = 0.$$

Из данного выражения следует, что для поиска конструкций оптимальных управляющих устройств возможно использование совокупностей произведений частных производных от подынтегрального выражения функционала по фазовым координатам на правые части уравнений движения. Это означает, что существует множество аналитических конструкций оптимальных управляющих устройств.

Рассмотрим в качестве примера задачу управления асинхронным электродвигателем. Целью управления будем считать обеспечение необходимого значения электромагнитного момента

$$J = \int_{t_0}^{t} \left(M_z - \frac{3}{2} p \frac{k_r}{L_s'} \left(\Psi_{sv} \Psi_{ru} - \Psi_{su} \Psi_{rv} \right) \right)^2 dt ,$$

где M_z – заданное значение электромагнитного момента асинхронного электродвигателя.

Совокупность дифференциальных связей представим в системе координат *u*-*v*, вращающейся с произвольной частотой ω_k

$$\frac{d\Psi_{su}}{dt} = U_{su} - R_s \left(\frac{\Psi_{su}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{ru} \right) + \omega_k \Psi_{sv},$$

$$\frac{d\Psi_{sv}}{dt} = U_{sv} - R_s \left(\frac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{rv} \right) - \omega_k \Psi_{su},$$

$$\frac{d\Psi_{ru}}{dt} = -R_r \left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'} \Psi_{su} \right) + \left(\omega_k - p\omega \right) \Psi_{rv},$$

$$\frac{d\Psi_{rv}}{dt} = -R_r \left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'} \Psi_{sv} \right) - \left(\omega_k - p\omega \right) \Psi_{ru}.$$

Управляющим воздействием примем частоту вектора напряжения статора, совпадающей с частотой вращения системы координат ω_k.

Образуем выражения

$$\frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{su}} = 3p \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{rv} \left(M_z - M \right), \quad \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{sv}} = -3p \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{ru} \left(M_z - M \right),$$

$$\frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{ru}} = -3p \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{sv} \left(M_z - M \right), \quad \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{rv}} = 3p \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{su} \left(M_z - M \right)$$

Составим произвольные связи

$$\frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{su}} f^3 + \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{sv}} f^4 = 0, \quad \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{ru}} f^3 + \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{rv}} f^4 = 0 .$$

Раскроем полученные связи

$$-3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{rv}\left(M_z-M\right)R_r\left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'}-\frac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right)+3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{rv}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\Psi_{rv}+$$

$$+3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{ru}\left(M_z-M\right)R_r\left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'}-\frac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right)+3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{ru}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\Psi_{ru}=$$

$$=3p\frac{k_r}{L_r'L_s'}R_r\left(M_z-M\right)\left(-\Psi_{rv}\left(\Psi_{ru}-k_s\Psi_{su}\right)+\Psi_{ru}\left(\Psi_{rv}-k_s\Psi_{sv}\right)\right)+$$

$$+3p\frac{k_r}{L_s'}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\left(\Psi_{rv}^{\ 2}+\Psi_{ru}^{\ 2}\right)=3p\frac{k_r}{L_r'L_s'}R_r\left(M_z-M\right)\left(k_s\Psi_{rv}\Psi_{su}-k_s\Psi_{ru}\Psi_{sv}\right)+$$

$$+3p\frac{k_r}{L_s'}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\left(\Psi_{rv}^{\ 2}+\Psi_{ru}^{\ 2}\right)=-2\frac{k_sR_r}{L_r'}M\left(M_z-M\right)+$$

$$+3p\frac{k_r}{L_s'}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\left(\Psi_{rv}^{\ 2}+\Psi_{ru}^{\ 2}\right)=0\Rightarrow\omega_k=p\omega+\frac{2R_rM}{3p\left(\Psi_{rv}^{\ 2}+\Psi_{ru}^{\ 2}\right)}.$$

$$3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{sv}\left(M_z-M\right)R_r\left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'}-\frac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right)-3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{sv}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\Psi_{rv}-$$

$$-3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{su}\left(M_z-M\right)R_r\left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'}-\frac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right)-3p\frac{k_r}{L_s'}\Psi_{su}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\Psi_{ru}=$$

$$=2R_rM\left(M_z-M\right)-3p\frac{k_r}{L_s'}\left(M_z-M\right)\left(\omega_k-p\omega\right)\left(\Psi_{sv}\Psi_{rv}-\Psi_{su}\Psi_{ru}\right)=0\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\omega_k=p\omega+\frac{2R_rL_s'M}{3pk_r\left(\Psi_{sv}\Psi_{rv}-\Psi_{su}\Psi_{ru}\right)}.$$

Управляющим воздействием является частота питающего напряжения, которая в данном случае совпадает с частотой вращения системы координат *u-v* ω_k. Регулируемой величиной является электромагнитный момент M, который в конце времени управления должен быть равен заданному. Отсюда следует, что для поддержания электромагнитного момента на заданном уровне частота питающего напряжения должна задаваться по следующим выражениям

$$\omega_0=p\omega+\frac{2R_rM_z}{3p\left(\Psi_{rv}^{\ 2}+\Psi_{ru}^{\ 2}\right)},$$

$$\omega_0=p\omega+\frac{2R_rL_s'M_z}{3pk_r\left(\Psi_{sv}\Psi_{rv}-\Psi_{su}\Psi_{ru}\right)}.$$

Данные регуляторы частоты вращения обеспечивают одинаковое качество управления электромагнитным моментом.

Принцип максимума Л. С. Понтрягина позволяет решить общую задачу управления состоянием асинхронного электродвигате-

ля. Для этого вначале необходимо задать цель управления в виде интегрального функционала

$$J = \inf \int_{t_0}^{t_1} f^0 dt,$$

где f^0 – функция выражающая цель управления.

Затем необходимо сформировать вспомогательную функцию

$$H = \psi_1 \left(U_{su} - R_s \left(\frac{\Psi_{su}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{ru} \right) + \omega_k \Psi_{sv} \right) +$$

$$+\psi_2 \left(U_{sv} - R_s \left(\frac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{rv} \right) - \omega_k \Psi_{su} \right) +$$

$$+\psi_3 \left(-R_r \left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'} \Psi_{su} \right) + \left(\omega_k - p\omega \right) \Psi_{rv} \right) +$$

$$+\psi_4 \left(-R_r \left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'} \Psi_{sv} \right) - \left(\omega_k - p\omega \right) \Psi_{ru} \right) +$$

$$+\psi_0 f^0,$$

где $\Psi_0 = -1$; f^0 – функция, выражающая цель управления.

Затем определяют составляющие вектор-функции Ψ из следующей системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \Psi_{su}} = \psi_1 \frac{R_s}{L_s'} + \psi_2 \omega_k - \psi_3 \frac{k_s R_r}{L_r'} + \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{su}},$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \Psi_{sv}} = -\psi_1 \omega_k + \psi_2 \frac{R_s}{L_s'} - \psi_4 \frac{k_s R_r}{L_r'} + \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{sv}},$$

$$\frac{d\psi_3}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \Psi_{ru}} = -\psi_1 \frac{k_r R_s}{L_s'} + \psi_3 \frac{R_r}{L_r'} + \psi_4 \left(\omega_k - p\omega \right) + \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{ru}},$$

$$\frac{d\psi_4}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \Psi_{rv}} = -\psi_2 \frac{k_r R_s}{L_s'} - \psi_3 \left(\omega_k - p\omega \right) + \psi_4 \frac{R_r}{L_r'} + \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{rv}}.$$

Полагая непрерывность функций управления, записывают еще два условия максимума

$$\frac{\partial H}{\partial U_{su}} = \psi_1 = 0, \ \frac{\partial H}{\partial U_{sv}} = \psi_2 = 0.$$

С учетом последнего находят:

$$\psi_3 = \frac{L_r'}{k_s R_r} \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{su}},$$

$$\psi_4 = \frac{L_r'}{k_s R_r} \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{sv}}.$$

Целью управления будем считать поддержание электромагнитного момента на заданном уровне

$$f^0 = \left(M_z - M\right)^2.$$

Тогда составляющие вектор-функции $\boldsymbol{\psi}$ определятся следующим образом:

$$\psi_1 = 0,\ \psi_2 = 0,$$

$$\psi_3 = \frac{L_r'}{k_s R_r}\frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{su}} = \frac{3p}{R_r}\Psi_{rv}\left(M_z - M\right),$$

$$\psi_4 = \frac{L_r'}{k_s R_r}\frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{sv}} = -\frac{3p}{R_r}\Psi_{ru}\left(M_z - M\right).$$

Условием оптимальности процесса управления считают условие $H = 0$. Раскроем данное условие:

$$H = \frac{3p}{R_r}\Psi_{rv}\left(M_z - M\right)\left(-R_r\left(\frac{\Psi_{ru}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{su}\right) + \left(\omega_k - p\omega\right)\Psi_{rv}\right) -$$

$$-\frac{3p}{R_r}\Psi_{ru}\left(M_z - M\right)\left(-R_r\left(\frac{\Psi_{rv}}{L_r'} - \frac{k_s}{L_r'}\Psi_{sv}\right) - \left(\omega_k - p\omega\right)\Psi_{ru}\right) -$$

$$-\left(M_z - M\right)^2 = 0 \Rightarrow \Psi_{su}\Psi_{rv}R_r\frac{k_s}{L_r'} + \left(\omega_k - p\omega\right)\Psi_{rv}^{\ 2} - \Psi_{ru}\Psi_{sv}R_r\frac{k_s}{L_r'} +$$

$$+\left(\omega_k - p\omega\right)\Psi_{ru}^{\ 2} = \frac{R_r}{3p}\left(M_z - M\right) \Rightarrow -\frac{2}{3p}R_r M + \left(\omega_k - p\omega\right)\left(\Psi_{ru}^{\ 2} + \Psi_{rv}^{\ 2}\right) =$$

$$= \frac{R_r}{3p}\left(M_z - M\right) \Rightarrow \omega_k = p\omega + \frac{R_r\left(M_z + M\right)}{3p\left(\Psi_{ru}^{\ 2} + \Psi_{rv}^{\ 2}\right)}.$$

Если управляющим воздействием является частота питающего напряжения (непрерывные управление), то заданная частота питающего напряжения должна вычисляться по выражению

$$\omega_0 = p\omega + \frac{R_r\left(M_z + M\right)}{3p\left(\Psi_{ru}^{\ 2} + \Psi_{rv}^{\ 2}\right)}.$$

Если управляющими воздействиями являются составляющие результирующего вектора напряжения (разрывное управление), то должны выполняться условия: $\Psi_3 = 0$, $\Psi_4 = 0$, $H \to \max$.

Перепишем вспомогательную функцию H с приведенными выше подстановками

$$H = \psi_1 \left(U_{su} - R_s \left(\frac{\Psi_{su}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{ru} \right) + \omega_k \Psi_{sv} \right) +$$

$$+ \psi_2 \left(U_{sv} - R_s \left(\frac{\Psi_{sv}}{L_s'} - \frac{k_r}{L_s'} \Psi_{rv} \right) - \omega_k \Psi_{su} \right) +$$

$$- f^0 \to \max \Rightarrow \psi_1 U_{su} + \psi_2 U_{sv} \to \max .$$

Функция H достигает максимума при выполнении следующих условий:

$$U_{su} = \begin{cases} U_{\max}, \psi_1 \geq 0, \\ -U_{\max}, \psi_1 < 0, \end{cases} \quad U_{sv} = \begin{cases} U_{\max}, \psi_2 \geq 0, \\ -U_{\max}, \psi_2 < 0, \end{cases}$$

где $U_{\max}$ – максимальное значение составляющих вектора напряжения статора.

Зададим цель управления поддержание электромагнитного момента на заданном уровне, то есть $f^0 = (M_z - M)^2$. В этом случае составляющие вектор-функции $\mathbf{\Psi}$ определяться следующим образом:

$$\psi_1 = \frac{L_s'}{k_r R_s} \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{ru}} = -\frac{3p}{R_s} \Psi_{sv} \left(M_z - M \right),$$

$$\psi_2 = \frac{L_s'}{k_r R_s} \frac{\partial f^0}{\partial \Psi_{rv}} = \frac{3p}{R_s} \Psi_{su} \left(M_z - M \right).$$

Отсюда следует, что управляющие воздействия при разрывном оптимальном управлении должны формироваться следующим образом:

$$U_{su} = \begin{cases} U_{\max}, -\Psi_{sv} \left(M_z - M \right) \geq 0, \\ -U_{\max}, -\Psi_{sv} \left(M_z - M \right) < 0, \end{cases} \quad U_{sv} = \begin{cases} U_{\max}, \Psi_{su} \left(M_z - M \right) \geq 0, \\ -U_{\max}, \Psi_{su} \left(M_z - M \right) < 0. \end{cases}$$

3. НАЧАЛО РАБОТЫ В СРЕДЕ LAZARUS

При запуске приложения (файл lazarus.exe) открывается окно программы с предыдущим проектом. Для его закрытия используем раздел главного меню «Проект», где выбираем команду «Закрыть проект». После закрытия проекта появляется окно выбора дальнейших действий «Project wizard», в котором нажимаем кнопку «Новый проект». Затем выбираем «Приложение» из списка типов проектов. Подтверждаем выбор нажатием кнопки «ok». В результате этих действий на экране появляется форма «Form1» и окно с исходным кодом приложения, где прописано создание формы «Form1» при запуске создаваемого приложения. Выполним сохра-

нение проекта приложения: в разделе главного меню «Файл» выберем команду «Сохранить как», затем в появившемся окне выберем директорию, куда хотим сохранить файлы проекта. Программа предложит сохранить два файла: файл проекта с расширением *.lpi и файл исходного кода на языке программирования Pascal с расширением *.pas. Для компиляции программы во вкладке «Запуск» выбираем команду «Собрать» (сочетание клавиш Ctrl + F9). Для компиляции и последующего запуска проекта выбираем команду «Запустить» вкладки «Запуск» (клавиша F9).

После сохранения файлов проекта и успешного запуска приложения в режиме отладки создается файл с названием, совпадающим с названием проекта и расширением *.exe. Вы создали приложение, которое не выполняет пока что ничего, кроме визуализации формы приложения. Добавим функциональности приложению: во вкладке «Standard» выберем нажатием объект «TButton» (кнопка), а затем нажмем на поле формы. В этом месте должен появиться объект «Button1», который относится к типу TButton. У любого объекта в среде Lazarus есть свойства (Properties) и события (Events). Свойства – это характеристики объекта, задаваемые значениями различных типов данных (цвет, ширина, высота и т. д.). События – это процедуры, вызываемые при совершении некоторого действия над объектом (нажатие правой кнопкой мыши на объекте, выделение объекта и т.д.). Для изменения свойств объектов и назначения реакций на события на этапе создания приложения необходимо использовать «Инспектор объектов». Изменим свойства объекта Button1, воспользовавшись «Инспектором объектов»: выделим объект; изменим свойство «Caption», задающее текст кнопки, на текстовое значение «Старт»; изменим шрифт текста кнопки (свойство «Font») на «Courier», высоту шрифта зададим 15. Для назначения реакции на события, необходимо во вкладке «События» инспектора объектов выбрать событие (например, OnClick, OnDblClick, OnCreate и т. д.), затем двойным щелчком мыши по нему провоцируем автоматическое создание процедуры в исходном коде, в теле которой прописываем необходимые действия (например, изменение текста кнопки).

4. ТИПОВЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите об особенностях асинхронного электродвигателя как объекта управления.
2. Приведите структурную схему варианта прямого векторного управления электромагнитным моментом и частотой вращения асинхронного электродвигателя.
3. Приведите структурную схему варианта прямого управления моментом асинхронного электродвигателя.
4. Расскажите о достоинствах и недостатках варианта скалярного управления состоянием асинхронного электродвигателя.
5. Выполните синтез управляющих устройств состоянием асинхронного электродвигателя при помощи методов классического вариационного исчисления.
6. Выполните синтез управляющих устройств состоянием асинхронного электродвигателя при помощи принципа максимума Л.С. Понтрягина.
7. Выполните синтез управляющих устройств состоянием асинхронного электродвигателя при помощи условий абсолютного минимума В.Ф. Кротова.
8. Расскажите об известных вам методах управления состоянием асинхронного электродвигателя.
9. Сравните варианты синтеза управляющих устройств состоянием асинхронного электродвигателя.
10. Сравните известные методы управления состоянием асинхронного электродвигателя.
11. Расскажите об особенностях реализации управляющих устройств состоянием асинхронного электродвигателя в средах разработки приложений (на примере среды LAZARUS).
12. Что влияет на устойчивость работы управляющих устройств в реальных системах и как эти обстоятельства можно учесть в модели управляемого асинхронного электропривода.

5. ТИПОВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Составьте программу на языке Object Pascal, реализующую модель асинхронного электропривода с системой прямого векторного управления.

2. Составьте программу на языке Object Pascal, реализующую модель асинхронного электропривода с системой прямого управления моментом.

3. Синтезируйте управляющие устройства электромагнитным моментом асинхронного электропривода при помощи принципа максимума Л.С. Понтрягина.

4. Приведите текст программы на языке Object Pascal, реализующей один из алгоритмов оптимального управления состоянием асинхронного электропривода.

5. Синтезируйте управляющие устройства электромагнитным моментом асинхронного электропривода при помощи условий абсолютного минимума В.Ф. Кротова.

6. Разработайте алгоритм программы, выполняющей поиск временных зависимостей управляющих воздействий, обеспечивающих наилучшие условия пуска асинхронного электродвигателя.

6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выбор типа и параметров электродвигателей из табл. 3, а также варианта управления состоянием: скалярное частотное управление по закону М.П. Костенко; прямое полеориентированное управление DFOC; косвенное полеориентированное управление IFOC; прямое саморегулирование потока и крутящего момента DSC; прямое управление моментом DTC; оптимальное непрерывное управление (управляющее воздействие – частота питающего напряжения); оптимальное разрывное управление (управляющие воздействия – составляющие вектора напряжения статора).

2. Составление структурной схемы модели управляемого асинхронного электропривода и повторение теоретического материала по данной теме. Занесение краткого конспекта (2 стр.) по теме лабораторной работы и структурной схемы в отчет по лабораторной работе.

3. Разработка приложения в среде LAZARUS, моделирующего управляемый асинхронный электропривод. Разработка сопроводительной документации к приложению для облегчения в дальнейшем работы пользователей.

4. Проведение вычислительного эксперимента с целью изучения характеристик заданного варианта управления состоянием асинхронного электропривода.

В результате проведенных вычислительных экспериментов должны быть сняты временные зависимости частоты вращения ротора и электромагнитного момента АД, составляющие векторов напряжения статора, тока статора и потока статора в системе координат α-β, годографы векторов потоков статора и ротора в осях системы координат α-β. Студенты должны проанализировать результаты компьютерного моделирования и сделать выводы о работоспособности заданных вариантов управления, их слабых и сильных сторонах. Пояснения, графики и выводы заносятся в отчет по лабораторной работе (не менее 6 стр.).

Таблица 3

Параметры асинхронных электродвигателей

	ДКВ45	**ДКВ250КМ**	**ДКВ315L4**	**ДКВ315L4/12**	**ДКВ355L4/12**	**АВР280L4**	**ДКВ355LB4**
Рн, кВт	45	200	200	160/55	200/65	160	315
Uн, В	1140	1140	1140	1140	1140	1140	1140
Iн, А	29,8	121	125	110/68	127/89	102,9	186
Rs, Ом	0,82	0,087	0,071	0,18/0,64	0,089/0,31	0,072	0,054
Xs, Ом	1,96	0,448	0,423	0,478/1,12	0,323/0,775	0,405	0,183
Rr’, Ом	0,68	0,060	0,111	0,034/0,15	0,041/0,189	0,091	0,047
Xr’, Ом	3,14	0,398	0,684	0,453/2,04	0,372/1,745	0,682	0,287
Xm, Ом	50,6	15,0	15,1	10,2/9,85	11,0/7,622	14,6	10,8
Ki	5,3	7,9	6,2	7,5/3,8	8,2/3,47	8,0	10,0
Км	2,15	3,5	2,5	3,4/2,5	3,94/2,87	3,2	3,9
Кп	2,1	1,5	2,5	1,8/1,9	2,6/2,72	3,3	4,0
cos(φ)	0,846	0,88	0,86	0,8/0,5	0,85/0,45	0,833	0,9
КПД	90,0	94,0	93,7	92,5/81,6	93,0/81,9	94,2	94,6
I0, А	11,3	42,6	42,5	62,0/60,0	58,3/78,6	44,0	60,0
J, кг·м^2	0,31	2,1	2,88	2,88	4,69	2,42	4,69

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Элек-

тронный ресурс]: учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common

2. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для электротехн. и энергет. специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решением в Matlab [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – СПб.: Лань, 2011. – 464 с. Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2033 (Дата обращения: 20.06.2014).

2. Певзнер, Л. Д. Лабораторный практикум по дисциплине «Теория автоматического управления» [Электронный ресурс]: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Управление и информатика в технических системах» направления подготовки «Автоматизация и управление» / Л. Д. Певзнер, В. В. Дмитриева. – М.: МГТУ, 2010. – 127 с. Режим доступа: http://www.biblioclub.ru/book/83889/ (Дата обращения: 20.06.2014).

Дополнительная литература

3. Ещин, Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов (Моделирование и управление) [Электронный ресурс] : учеб. пособие / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – Кемерово, 2003. – 247 с. Режим доступа: http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90159&type=utchposob:common (Дата обращения: 20.06.2014).

4. Ильинский, Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»/ Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – М.: Академия, 2008. – 208 с.

5. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.

Периодические издания

Библиотечный фонд КузГТУ для ведения подготовки по направлению 13.06.01 «Электро- и теплотехника» включает в себя следующие научные журналы: «Электричество», «Электротехни-

ка», «Известия вузов. Электромеханика», «Промышленная энергетика», «Электрика», «Автоматика и телемеханика», Реферативный журнал «Энергетика и электротехника».

Интернет-ресурсы

1. Электронная библиотечная система издательства «Лань». URL: http://e.lanbook.com.
2. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека онлайн». URL: www.biblioclub.ru.
3. Сайт о моделировании и исследовании: систем, объектов, технических процессов и физических явлений. Здесь освещаются и поддерживаются разделы. URL: http://model.exponenta.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ

Правила оформления отчета

Текст отчета должен быть подготовлен в редакторе Microsoft Word в формате .doc или .rtf

Шрифт – Times New Roman, кегль 14, межстрочный интервал единичный. Размер статьи – не более 3 листов со списком литературы.

Параметры страницы: формат листа А4, ориентация листов – книжная, верхнее/нижнее поле 2,5 см, правое/левое поле 2,5 см. Абзацный отступ – 1,25 см. Выравнивание основного текста статьи – по ширине поля. Установить автоматическую расстановку переносов.

Титульный лист отчета должен содержать:

- название университета
- название кафедры
- НАЗВАНИЕ ОТЧЕТА (буквы прописные, жирный шрифт, выравнивание по центру)
- номер лабораторной (практической) работы
- И.О. Фамилия автора, группа
- И.О. Фамилия преподавателя, должность
- строка для отметки о защите отчета
- город (буквы строчные, выравнивание по центру) и год

Формулы, включенные в основной текст, должны полностью набираться в редакторе формул Microsoft Equation с выравниванием по центру и пропуском строки сверху и снизу (номер формулы выравнивается по правому краю поля). Размеры всех элементов формул должны быть соизмеримы с текстовыми размерами.

Иллюстрации, входящие в состав отчета, выравниваются по центру и должны иметь подпись формата Рис. ** (номер рисунка)

Ссылки в тексте на источник – в квадратных скобках в строгом соответствии с библиографическим списком.