

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Тимошкин Вадим Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ
СКОРОСТИ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПО СХЕМЕ
ТРН-АД**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Глазырин А. С.

ТОМСК – 2014

Список сокращений

АД – асинхронный двигатель

ТРН – тиристорный регулятор напряжения

АЭП – асинхронные автоматизированные электропривода

СИФУ – системы импульсно фазового управления

АК – автоколебания

ПЧ – преобразователь частоты

КПД – коэффициент полезного действия

ЭДС – электродвижущая сила

БП – блок преобразования

РС – регулятор скорости

ИНС – искусственная нейронная сеть

АРТ – адаптивная резонансная теория

СИФУ – система импульсно фазового управления

САУ – система автоматического управления

СДУ – система дифференциальных уравнений

ИКП – идентификационное каноническое представление

ГА – генетические алгоритмы

БИ – блок интегрирования

БРМ – блок расчета момента АД

БВМ – блок вычисления модуля

БПК – блок преобразования координат

БМ – блок памяти

ПК – персональный компьютер

БМРТ – блок результирующего модуля тока

$\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности

E_s – действующее значение эдс фазы двигателя

U_s – действующее напряжение на фазе двигателя

$T_{\text{БП}}$ – длительность бестоковой паузы

U_{AB1}, U_{BC1} – значения линейных напряжений на статоре двигателя, полученные вначале бестоковой паузы в фазе

U_{ABK}, U_{BCK} – значения линейных напряжений на статоре двигателя, полученные в конце бестоковой паузы

U_{S1} – сигнал на выходе соединенных встречно-последовательно датчиков напряжения, полученный в начале бестоковой паузы в фазе

U_{SK} – сигнал на выходе соединенных встречно-последовательно датчиков напряжения, полученный в конце бестоковой паузы в фазе

$\hat{\omega}_E$ – оценка скорости вращения АД с учетом ранее вычисленной ЭДС

m_k – значение максимального момента электродвигателя

σ – полный коэффициент рассеяния

X_s – полное индуктивное сопротивление фазы двигателя

a_r – коэффициент затухания роторных цепей при разомкнутом статоре

S_K – критическое скольжение двигателя

k_{OC} – коэффициент обратной связи

$\omega_{зд}$ – задание на скорость

$\hat{\omega}_{инс}$ – оценка скорости ИНС

U_A, U_B, U_C – фазные значения статорных напряжений асинхронного двигателя

U_a, U_b, U_c – фазные значения роторных напряжений асинхронного двигателя

I_A, I_B, I_C – фазные значения статорных токов асинхронного двигателя

I_a, I_b, I_c – фазные значения роторных токов асинхронного двигателя

Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – потокосцепления статора

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c – потокосцепления ротора

R_s – сопротивление фазы статора

R_r – сопротивление фазы ротора

L_m – индуктивность намагничивания

L_r – индуктивность ротора

L_s – индуктивность статора

z_p – число пар полюсов

$M_{дв}$ – момент двигателя

J – момент инерции

$\omega_{дв}$ – угловая скорость двигателя

R_H – активная нагрузка

L_H – индуктивная нагрузка

λ_T – угол проводимости

α – угол управления

β – угол запирания

U_H – напряжение сети

U_y – импульсный сигнал управления тиристором

α_{\min} – минимальный угол управления

$t_1, t_{01}, t_2, t_{02}, t_3, t_{03}$ – сигналы управления тиристорами

$I_{дв}$ – результирующий модуль тока асинхронного двигателя

$M_{св}$ – вентиляторный тормозной момент

$M_{сo}$ – момент механических потерь на трение

$M_{св}$ – статический момент вентилятора при номинальной скорости вращения

ω_H – номинальная скорость вращения электродвигателя

α_1 – коэффициент пропорциональности для вентиляторной нагрузки

$\dot{\vec{x}}(t)$ – вектор состояния

A – матрица объекта

B – матрица управления

C – матрица выхода

$\vec{u}(t)$ – вектор управления

L – матрица динамики объекта

K – корректирующее воздействие

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря

$c_{\text{дв}}$ – электромагнитная постоянная двигателя

$N_{\text{н}}^{-1}$ – обратная матрица наблюдаемости

N_{I} – матрица наблюдаемости в базисе ИКП

$K_{\text{см}}$ – коэффициент смещения

$K_{\text{об_см}}$ – коэффициент обратного смещения

\vec{u} – вектор входных статорных напряжений

$\vec{u}_{\alpha\beta}$ – вектор входных статорных напряжений в двухфазной системе координат

\vec{I} – вектор статорных токов

$\vec{I}_{\alpha\beta}$ – вектор статорных токов в двухфазной неподвижной системе координат

$\hat{\vec{I}}_{\alpha\beta}$ – вектор оценок токов в двухфазной неподвижной системе координат

$\hat{\vec{r}}$ – вектор оценки параметров электродвигателя

M_{C1} – момент нагрузки холостого хода

M_{C2} – момент нагрузки

Δ – ошибка, характеризующая точность оценки параметров

$\hat{\omega}$ – оценка скорости электродвигателя

\hat{M}_{C} – оценка момента нагрузки

I_{R} – результирующий модуль тока

\hat{I}_{R} – оценка результирующего модуля тока

K_{r1} – нелинейный коэффициент, характеризующий связь между моментом нагрузки и током электродвигателя

K_{r2} – нелинейный коэффициент, характеризующий связь между оценкой момента нагрузки и оценкой тока электродвигателя

$\omega_{\text{пр}}$ – просадка по скорости

$\omega_{\text{хх}}$ – скорость холостого хода

ω_{mc} – скорость под нагрузкой

ΔI – невязка токов

K_r, A_r, K_m – вспомогательные коэффициенты

U_α, U_β – напряжения электродвигателя в двухфазной системе координат

$\hat{I}_\alpha, \hat{I}_s$ – оценки токов в двухфазной системе координат

$\hat{\psi}_\alpha, \hat{\psi}_\beta$ – оценки потокосцепления в двухфазной системе координат

R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора

L_s, L_r – индуктивность статора и ротора

J – момент инерции

\hat{M} – оценка момента двигателя

$\omega_{зАд}$ – скорость задания двигателя

$T_{рег}$ – коэффициент наблюдателя

ΔI – интегральная ошибка тока

$\Delta \omega$ – интегральная ошибка скорости

ΔM – интегральная ошибка момента

K_{pc}, T_{pc} – коэффициенты регулятора скорости

M_H – номинальный момент двигателя

I_H – номинальный ток

$\omega_{зАд1}, \omega_{зАд2}$ – скорость задания

$\omega_{\Delta1}, \omega_{\Delta2}$ – абсолютные значения ошибок

$\omega_{дВ1}, \omega_{дВ2}$ – угловая скорость АД при различных углах задания

ω_{1H}, ω_{2H} – абсолютные ошибки наблюдателя

$\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2$ – оценки скорости АД при различных углах задания

$\omega_{1H_CM}, \omega_{2H_CM}$ – абсолютные значения ошибок оценки угловой скорости при

вводе в смещения в контур скорости

$\omega_{CM1}, \omega_{CM2}$ – смещения оценки угловой скорости

$\omega_{1_CM}, \omega_{2_CM}$ – абсолютные значения ошибок угловой скорости при вводе в смещения;

$\omega_{CM_1}, \omega_{CM_2}$ – смещения оценки угловой скорости

\hat{M}_{01} – ограниченный момент оценки нагрузки

k_3, k_2, T_2 – коэффициенты блока смещения

Draft Only

Оглавление

Оглавление	8
1.1. Особенности применения и использования электроприводов типа ТРН-АД.....	16
1.2. Техничко-экономическое обоснование выбора систем ТРН-АД.....	22
1.3. Анализ существующих и перспективных вариантов построения наблюдателей скорости для электроприводов ТРН-АД	29
1.3.1. Определение скорости вращения АД на основе ЭДС статора	31
1.3.2. Нейросетевой наблюдатель скорости.....	33
1.3.3. Фильтр Калмана	36
1.4. Перспективные методы идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины	37
1.5. Постановка задач исследования	39
1.5. Выводы по первой главе.....	39
2.МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРН-АД	41
2.1. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя	41
2.2. Разработка имитационной модели электропривода ТРН-АД	44
2.3. Основные допущения при математическом моделировании электропривода ТРН-АД	53
2.4. Исследование имитационной модели электропривода ТРН-АД при работе на типовых механических нагрузках	54
2.5. Выводы по второй главе.....	57
3.РАЗРАБОТКА КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ ТРН-ад.....	58
3.1. Принципы построения наблюдателей Люенбергера.....	58

3.2. Разработка метода идентификации параметров АД для построения модифицированного наблюдателя	62
3.3. Разработка структуры наблюдателя скорости в системе ТРН-АД на основе модификации наблюдателя Люенбергера.....	76
3.4. Определение настроечных коэффициентов для наблюдателя угловой скорости.....	92
3.5. Исследование модифицированного наблюдателя на робастность.....	96
3.6. Оптимизация работы модифицированного наблюдателя при изменении параметров АД.....	98
3.7. Выводы по третьей главе	107
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТРН-АД	108
4.1. Описание экспериментальной установки	108
4.2. Описание программного комплекса экспериментальной установки ТРН-АД.....	115
4.3. Исследование статике электропривода ТРН-АД в составе экспериментальной установки.....	117
4.3.1. Работа электропривода ТРН-АД на холостом ходу.....	117
4.3.2. Работа электропривода ТРН-АД под нагрузкой	121
4.4. Идентификация параметров схемы замещения асинхронной машины экспериментальной установки с помощью генетических алгоритмов.....	123
4.5. Проверка работоспособности модифицированного наблюдателя скорости для разомкнутой системы ТРН-АД на экспериментальной установке	128
4.6. Выводы по четвертой главе.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ	149

Введение

На сегодняшний день электроприводы переменного тока нашли свое применение в различных отраслях промышленности. Больше половины электроприводов построено на основе асинхронных машин, ввиду их неплохих показателей с точки зрения цены и надежности. Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутой обмоткой активно применяются на производствах, где их необходимая мощность может достигать от нескольких киловатт до мегаватт.

При пуске АД с большой выходной мощностью возникают значительные пусковые токи, которые влияют на момент двигателя. Чтобы снизить динамические нагрузки на механическую систему электропривода и уменьшить влияние пусковых токов на других потребителей, подключенных к этой же сети, необходимо осуществлять плавный пуск. Для обеспечения плавного пуска АД с заданными параметрами разгона хорошо подходят тиристорные регуляторы напряжения (ТРН).

Современные системы управления выполняются на цифровых микроконтроллерах, что позволяет синтезировать алгоритмы управления различной степени сложности, изменять и интегрировать в них новые программные модули, с помощью которых улучшается качество и эффективность управления.

Для повышения эффективности управления, как в динамике, так и в статике электропривода ТРН-АД, необходима обратная связь по угловой скорости. Это дает возможность обеспечить заданную разгонную характеристику электродвигателя и темп разгона. Заданный темп разгона электропривода, при изменяющейся нагрузке на валу двигателя и моменте инерции, возможно обеспечить только при наличии обратной связи по скорости. Обратная связь по скорости также позволяет обеспечить жесткость регулировочных характеристик и повысить устойчивость электропривода при работе на низких скоростях.

Наличие обратной связи по угловой скорости позволит увеличить диапазон регулирования электропривода ТРН-АД, повысить устойчивость системы и эффективность управления, как на средних, так и на низких скоростях.

В ряде случаев поставить датчик скорости на валу двигателя проблематично или экономически невыгодно, поэтому применяются бездатчиковые системы управления асинхронным электроприводом.

Качество управления регулируемого асинхронного электропривода зависит от знания текущего состояния электропривода. В большинстве случаев каталожные данные электродвигателя не всегда соответствуют текущим параметрам, так как в ходе эксплуатации параметры АД могут меняться под действием тепловых процессов и других внешних факторов. Изменение состояния электропривода оказывает влияние непосредственно на систему управления и наблюдатель. Поэтому для обеспечения заданных показателей качества управления, при изменении параметров электродвигателя, необходимо вводить коррекцию или делать наблюдатель малочувствительным к изменению параметров.

Современная система управления, выполненная по схеме ТРН-АД, должна в себя включать наблюдатель скорости в виде программного модуля, который на основании информации, полученной со штатных средств измерения (датчики тока, напряжения), производит оценку угловой скорости.

Для обеспечения работоспособности наблюдателя угловой скорости, при изменении состояния АД, необходимо вводить корректирующие воздействия.

Идея работы заключается в повышении эффективности эксплуатации электроприводов типа ТРН-АД, за счет внедрения наблюдателя угловой скорости.

Существенный вклад в создание и усовершенствование асинхронных электроприводов с тиристорным регулятором напряжения внесли многие российские и зарубежные ученые: Браславский И.Я., Нестеров К.Е., Зюзев А.М., (Уральский УГТУ-УПИ), Андрющенко О.А., Бойко А.А., Петрушин В.С.,

Якимец А.М. и др. (Одесский Национальный политехнический университет), I Cadirci, M. Ermis, M. Rahman (Bilten Information Technologies and Electronics Research Institute, Турция), Saqib, M.A. (Univ. of Eng. & Technol., Lahore, Пакистан), Коваль А.С., Скарыно Б. Б (Киевский политехнический институт).

Объектом исследования данной работы является регулируемый асинхронный электропривод с тиристорным регулятором напряжения.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы оценки угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД.

Целью диссертации является разработка и исследование наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с компенсацией влияния изменения параметров электродвигателя.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих научных задач:

- Произвести анализ существующих методов оценки угловой скорости АД, как в составе электропривода по схеме ТРН-АД, так и для других типов асинхронных электроприводов. Выявить наиболее перспективные структуры и методы оценки состояния АД.
- Создать трехфазную имитационную модель асинхронного электропривода ТРН-АД с непосредственным управлением ключами.
- Разработать метод предварительной идентификации параметров схемы замещения АД с применением генетических алгоритмов на основе информации полученной с помощью датчиков тока, напряжения и скорости.
- Разработать структуру наблюдателя угловой скорости для электропривода по схеме ТРН-АД, учитывающую его особенности и позволяющую производить оценку скорости с приемлемой точностью.
- Разработать методику расчета коэффициентов наблюдателя угловой скорости с применением генетических алгоритмов и нейронной сети.

- Исследовать работоспособность наблюдателя угловой скорости при изменении активного сопротивления статора и ротора с целью определения диапазона устойчивого управления электропривода.
- Разработать корректирующее устройство для компенсации влияния изменения активных сопротивлений статора и ротора на процесс оценки угловой скорости.
- Произвести экспериментальную проверку полученных результатов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались экспериментальные и теоретические методы исследований. В качестве теоретических методов применялись: математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой в трехфазной системе координат, математический аппарат генетических алгоритмов и нейронных сетей, основы теории автоматического управления.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается, как путем использования численного моделирования в программной среде Matlab Simulink, так и реальными экспериментальными исследованиями, которые показали адекватность математических моделей в совокупности принятых допущений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан наблюдатель для оценки угловой скорости асинхронного электропривода в составе ТРН-АД с использованием штатных средств измерения (датчики тока, напряжения), работающий на основе двухфазной математической модели АД и оценки момента нагрузки.
2. Предложена методика на основе генетических алгоритмов и нейросетового аппроксиматора, позволяющая определять коэффициенты наблюдателя угловой скорости с целью минимизации невязки результирующих модулей тока статора.

3. Предложен метод предварительной идентификации электромагнитных и механических параметров асинхронной машины, реализованный на основе генетических алгоритмов, при предварительном получении динамических кривых (статорных напряжений, токов и скорости электродвигателя) с электродвигателя.
4. Разработана структура устройства для компенсации влияния изменения активных сопротивлений статора и ротора на процесс оценки угловой скорости наблюдателя в составе электропривода ТРН-АД, определяющее состояние АД и значение необходимого корректирующего воздействия.

Практическая ценность работы:

1. Разработан алгоритм управления силовыми ключами электропривода с тиристорным регулятором напряжения в виде программного кода на языке C++.
2. Предложены практические рекомендации по процедуре настройки наблюдателя угловой скорости электропривода по схеме ТРН-АД.
3. Разработан автономный программный комплекс «ТРН-АД» в среде Biulder C++, служащий для исследования и настройки наблюдателя угловой скорости.
4. Предложены технические решения по совершенствованию асинхронных электроприводов, отраженные в патентах РФ на изобретения №102160, №103260, №115984, №123541, №2502079.

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены на предприятии ОАО «НПО» «Сплав» (г. Тула) при разработке и создании перспективных регулируемых электроприводов с тиристорным регулятором напряжения.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Алгоритм идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины на основе данных, полученных с датчиков тока, напряжения и скорости с применением генетических алгоритмов.
2. Структура наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов с тиристорным регулятором напряжения.
3. Алгоритм определения настроечных коэффициентов наблюдателя угловой скорости АЭП по схеме ТРН-АД.
4. Способы корректирующих воздействий на наблюдатель угловой скорости при изменении активных сопротивлений обмоток статора и ротора АД.

Draft Only

1. АНАЛИЗ ПРАКТИЧЕСКИХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК СИСТЕМ НА БАЗЕ ТРН-АД

1.1. Особенности применения и использования электроприводов типа ТРН-АД

На рынке электроприводов на сегодняшний день активным спросом пользуются асинхронные автоматизированные электроприводы (АЭП) с частотным управлением и с тиристорным регулятором напряжения (ТРН), которые нашли применение в различных областях промышленности и являются достаточно мощным инструментом для создания сложных систем АЭП [1,2].

Электропривод ТРН-АД в основном используется как устройство, обеспечивающее плавный пуск АД с заданными параметрами (время разгона, допустимый максимальный ток). Такой вид управления хорошо подходит для предприятий, где есть АД большой мощности, работающие на насосную или вентиляторную нагрузку и, где есть необходимость в безударном пуске. Поскольку прямой пуск, особенно мощных АД, приводит к просадке напряжения и появлению ударных токов в сети, то необходимо сформировать такую разгонную характеристику привода, которая бы удовлетворяла заданным показателям [3].

На рис.1.1 представлен один из вариантов построения силовой части ТРН для серии ПТТ-ПП, которая является наиболее распространенной, но в тоже время обладает высокими эксплуатационными характеристиками [4].

Силовая часть электропривода ТРН ПТТ-ПП состоит из двух встречно-параллельно включенных тиристоров в каждой фазе. Управление тиристорами осуществляется с помощью системы импульсно фазового управления (СИФУ). Если управляющий сигнал на полупроводниковые вентили не подается, то они находятся в закрытом состоянии. Принцип СИФУ построен на том, чтобы сформировать импульсы управления с задержкой от точки естественного

отпирания вентиля. При угле управления равным нулю, тиристор будет открываться в точке естественной коммутации и на выходе ТРН будет сигнал, соответствующий величине питающего напряжения. Чем больше величина задержки и, следовательно, больше угол управления, тем меньше действующее значение напряжения прикладываемого к статору. Для того чтобы определить точку естественной коммутации тиристора, необходимо синхронизировать работу СИФУ с сетью, которую обычно проводят по напряжению [5].

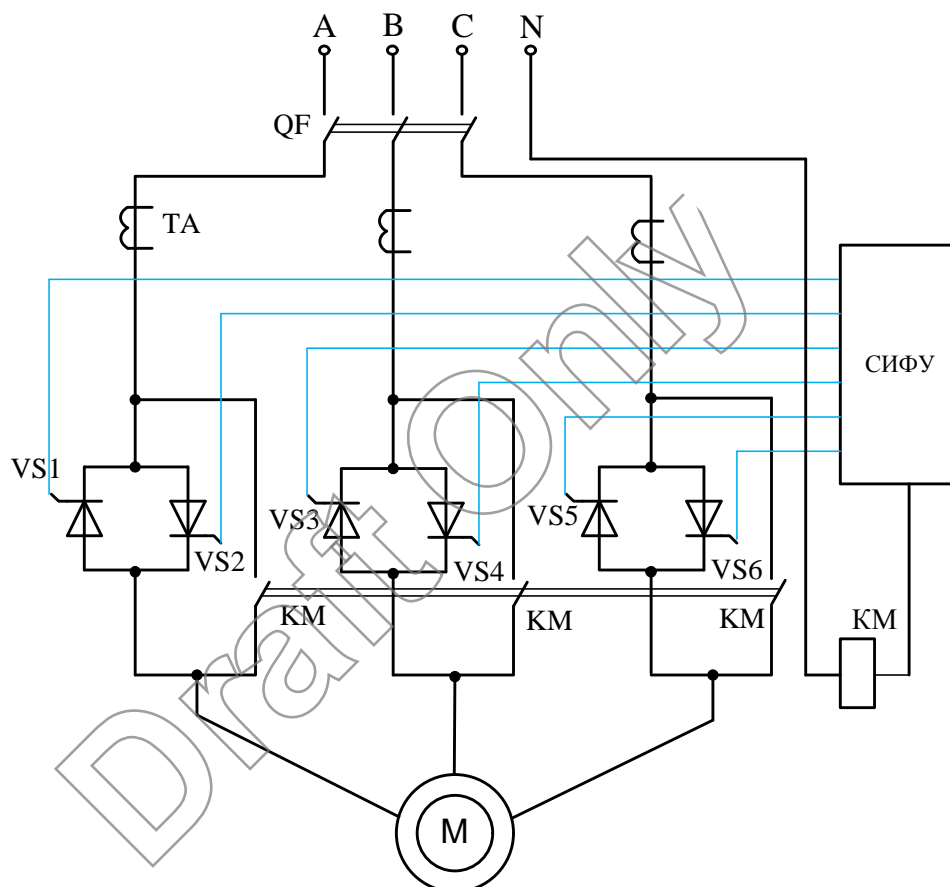


Рис.1.1. Функциональная схема ТРН-АД [4]

Особенностью пускателей серии ПТТ-ПП является наличие облегченной системы охлаждения. Контактор КМ рис. 1.1. позволяет подключать АД напрямую в сеть, если ТРН вышел из строя или после завершения пуска [4].

Существует достаточно много различных структур управления для электроприводов ТРН-АД. Примером одной из них может являться система, где пуск осуществляется путем подачи вначале на две фазы статора линейного напряжения, а затем подключается третья фаза при максимуме фазного

напряжения. Отличительной особенностью данного типа управления от классического является подача вначале напряжения только на две фазы, а потом, через определенное время, подключается третья [6].

Использование полностью управляемых ключей в системе ТРН-АД позволяет осуществить квазиоптимальный пуск. Суть данного способа пуска заключается в следующем: первоначально на статорные обмотки АД подают напряжение равное величине питающей сети. Затем, через строго определенный промежуток времени, АД переводят в режим динамического торможения, после чего снова подают напряжение сети на обмотки статора. Предложенный способ пуска электродвигателя в составе электропривода ТРН-АД позволяет уменьшить динамические нагрузки на механическую систему и повысить эксплуатационные характеристики [7,8].

Для АД малой мощности, например, в горной промышленности, работающих с небольшой нагрузкой, хорошо подходит система с пофазным пуском, а для АЭП большой мощности более эффективен квазиоптимальный способ пуска [7].

Система управления для АЭП с ТРН может быть как замкнутой, так и разомкнутой. Возможны следующие варианты замкнутых систем ТРН-АД: по току, по скорости, по технологической координате. К разомкнутым системам относятся системы управления, где задается только время разгона и нет обратных связей. В современных электроприводах ТРН-АД довольно часто встречается функция контроля момента. При управлении моментом АЭП с ТРН возможно осуществить более эффективный контроль пуска и останова механизма. В результате этого можно добиться снижения тока в среднем на 20 % по сравнению с традиционными методами плавного пуска, которые используют только разгон по напряжению [9].

При необходимости контролировать в момент пуска или торможения заданную величину тока используют системы ТРН-АД с обратной связью по

току. Данная функция наиболее востребована в электроприводах, где текущая мощность подстанции или питающего силового кабеля ограничена [9].

В электроприводах, где нужно обеспечить заданную скорость работы для конкретного объекта управления, применяется обратная связь по скорости. ТРН, использующие обратную связь по скорости позволяют реализовать разгонные характеристики и обеспечивают более устойчивое состояние при работе на пониженных скоростях.

Встречаются структуры управления ТРН, где осуществляется регулирование как в двух, так и сразу в трех фазах. Двухфазное регулирование в трехфазной системе приводит к появлению несимметрии и тем самым к нагреву АД, поэтому данный вариант обычно используется только с небольшой нагрузкой на валу двигателя.

При применении несимметричных ТРН с уменьшенным количеством тиристоров гармонический состав токов и напряжений ухудшается. Помимо этого наблюдается несимметрия токов в фазах электродвигателя и дополнительные моменты обратной последовательности [10].

Снижение выходного напряжения у ТРН-АД вызывает уменьшение электромагнитного момента и, наоборот, при сбросе нагрузки напряжение на статоре восстанавливается до номинального значения. Данная положительная внутренняя связь оказывает негативное влияние на работу АЭП, которое особенно явно проявляется при углах управления 70..90 эл. град. с неполной нагрузкой и при незначительных моментах инерции. Автоколебания (АК), возникающие в электроприводе ТРН, устраняются путем использования замкнутых систем или с помощью импульсно-фазового управления с синхронизацией по току [11].

Существуют разработки ТРН, где управление силовыми ключами осуществляется не с помощью классической системы управления, а с применением нейронных сетей. Аналогичные системы довольно часто встречаются для векторного управления. Суть данного управления сводится к

формированию импульсов управления для ключей в зависимости от текущего состояния асинхронной машины. Основной сложностью в формировании таких систем является обучение нейронной сети [12].

Иностранные специалисты и Ermis M., Nalcaci E., Ertan, B., Rahman M., предложили другой способ управления ключами для преобразователя ТРН. Основная идея заключается в том, что переключение силовых ключей осуществляется не синхронно на каждой фазе, а с определенными задержками. Задержки формируются исходя из разработанного алгоритма управления. Такой подход по заявлению авторов позволяет снизить пульсации электромагнитного момента [13].

Исходя из текущих задач выбирается тот или иной тип управления с ограничением момента, тока, или с заданным темпом разгона.

Система ТРН-АД нашла применение в различных областях промышленности, например, для вентиляторов, центрифуг, насосов. Электроприводы ТРН-АД, используемые для центробежных насосов, позволяют в момент пуска снизить вероятность возникновения гидроударов в трубах. В плавном пуске нуждаются также электроприводы, где есть проблема с проскальзыванием, например ленточные конвейеры. Плавный разгон загруженного конвейера дает возможность без излишней перегрузки ленты, которая может привести к ее разрыву, произвести пуск АД. В дробилках практически полностью устраняется негативный эффект в виде ударных рывков и толчков, путем ограничения пускового момента с помощью ТРН. Станки деревообрабатывающей промышленности, ткацкие, швейные машины имеют схожие нагрузочные характеристики, поэтому в них, при необходимости, применяются устройства плавного пуска на базе ТРН [4].

В горнодобывающей промышленности ТРН нашло широкое применение в нерегулируемых электроприводах, где необходимо обеспечить плавный пуск АД. Если не ограничивать пиковые токи во время пуска АД, то это может привести к появлению избыточных тепловых потерь, которые в свою очередь

вливают на износ изоляции. Многократные повторяющиеся пуски и остановки АД приводят к тепловой перегрузке. Поэтому необходимо сформировать такую разгонную характеристику, которая бы обеспечила плавный пуск с ограничением пиковых токов и ударных моментов. Стоит отметить, что длительный режим пуска АД тоже приводит к нагреву обмоток. Поэтому необходимо выбирать оптимальное время и темп разгона исходя из конкретного двигателя [7].

С появлением высоковольтных тиристорных преобразователей стали появляться ТРН, позволяющие осуществлять плавный пуск электродвигателей большой мощности. Для мощных электроприводов центробежных насосов довольно часто применяется групповой или каскадный пуск. Особенностью данного режима работы ТРН является наличие преобразователя осуществляющего поочередный пуск нескольких двигателей. Вначале запускается АД первого насоса, после того как он выходит на номинальный режим, то подключается напрямую в сеть, и ТРН переходит к запуску следующего двигателя и так далее. Такой способ управления позволяет, имея один ТРН, осуществлять пуск сразу нескольких двигателей [14].

При работе АД под нагрузкой типа «пара трения» в большинстве случаев возникают автоколебания АК, которые связаны с нелинейной зависимостью сил трения от скорости. В рельсовом транспорте, в металлообрабатывающих станках, в прокатных станах АК проявляются в виде упругих колебаний, приводящих к резкому увеличению динамических нагрузок на механическую систему. Устранение фрикционных автоколебаний в таких механизмах возможно также средствами регулируемого электропривода, например ТРН-АД [15,16].

К одному из главных факторов, который ограничивает область применения ТРН, относится нагрев обмоток при работе электропривода на низких скоростях. Это обусловлено тем, что момент двигателя с уменьшением

напряжения питания уменьшается и, следовательно, перегрузочная способность АД падает, что ведет к его нагреву [17].

Для решения проблемы с нагревом разрабатываются и внедряются АД, предназначенные для работы в составе электропривода ТРН-АД. К одной из особенностей таких АД относится то, что тепловые потери из стержневой обмотки ротора выносятся в зону интенсивного охлаждения. Охлаждение обмоток электродвигателя обеспечивается радиатором-вентилятором и независимым вентилятором, который осуществляет постоянный обдув и не зависит от текущей скорости АД. При работе на низких скоростях будет сохраняться необходимый поток воздуха для охлаждения обмоток двигателя, так как имеется независимая система охлаждения [18].

1.2. Технико-экономическое обоснование выбора систем ТРН-АД

При изучении рынка спроса и предложения АЭП для АД было установлено, что как в России, так и за рубежом на сегодня используются два типа силовых асинхронных преобразователей – это преобразователь частоты (ПЧ) и ТРН.

Ранее применение данных типов силовых преобразователей для АЭП было ограничено мощностью полупроводниковых вентилях. На данный момент выпускаются ПЧ и ТРН от нескольких киловатт до мегаватт.

Как показывает диаграмма (рис. 1.2) основным спросом в 1990 г. пользовались электроприводы постоянного тока, в виду массового применения двигателей работающих на постоянном токе.

В 2001 г. асинхронных электроприводы постепенно вытеснили электроприводы на постоянном токе и заняли лидирующие позиции. Как видно из диаграммы (рис. 1.3), доля АД за 11 лет увеличилась в два раза и составила 50% всего спроса.

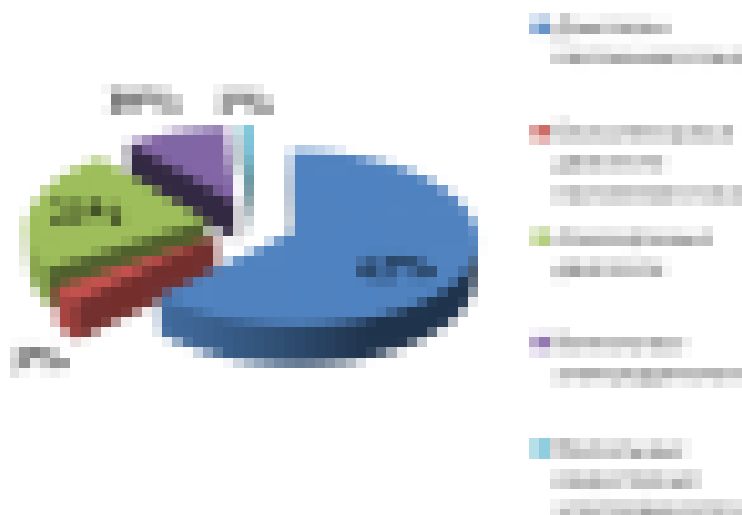


Рис. 1.2. Диаграмма спроса электродвигателей за 1990 г [19].

1% – двигатели постоянного тока; 3% – бесколлекторные двигателя постоянного тока;
 23% – асинхронные двигатели; 10% – вентильные двигатели;
 62% – двигатели постоянного тока

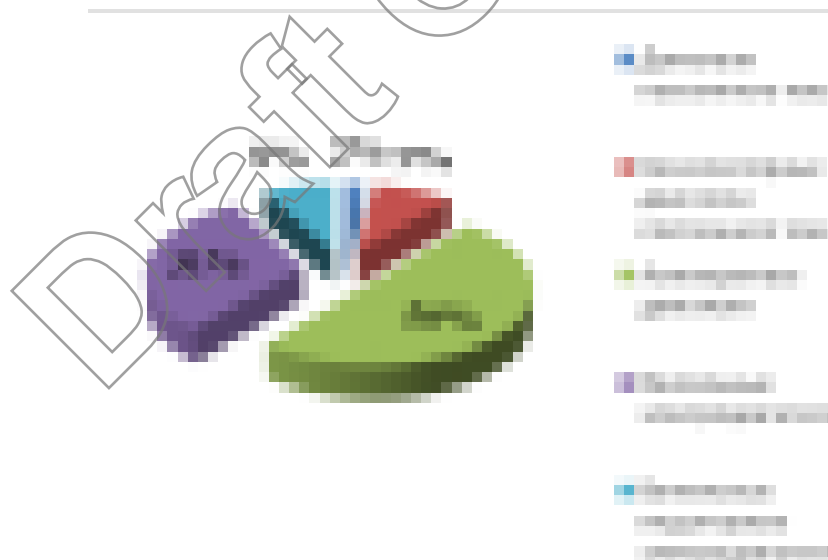


Рис. 1.3. Диаграмма спроса электродвигателей за 2001 г [19].

2% – двигатели постоянного тока; 8% – вентильные индукторные двигатели;
 9% – бесколлекторные двигатели постоянного тока;
 31% – вентильные электродвигатели; 50% – асинхронные двигатели

Существуют следующие способы регулирования угловой скорости АД с короткозамкнутой обмоткой: изменение частоты питающей сети, переключение пар полюсов, изменение напряжения на статорных обмотках двигателя, реостатное.

Для обеспечения замкнутой системы по угловой скорости для АД активно используются ПЧ, которые обладают широкими возможностями для построения АЭП. Альтернативой ПЧ является ТРН, который хоть и уступает в функциональных возможностях, но также востребован и используется в определенных отраслях промышленности. В зависимости от конкретно поставленных задач и требований применение ТРН может быть более выгодным и эффективным чем ПЧ.

В России используются как отечественные ТРН (ПТРН-Р1Ш, АСТЭК-02), так и зарубежные разработки (Schneider Electric, Siemens, Danfoss, ABB, Hitachi, Toshiba, Analog Devices).

Для сравнения рыночной стоимости ПЧ и ТРН возьмем двух крупных производителей электроприводов ABB и Siemens (рис. 1.4) [20, 21]. До 5,5кВт стоимость ПЧ и ТРН лежит примерно в одном и том же ценовом диапазоне, но с дальнейшим увеличением мощности электропривода разница в цене начинает увеличиваться как для Siemens, так и для ABB.

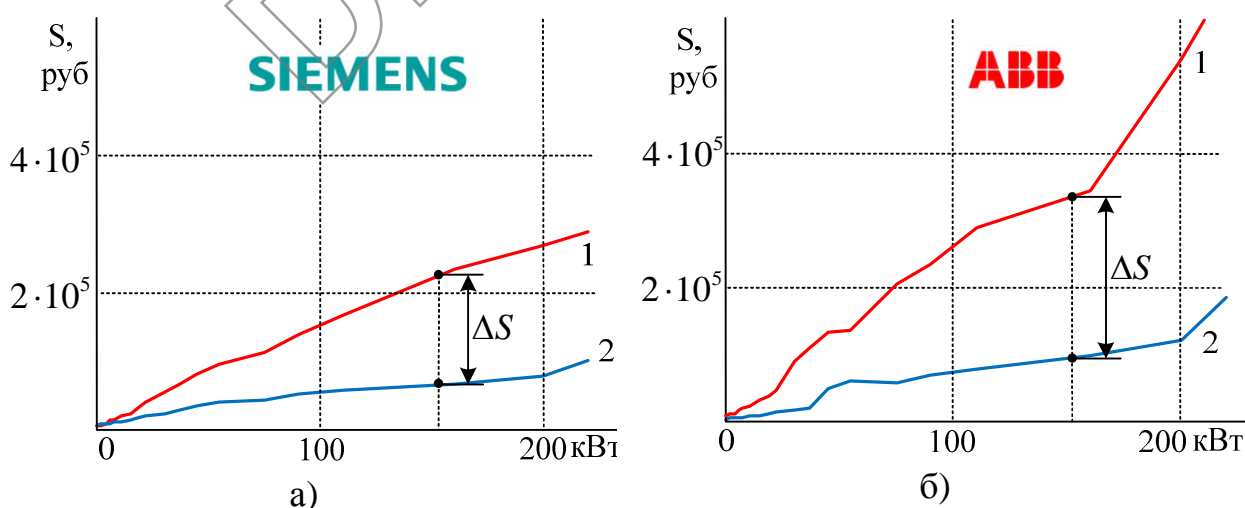


Рис.1.4. Кривые стоимости преобразователя частоты и тиристорного регулятора напряжения от мощности: а) Siemens , б) ABB; 1 – ПЧ, 2 – ТРН

Наибольшая разница в цене ПЧ и ТРН наблюдается у АВВ, так например, для мощности 200 кВт она соответствует 420 600 руб. За такую стоимость можно купить четыре привода ТРН-АД вместо одного ПЧ [22].

Следовательно, при внедрении регулируемого асинхронного электропривода наиболее выгодно использовать ТРН, для мощных высоковольтных электродвигателей, где это возможно.

Многие производители электроприводов ТРН, такие как Siemens, АВВ, Schneider Electric к одному из основных достоинств относят высокую надежность [23,24]. ТРН являются более надежными в виду меньшего количества силовых элементов и числа коммутаций одного ключа на период.

По предоставляемым возможностям ПЧ при создании регулируемого асинхронного электропривода превосходит ТРН, но в то же время предъявляет более высокие требования к организации управления. Для векторных электроприводов необходимо производить оценку вектора потокосцепления или измерять его с помощью датчиков. Скалярное управление является наиболее близким к ТРН, но использовать его менее выгодно ввиду большей стоимости ПЧ, чем ТРН и незначительном увеличении диапазона регулирования скорости. Недостатком разомкнутой системы частотного управления является отсутствие возможности ограничения токов, момента в переходных режимах.

Как видно из табл. 1.1 ТРН имеет ряд недостатков, которые ограничивают применение. Уменьшение электромагнитного момента при работе на пониженных скоростях можно решить путем использования насосной или вентиляторной нагрузки.

КПД двигателя при работе в составе электропривода ТРН-АД зависит от угла управления и при снижении напряжения, подаваемого на обмотки двигателя, будет снижаться. При уменьшении задания на скорость в два раза половина электромагнитной мощности асинхронного двигателя расходуется на электрические потери в роторе. Если взять во внимание и потери в статоре, то

коэффициент полезного действия (КПД) двигателя может уменьшиться более чем в два раза. Данный режим характеризуется тем, что ток двигателя, потребляемый из сети, пропорционален напряжению, а электромагнитный момент пропорционален квадрату этого напряжения. Следовательно, по мере снижения напряжения, подаваемого на обмотки двигателя, электромагнитный момент убывает быстрее, чем уменьшается ток, потребляемый из сети [5].

Таблица 1.1

Преобразователь частоты		ТРН-АД	
Достоинства	Недостатки	Достоинства	Недостатки
1. Дополнительное повышение мощности в часы максимума нагрузок в энергосистеме. 2. Обеспечение режима «мягкого» пуска с токами, близкими к номинальному режиму. 3. Повышение уровня автоматизации 4. Энергосбережение 5. Управление моментом	1. Дополнительное оборудование в виде датчиков 2. Высокая стоимость 3. Сложность наладки и настройки	1. Осуществление мягкого пуска 2. Низкая цена по сравнению с ПЧ. 3. Простота установки и наладки 4. Надежность 5. Небольшие массогабаритные показатели 6. Простой монтаж	1. Просадка момента при понижении скорости 2. Малый диапазон регулирования скорости 3. Ограничено быстродействие привода 4. Уменьшение КПД системы при снижении напряжения 5. Большие потери при пуске, что приводит к нагреву

Следствием такого режима является значительное увеличение потерь в двигателе и его перегрев при уменьшении частоты вращения за счет снижения подводимого напряжения. Данная проблема решается путем использования АД с дополнительным охлаждением и подбором оптимальной нагрузочной характеристики, в которой скорость вращения АД зависит от нагрузки.

Значительно повысить быстродействие системы ТРН-АД весьма проблематично, поэтому их используют в технологических процессах, где нет высоких требований к продолжительности пуска.

К достоинствам ПЧ относится: высокая точность регулирования угловой скорости, большой диапазон, независимый от скорости момент АД. К

недостаткам относится: двойное преобразование энергии в выпрямителе и инверторе, высокая частота коммутаций полупроводниковых ключей, а также необходимость иметь дополнительное оборудование для векторного управления в виде датчика или наблюдателя потокосцепления [25]. Для реализации векторного управления с помощью ПЧ необходимо иметь: датчики скорости, напряжения, потокосцепления и тока.

При проектировании бездатчикового векторного управления возникают следующие проблемы:

1. Небольшой диапазон регулирования электропривода, который связан с тем, что наблюдатели потокосцепления и скорости могут обеспечить приемлемую точность только в небольшом диапазоне регулирования частоты.
2. Значительная чувствительность электропривода к изменению параметров электродвигателя в результате теплового нагрева.
3. Точность полученных оценок эквивалентных напряжений и токов зависит на малых частотах модуляции от «мертвого времени» и времени переключения ключей инвертора [26].

Современные электроприводы ТРН-АД имеют дополнительные опции в виде защит и различных алгоритмов запуска. Электроприводы АСТЭК-02 оснащаются следующими средствами защиты:

- от обрыва фазы;
- от тепловых перегрузок двигателя и преобразователя;
- от затянувшегося запуска;
- от отсутствия нагрузки на валу двигателя;
- от превышения допустимой частоты пусков;
- от неправильного чередования фаз с автоматической коррекцией подключения;
- время-токовая и максимально токовая защита двигателя [27].

Электроприводы фирмы Emotron оснащаются дополнительными алгоритмами управления, которые позволяют осуществлять быстрый останов, контроль нагрузки механизма, плавный пуск механизма с высоким моментом инерции.

Набор алгоритмов управления и дополнительных опций зависит от конкретного электропривода ТРН-АД. В заводской документации ТРН обычно указывается область применения и тип пуска, который может быть нормальным, тяжелым и очень тяжелым.

Из табл. 1.2 видно, что ТРН имеет более высокий КПД при работе на скоростях близких к номинальным, а также обладает меньшими массогабаритными показателями. Уступает ТРН-АД электроприводу ПЧ-АД только в диапазоне регулирования скорости, но по цене в 2,5 раза дешевле.

В табл. 1. 2 представлены характеристики электроприводов ТРН и ПЧ, со схожими параметрами фирмы Schneider Electric [28].

Таблица 1.2

Технические характеристики	ПЧ(ATV21HD15N4)	ТРН-АД (ATS01N232QN)
Назначение изделия	асинхронные двигатели	асинхронные двигатели
Мощность электродвигателя	15 кВт	15 кВт
Число фаз в сети	3	3
Напряжение источника питания. А	380...480 V (- 15...10 %)	380...415 (-10...10%) В
Номинальный ток, А	22,8 А	32 А
КПД, %	90%	92%
Коэффициент мощности	0.88	0,84
Диапазон регулирования	1...10	1...2
Масса, кг	11,65	0,56
Цена, руб.	32825	13 088

Особенностью использования АД в недогруженном состоянии является потребление реактивной мощности из сети, что в свою очередь влияет на КПД АД. Например, если при 100% загрузке двигателя КПД составляет $\cos(\varphi) = 0,8$,

то при 50% $\cos(\varphi) = 0,65$, при 30% $\cos(\varphi) = 0,51$. В таких случаях использование ТРН является оправданным с точки зрения энергосбережения [29].

Многие современные электроприводы, выполненные по схеме ТРН-АД, оснащены функцией энергосбережения. Специально разработанные алгоритмы управления для механизмов с переменной нагрузкой позволяют уменьшить потребление активной энергии до 15%, а реактивной до – 30...50%. Функцию энергосбережения для электроприводов ТРН-АД мощностью более 20...30 кВт использовать нецелесообразно ввиду малой экономии энергопотребления, а в некоторых случаях даже происходит увеличение потребления энергии за счет несинусоидальности напряжений [30].

1.3. Анализ существующих и перспективных вариантов построения наблюдателей скорости для электроприводов ТРН-АД

Система ТРН с АД, работающая без датчика скорости, не может обеспечить устойчивую работу электропривода, как при плавающей нагрузке, так и на низких скоростях. Поэтому, для обеспечения заданных динамических характеристик и темпа разгона электропривода ТРН-АД, необходимо иметь датчик скорости или наблюдатель.

Существуют как прямые методы измерения скорости, так и косвенные. Под прямыми методами измерения скорости понимается определение ее величины с помощью различных датчиков скорости, например тахогенераторов и энкодеров, где есть непосредственно прямая связь между выходными сигналами датчиков и скоростью вращения ротора АД. В тахогенераторе данная взаимосвязь представлена между выходным значением ЭДС и скоростью вращения ротора. В импульсных датчиках – между частотой импульсов и угловой скоростью ротора.

Косвенные методы строятся на математическом аппарате, который позволяет выявлять связь, выраженную в неявном виде между электрическими

величинами, полученными с помощью штатных измерительных средств и скоростью. Наиболее распространенными координатами электропривода, которые используются для оценки скорости, являются токи и напряжения статора АД [31].

Бездатчиковые системы нужны в тех случаях, когда датчик скорости установить на валу двигателя проблематично или экономически невыгодно. При использовании датчика скорости нужен дополнительный канал связи, а поскольку привод ТРН-АД и двигатель могут находиться на удаленном расстоянии друг от друга, то эффективность и надежность такой системы будет зависеть от расстояния между приводом и датчиком.

Стоит отметить, что хорошие наблюдатели скорости практически не уступают прямым методам измерения скорости, а погрешность работы может достигать менее 5% как на высоких скоростях, так и на низких. Большая часть наблюдателей хорошо отрабатывает задание в диапазоне скоростей $\omega_n \dots 0,7\omega_n$, но с выходом за этот предел погрешность начинает расти [32].

На данный момент можно выделить следующие направления в области построения наблюдателей для асинхронных электроприводов, выполненных по схеме ТРН-АД: определение скорости вращения АД на основе ЭДС статора предложенное сотрудниками УРФУ (Браславский И.Я., Нестеров К.Е., Зюзев А.М.) [33-38], нейросетевой датчик скорости (Козлова Л.Е.) [39]. Наблюдателей на основе фильтра Калмана для асинхронных электроприводов с тиристорным регулятором напряжения не разрабатывалось, но есть ряд зарубежных публикаций, где предложены универсальные методики по синтезу бездатчиковых систем Barut, M., Demir, R. Zerdali, E. Inan R. [40] и Mora J.L., Torralba A., Franquelo L.G. [41].

Довольно часто математические модели АД используются для исследования динамических свойств электропривода в различных режимах, но они также могут применяться и для построения наблюдателей скорости. Недостатком такого способа определения скорости является то, что каждая

математическая модель имеет ряд допущений, которые определяются видом и размерностью системы дифференциальных уравнений. Если фильтр Калмана и наблюдатель Люенбергера имеют коррекционные связи, которые позволяют корректировать работу наблюдателя, то при использовании в чистом виде математических моделей АД это может привести к неустойчивой работе.

1.3.1. Определение скорости вращения АД на основе ЭДС статора

Метод, основанный на измерении электродвижущей силы (ЭДС) статора, позволяет оценивать угловую скорость электродвигателя для электроприводов ТРН-АД [3-8].

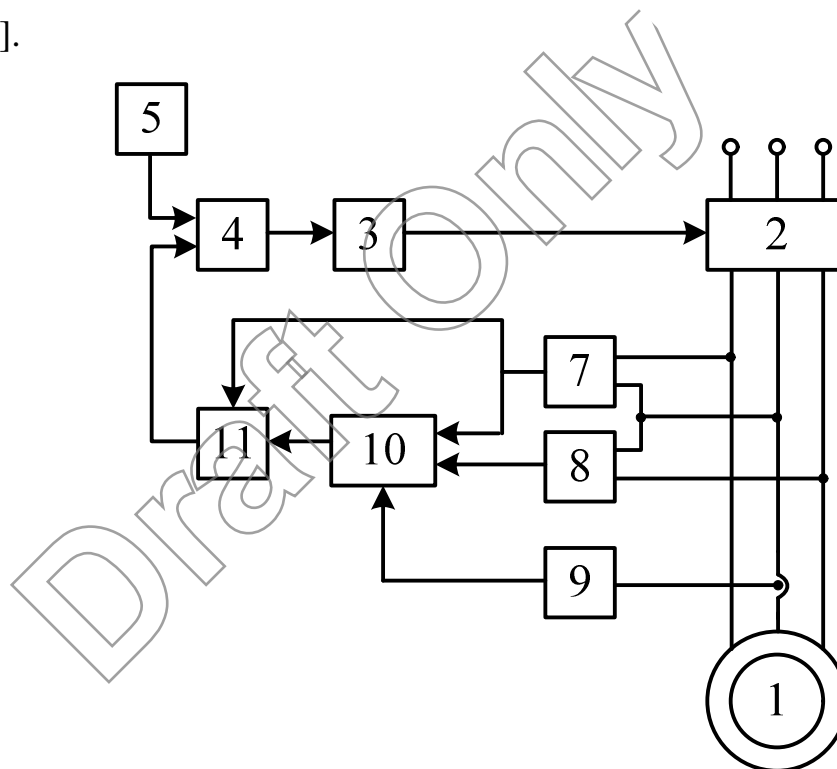


Рис. 1.5. Функциональная схема привода ТРН-АД с вычислителем скорости по ЭДС,

1 – двигатель, 2 – преобразователь напряжения, 3- блок управления, 4 – регулятор частоты вращения, 5 – датчик частоты вращения, 6 – нуль орган, 7,8 – датчики линейного напряжения, 9 – нуль орган, 10 – вычислитель ЭДС, 11 – функциональный блок вычислителя ЭДС

Одной из особенностей работы ТРН является наличие бестоковых пауз или режима прерывистых токов. Поэтому кривая фазного напряжения

электродвигателя включает в себя участки, где ЭДС, зависит от скорости и момента двигателя. Вычисляя ЭДС, с помощью измеренных величин тока и напряжения с каждой фазы, определяется текущая скорость АД [33].

Реализация данного устройства представлена в патенте на изобретение (авторы А.М. Зюзев и К.Е. Нестеров) под номером РФ №2389127 (рис.1.5). Решение указанной задачи достигается путем использования зависимости $\omega = f(E_s, U_s)$, где E_s, U_s – действующие значения ЭДС и напряжения двигателя.

Вычислитель ЭДС выполнен в данном случае на основе нуля органа и реализует следующую зависимость $E_s = f(U_s, T_{\text{БП}})$, где $T_{\text{БП}}$ – длительность бестоковой паузы. Функциональная схема вычислителя ЭДС для ТРН-АД представлена на рис. 1.4. С помощью данных собранных с датчиков тока и напряжения вычисляется вначале ЭДС двигателя:

$$E_s = \frac{1}{3 \sin(T_{\text{БП}})} \sqrt{(U_{\text{AB1}} - U_{\text{AB1}})^2 + (U_{\text{ABK}} - U_{\text{BCK}})^2 - 2(U_{\text{AB1}} - U_{\text{BCK}})(U_{\text{ABK}} - U_{\text{BCK}}) \cos(T_{\text{БП}})}, \quad (1.1)$$

где, $U_{\text{AB1}}, U_{\text{BCK}}$ – статорные линейные напряжения двигателя, полученные вначале бестоковой паузы в фазе, $U_{\text{ABK}}, U_{\text{BCK}}$ – статорные линейные напряжения, полученные в конце бестоковой паузы. Формула расчета ЭДС упрощается, если выходы датчиков напряжения соединить встречно-последовательно:

$$E_s = \frac{1}{3 \sin(T_{\text{БП}})} \sqrt{U_{\text{S1}}^2 + U_{\text{SK}}^2 - 2U_{\text{S1}}U_{\text{SK}} \cos(T_{\text{БП}})}, \quad (1.2)$$

где U_{S1} – сигнал на выходе соединенных встречно-последовательно датчиков напряжения, полученный в начале бестоковой паузы в фазе, U_{SK} – сигнал на выходе соединенных встречно-последовательно датчиков напряжения, полученный в конце бестоковой паузы в фазе [31-35].

Оценка скорости вращения АД $\hat{\omega}_E$ с учетом ранее вычисленной ЭДС будет определяться:

$$\mathfrak{G}_E = 1 - \frac{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_s^2}{2m_k U_s^2 (1 - \sigma) X_s a_r S_K} \right) \left(1 + a_r^2 - \frac{E_s^2 S_K}{2m_k U_s (1 - \sigma) X_s a_r} \right)}}{1 - \frac{E_s^2}{2m_k U_s (1 - \sigma) X_s a_r S_K}}, \quad (1.3)$$

где m_k – значение максимального момента электродвигателя; σ – полный коэффициент рассеяния, X_s – полное индуктивное сопротивление фазу двигателя; a_r – коэффициент затухания роторных цепей при разомкнутом статоре; S_K – критическое скольжение двигателя [33-38].

Особенностью данного метода является измерение ЭДС двигателя в момент бестоковой паузы, но на скоростях близких к номинальным, величина этой бестоковой паузы будет минимальна, а следовательно вычисление ЭДС будет происходить с погрешностью. При работе на пониженных скоростях, как показано в работах [33-38], данный наблюдатель отрабатывает с неплохой точностью, но особенностью данных приводов ТРН-АД является то, что они практически не работают на низких скоростях, в виду большого нагрева и значительного уменьшенного момента на валу двигателя.

1.3.2. Нейросетевой наблюдатель скорости

Для создания наблюдателей могут применять математические модели асинхронного двигателя разного порядка и уровня. Существуют параметрические и непараметрические методы создания математических моделей на основе экспериментальных данных. Параметрические методы обычно строятся на основе систем дифференциальных уравнений и требуют структурной и параметрической идентификации [42]. К непараметрическим методам можно отнести искусственные нейронные сети (ИНС), так как они не имеют априорного строго математического описания для конкретного объекта исследования. Благодаря этому они позволяют с хорошей точностью производить вычисление произвольной непрерывной функции, т.е. с ее

помощью возможно сколь угодно точно аппроксимировать функцию, порожденную любой непрерывной системой [43]. Поэтому нейронные сети нашли широкое применение в качестве эмуляторов и наблюдателей для различных систем управления.

Один из вариантов построения наблюдателя угловой скорости на основе ИНС для электропривода ТРН-АД представлен на рис. 1.6. Входными сигналами для ИНС являются токи и напряжения, которые нормируются в блоке преобразования (БП).

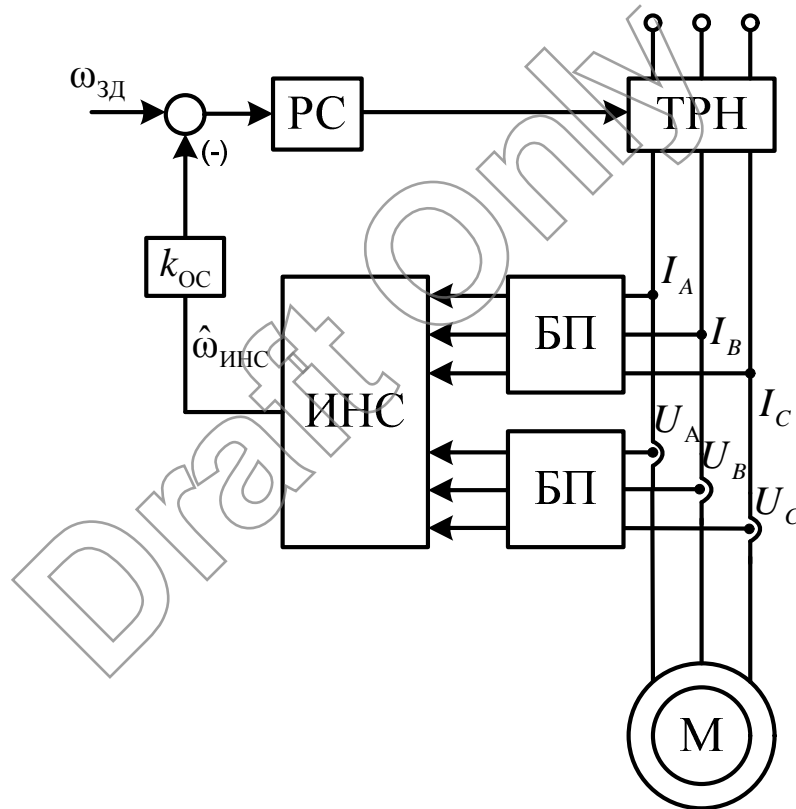


Рис. 1.6. Функциональная схема электропривода с нейросетевым датчиком

РС – регулятор скорости; БП – блок преобразования; ИНС – искусственная нейронная сеть, ТРН – тиристорный регулятор напряжения; k_{OC} – коэффициента обратной связи контура скорости; $\omega_{зд}$ – задание на скорость; $\hat{\omega}_{ИНС}$ – оценка скорости ИНС; I_A, I_B, I_C фазные значения токов; U_A, U_B, U_C фазные.

Особых ограничений к выбору количества и вида входных связей для ИНС нет, но одним из главных требований при построении таких наблюдателей является наличие связи или зависимости между входными и выходными данными. Поэтому в качестве входных воздействий могут быть выбраны как фазные, так и линейные напряжения [44].

Выходной сигнал нейронной сети $\hat{\omega}_{\text{инс}}$ перемножается на коэффициент $k_{\text{ос}}$, затем сравнивается с сигналом задания $\omega_{\text{зд}}$ и текущая ошибка отрабатывается регулятором скорости (РС). На выходе РС формируется нужное управляющее воздействие, которое поступает в ТРН. В итоге, на обмотки АД подается необходимое напряжение для отработки заданной скорости [45].

Основным недостатком нейронных сетей является необходимость в их обучении и от того, какой был выбран метод обучения, структура ИНС и тренировочный шаблон, будет зависеть работоспособность наблюдателя. На данный момент существуют три основных метода обучения нейронной сети: генетические алгоритмы; метод градиентного спуска; алгоритм Левенберга-Марквардта.

На работоспособность нейронной сети влияет также ее структура. Однослойная нейронная сеть имеет простую структуру и легко обучается. Особенностью многослойной нейронной сети является наличие нескольких слоев нейронов и однонаправленная передача сигнала. Нейронная сеть адаптивной резонансной теории (АРТ) представляет собой классификатор и обучается без учителя, лишь на основании входных данных. Этот тип нейронных сетей работает только с двоичными векторами, состоящими из нулей и единиц [46].

Существенным недостатком нейронной сети является получение результата в неявном виде, что затрудняет корректировку или настройку нейросетевого эмулятора. Поэтому приходится каждый раз заново составлять тренировочный шаблон и обучать ИНС уже для текущих параметров объекта. В

результате этого адекватная работоспособность ИНС гарантирована только в окрестности тех точек, где она обучалась.

Если говорить о достоинствах ИНС, то выделяют следующие: параллелизм при обработке информации, низкую чувствительность к помехам, универсальность для решения различных задач моделирования и создания нейроэмуляторов [47]. Рекуррентные сети имеют обратные связи, благодаря которым появляется возможность отражать динамику процесса.

1.3.3. Фильтр Калмана

Фильтр Калмана – это линейный адаптивный фильтр рекурсивного типа, позволяющий получать информацию о параметрах и переменных состояния АД на основании данных измеренных с помощью датчиков в условиях действия на двигатель случайных помех и возмущений [48-51].

В алгоритме калмановской фильтрации в качестве начальных условий выступает оценка состояния системы, которая на каждом шаге цикла корректируется. Входные значения данных, полученные с помощью датчиков, а также их предыдущие значения, последовательно обрабатываются и учитываются алгоритмом. Это является отличительным признаком фильтра Калмана от нерекуррентных алгоритмов. По мере накопления фильтром полезной информации в результате обработки измерений итоговая погрешность оценок должна снижаться, если элементы вектора состояния имеют связь с измеренными величинами [52-54].

Основная сложность применения фильтра Калмана заключается в том, что для его использования необходимо знать адекватные параметры математической модели АД, а также ковариационные матрицы погрешностей измерения и возмущения [48].

Так как в фильтре Калмана текущее значение зависит от предыдущего линейно, то данный наблюдатель хорошо подходит для линейных систем.

Другим недостатком наблюдателей на основе фильтров Калмана является высокая требовательность к вычислительным мощностям, особенно для режима реального времени.

Бездатчиковые системы векторного управления асинхронным электроприводом с наблюдателем на основе фильтра Каламана чувствительны к изменению параметров электродвигателя и зашумленности сигналов, получаемых с датчиков тока и напряжения.

1.4. Перспективные методы идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины

Для обеспечения оценки угловой скорости большинству наблюдателей необходимы параметры схемы замещения АД. От того насколько адекватно они будут определены зависит точность и работоспособность наблюдателя. На сегодняшний день методов, позволяющих производить идентификацию параметров АД, достаточно много: адаптивная идентификация, метод наименьших квадратов, с помощью нейронных сетей.

Адаптивная идентификация параметров, предназначенная для тяговых АД в режиме реального времени, представлена в работе [55]. Данный метод идентификации параметров АД основан на использовании двухфазной математической модели в неподвижной системе координат и ряда допущений, обусловленных использованием тяговых АД средней мощности.

Другой алгоритм определения параметров АД, базирующийся также на использовании математической модели электрической машины. Основная идея данного метода заключается в том, чтобы по измеренным значениям токов и напряжений, предварительно отфильтрованных и преобразованных в двухфазную систему координат, произвести минимизацию функционала методом наименьших квадратов. Относительная погрешность оценки

активного сопротивления ротора R_r составляет не более 36 % , а активного сопротивления статора R_s не более 5 % [56].

Есть узкоспециализированные методы идентификации параметров механической системы, которые основываются на граничных частотах полосы пропускания и используются в резонансных системах [57].

В работах Каширских В.Г. рассмотрена функциональная динамическая идентификации параметров АД различными методами от фильтра Калмана до нейронных сетей [58-61].

Фильтр Калмана фактически является градиентным методом, следовательно, возможно не только попадание в локальный минимум целевой функции с неточно оцененными параметрами, но и вообще получить значение, которое будет колебаться относительно какой-то точки экстремума. Кроме того необходимо формировать ковариационные матрицы шума состояния и шума измерения [60].

Использование нейронных сетей для идентификации параметров АД затруднено тем, что необходимо иметь целевую функцию при обучении с «учителем». Задачу идентификации с помощью нейронных сетей рассматривают как аппроксимацию многомерной функции, где необходимо выявить связь между входными и выходными данными [62, 63].

В работе [56] рассмотрен комплексный подход к идентификации параметров АД для динамического режима и для статики. Ряд исследований показали, что большая часть информации, по которой определяются параметры схемы замещения АД, заложено именно в динамике.

Из вышерассмотренных методов идентификации параметров было выявлено, что для большинства методов нужна какая-то начальная информация в виде экспертных правил или параметров АД (момент инерции, индуктивности). Поэтому возникла необходимость в разработке метода идентификации параметров, который позволял бы определять одновременно

электромагнитные и механические параметры АД по фазным значениям токов, напряжений и скорости.

1.5. Постановка задач исследования

1. При изучении ряда работ было установлено, что для обеспечения более эффективного управления асинхронным электроприводом по схеме ТРН-АД, необходимо иметь обратную связь по скорости. Замкнутая система по скорости позволяет повысить качество пуска электропривода и обеспечить заданную скорость в статике. На сегодняшний день большая часть разрабатываемых наблюдателей предназначена для частотного управления, что в ряде случаев не позволяет их распространить на все типы АЭП ТРН-АД.

2. Наблюдатели, базирующиеся на математическом описании асинхронного двигателя, нуждаются в точных параметрах схемы замещения. Ввиду того, что данные параметры в большинстве случаев отличаются от паспортных, то необходим алгоритм, позволяющий их идентифицировать с высокой точностью.

3. Система управления ТРН-АД, включающая в себя наблюдатель скорости является менее устойчивой, чем система получающая сигнал непосредственно с датчика скорости, следовательно, необходимо вводить корректирующие воздействия для повышения устойчивости работы наблюдателя при изменении состояния электропривода.

1.5. Выводы по первой главе

1. Из анализа научных публикаций как отечественных, так и зарубежных было выявлено, что асинхронный электропривод с тиристорным регулятором напряжения продолжает активно использоваться. Для

повышения эффективности электропривода ТРН-АД, ищутся новые пути его усовершенствования.

2. Техничко-экономический анализ современных разработок показал, что электроприводы с тиристорным регулятором напряжения являются надежными, имеют неплохие массогабаритные показатели и значительно меньшую цену по сравнению с преобразователями частоты той же мощности. Ценовая разница в цене этих типов электроприводов с увеличением мощности растет.
3. В ряде случаев поставить датчик скорости на валу двигателя проблематично или экономически невыгодно, поэтому необходимо использовать бездатчиковые системы управления асинхронным электроприводом по схеме ТРН-АД.
4. Количество разрабатываемых бездатчиковых устройств для электроприводов с фазным управлением крайне мало. Большая часть наблюдателей угловой скорости предназначены для частотного управления, которые не учитывают особенностей электроприводов ТРН, таких как нелинейное напряжение и изменение выходной мощности. Следовательно, тема диссертационного исследования является современной и актуальной.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРН-АД

2.1. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя

Имитационная модель асинхронного электропривода была реализована в трехфазной системе координат. Модель позволяет исследовать влияние несимметрии напряжения подаваемого на обмотки АД, обрыв фаз статора, а также влияние несинусоидальности напряжения на электромеханические процессы.

Математическое описание АД в трехфазной системе координат известно из ряда работ [64,65], поэтому здесь приводятся только основные выкладки, необходимые для пояснения хода решения задачи данной диссертационной работы.

Система дифференциальных уравнений, описывающая процессы в статоре АД:

$$\begin{cases} U_A = R_S i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ U_B = R_S i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ U_C = R_S i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases}, \quad (2.1)$$

где R_S – сопротивление фазы статора, i_A, i_B, i_C – токи статора, U_A, U_B, U_C – напряжения статора, ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокосцепление статора.

Система дифференциальных уравнений, описывающие процессы в роторе АД:

$$\begin{cases} 0 = R_r i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + (\psi_b - \psi_c)\omega / \sqrt{3} \\ 0 = R_r i_b + \frac{d\psi_b}{dt} + (\psi_c - \psi_a)\omega / \sqrt{3} \\ 0 = R_r i_c + \frac{d\psi_c}{dt} + (\psi_a - \psi_b)\omega / \sqrt{3} \end{cases}, \quad (2.2)$$

где R_r – сопротивление фазы ротора, i_a, i_b, i_c – токи ротора, ψ_a, ψ_b, ψ_c – потокосцепления ротора, ω – угловая скорость вращения вала двигателя.

Матричное представление выше приведенных уравнений в нормальной форме Коши будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_1]^{-1} \left\{ [U] - \left([R] + [L_2] \frac{\omega_{ДВ}}{\sqrt{3}} [i] \right) \right\}, \quad (2.3)$$

где текущие значения матриц представлены ниже:

$$\text{где } L_1 = \begin{bmatrix} L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_s & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & -L_r & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_r & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_r \end{bmatrix},$$

$$i = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & -k_1 & 0 & k_2 & -k_2 \\ -k_1 & 0 & k_1 & k_2 & 0 & k_2 \\ k_1 & -k_1 & 0 & k_2 & -k_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix},$$

$k_1 = 3L_m/2, k_2 = (L_r + L_m/2)$; индуктивности по Т-образной схеме замещения АД: L_m – индуктивность намагничивания, L_r – индуктивность ротора, L_s – индуктивность статора.

Момент АД определяется по следующему выражению:

$$M_{\text{ДВ}} = z_p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)], \quad (2.4)$$

где z_p – число пар полюсов.

На рис. 2.1 представлена структурная схема имитационной модель АД в трехфазной системе координат, которая была реализована в Matlab Simulink.

Основными блоками данной структурной схемы являются Matrix Multiply и inv, где первый предназначен для реализации умножения матрицы на столбец, а второй для транспонирования.

С источника питания на вход модели поступает вектор напряжения U , затем из текущего сигнала согласно выражению (2.3) вычитается многочлен, состоящий из матрицы R , L_2 , вектора тока i и множителя скорости ω . Полученный в итоге результат помножается на обратную матрицу L_1 и интегрируется.

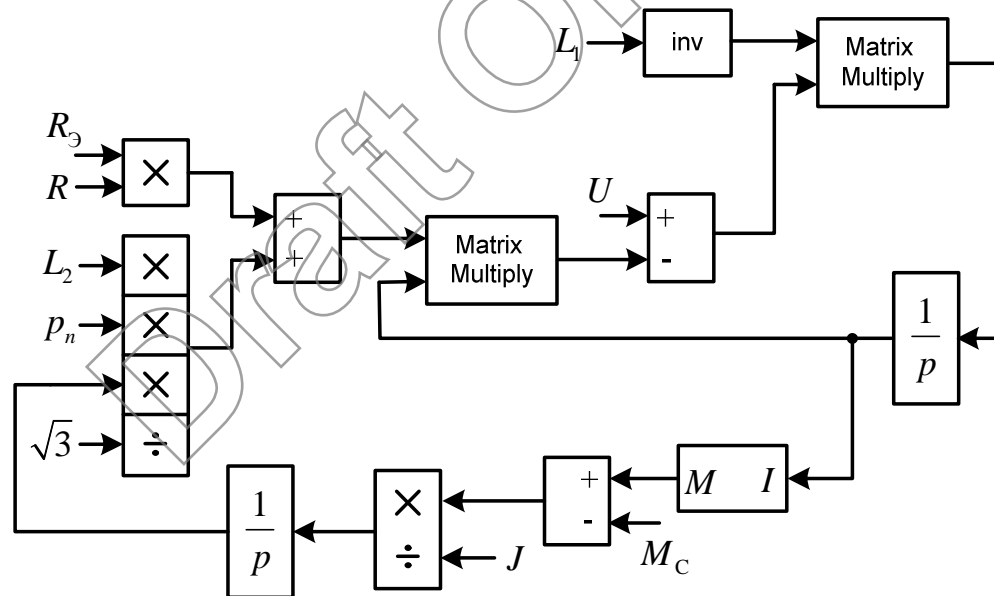


Рис. 2.1. Структурная схема трехфазной математической модели АД

Для моделирования изменения параметров системы была введена матрица эквивалентных сопротивлений R_3 , с помощью элементов которой можно изменять значение сопротивления как в обмотке статора и так в обмотке ротора. Момент электропривода определялся по выражению (2.4), и далее

согласно основному уравнению электропривода вычислялась скорость вращения вала двигателя.

2.2. Разработка имитационной модели электропривода ТРН-АД

Силовая часть электроприводов типа ТРН-АД обычно выполняется на основе тиристоров или симисторов, которые относятся к классу частично управляемых ключей. Для выявления основных особенностей выше указанных полупроводниковых приборов в электроприводе ТРН-АД была создана имитационная модель одной из фаз АД в виде активно-индуктивной нагрузки.

На рис. 2.2 представлена модель, реализованная в Matlab Simulink с применением библиотеки силовых элементов SimPowerSystems, которая состоит из двух встречно включенных тиристоров и блока управления. Синхронизация системы управления ТРН осуществляется по напряжению. В качестве нагрузки при моделировании работы ТРН с одной фазой АД выступает RL-цепочка [66,67].

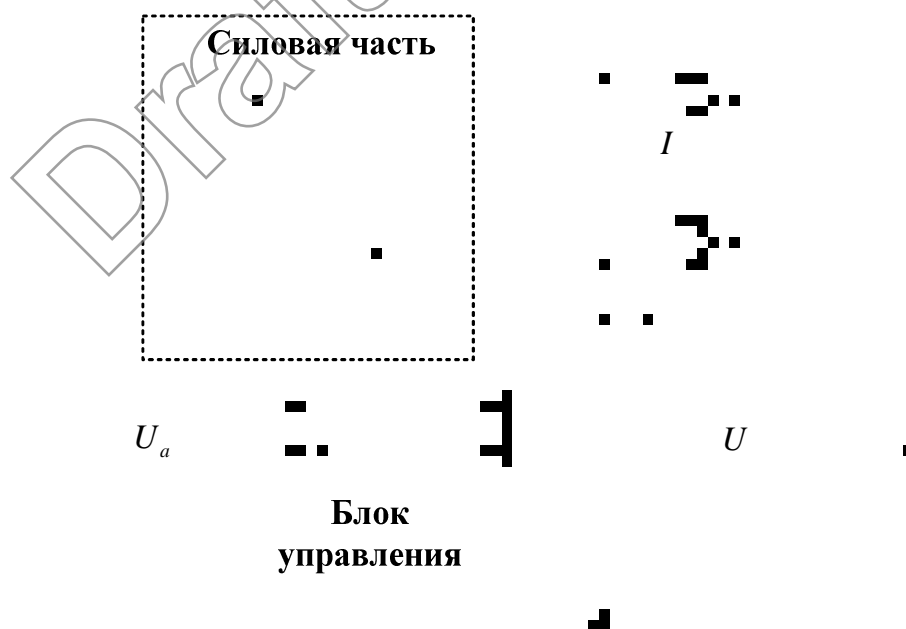


Рис. 2.2. Имитационная модель одной из фаз ТРН с активно-индуктивной нагрузкой

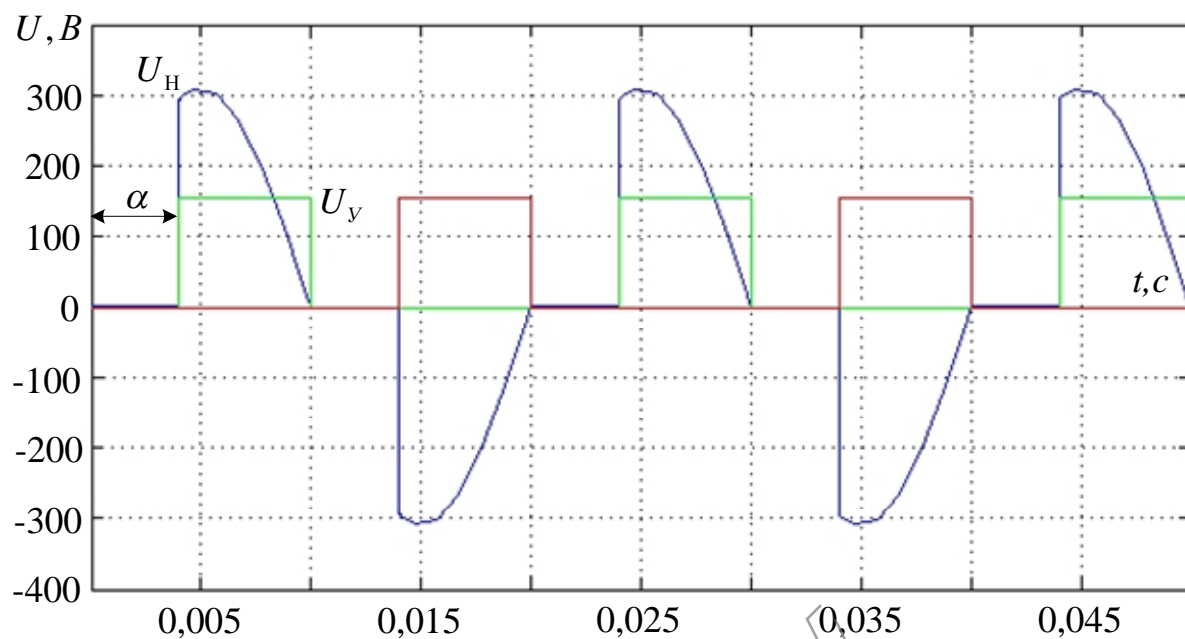


Рис. 2.3. Сигнал управления тиристорами и напряжение в цепи нагрузки
(при активной нагрузке $R_H = 2 \text{ Ом}$, $L_H = 0 \text{ Гн}$)

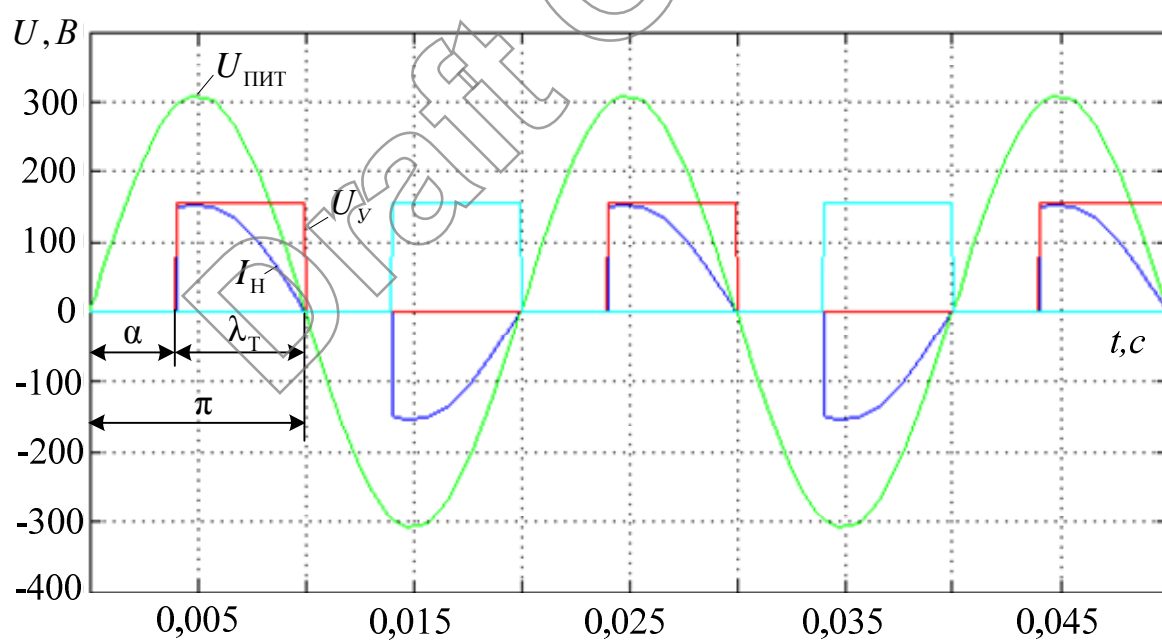


Рис.2.4. Сигнал управления тиристорами, ток в цепи нагрузки,
напряжение питания (при активной нагрузке $R_H = 2 \text{ Ом}$, $L_H = 0 \text{ Гн}$)

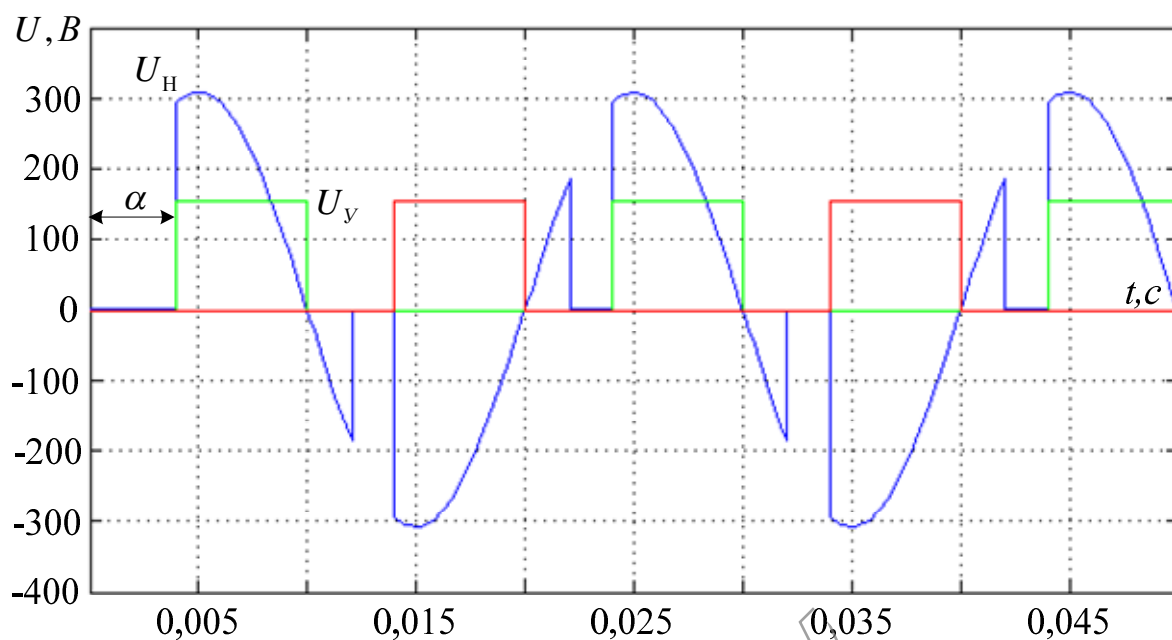


Рис. 2.5. Сигнал управления тиристорами и напряжение в цепи нагрузки
(при активно-индуктивной нагрузке $R_H = 2 \text{ Ом}$, $L_H = 5 \text{ мГн}$)

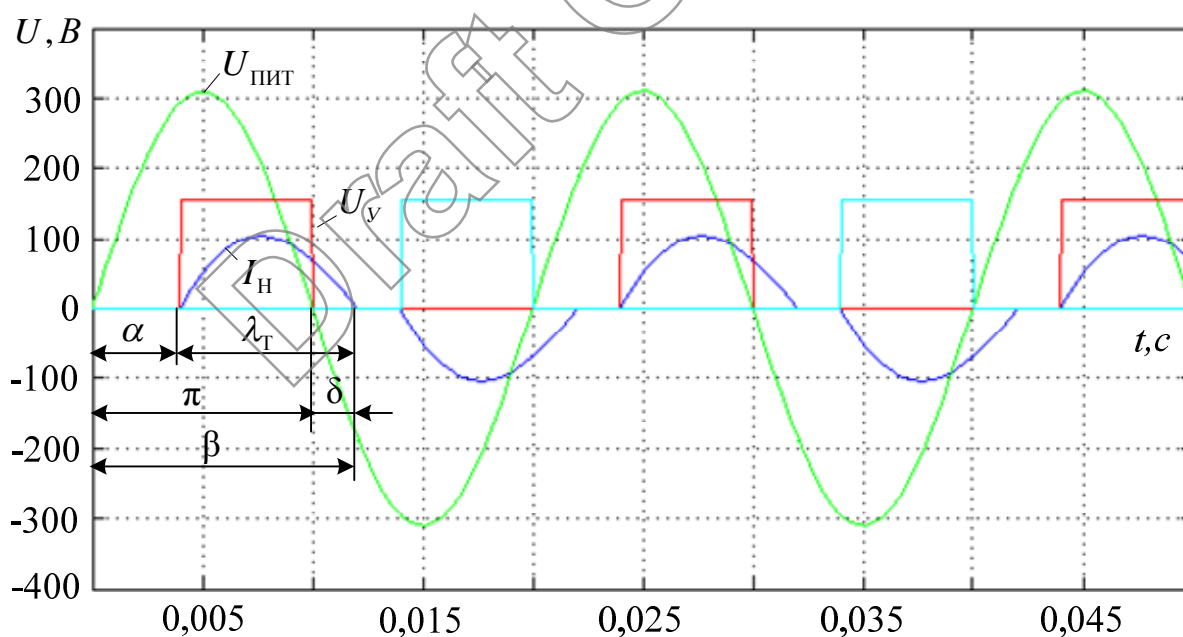


Рис. 2.6. Сигнал управления тиристорами, ток в цепи нагрузки, напряжение питания
(при активно-индуктивной нагрузке $R_H = 2 \text{ Ом}$, $L_H = 5 \text{ мГн}$)

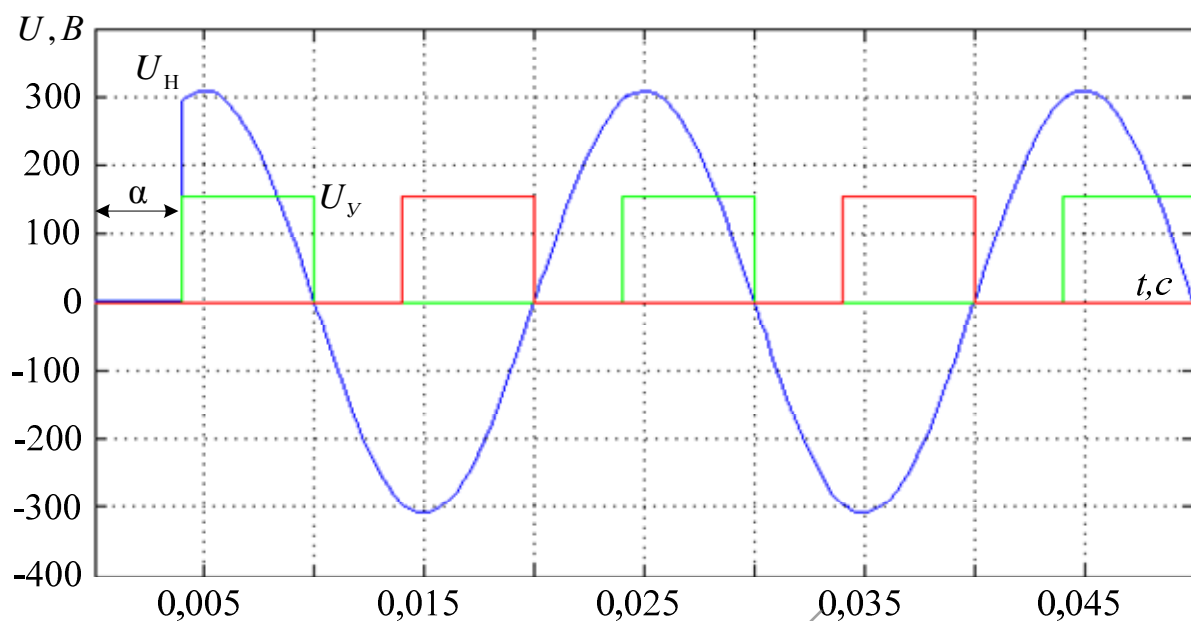


Рис. 2.7. Сигнал управления тиристорами и напряжение в цепи нагрузки (при активно-индуктивной нагрузке $R_H = 2$ Ом, $L_H = 25$ мГн)

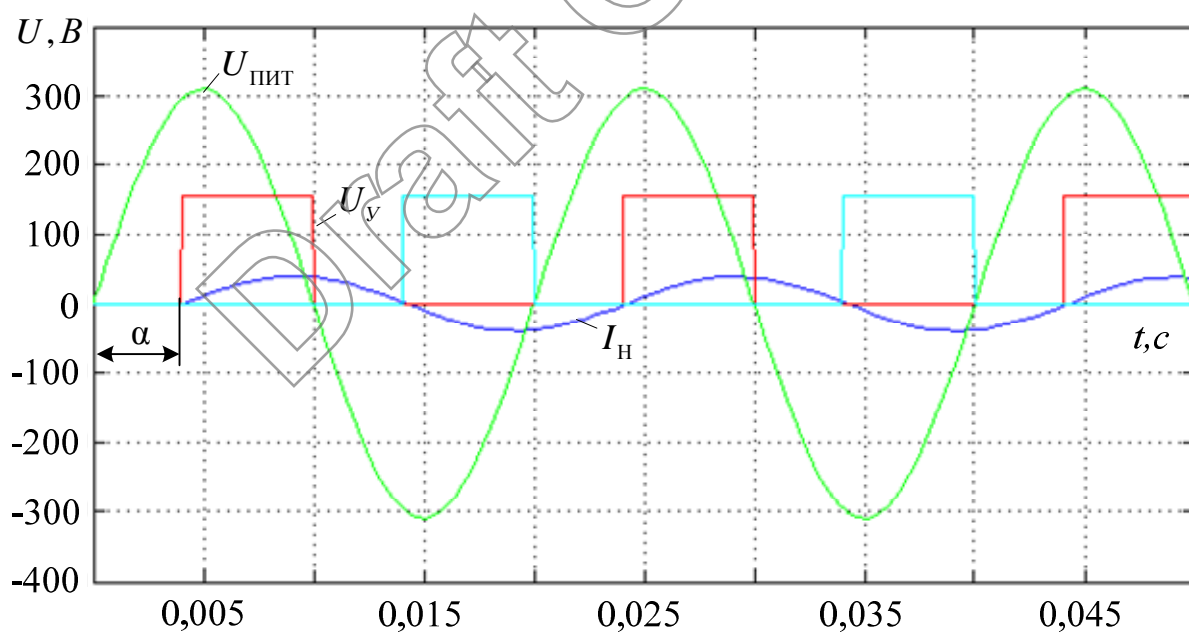


Рис. 2.8. Сигнал управления тиристорами, ток в цепи нагрузки, напряжение питания (при активно-индуктивной нагрузке $R_H = 2$ Ом, $L_H = 25$ мГн)

При работе силовых тиристоров ТРН на чисто активную нагрузку формы напряжения и тока повторяют друг друга. Длительность протекания тока в цепи определяется непосредственно углом управления (рис. 2.4, рис. 2.3). В данном случае угол управления был выбран 72° , следовательно, ток в цепи протекал в течение времени $180^\circ - 72^\circ$. При вводе в цепь активно-индуктивной нагрузки возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует нарастанию и спаданию тока. В этом случае форма тока (рис. 2.6) и напряжения (рис. 2.5) будут отличаться друг от друга. Угол проводимости λ_T определяется здесь как разность между углом отпирания α и углом запираания β . При увеличении индуктивной нагрузки до значения $L_H = 25 \text{ мГн}$ тиристоры не успевают закрываться и ток будет протекать в течение всего периода (рис. 2.7, рис. 2.8) [66-68].

Из выше сказанного можно сделать вывод, что для полноценного моделирования системы ТРН-АД необходимо учитывать влияние активно-индуктивной нагрузки. При управлении данными системами снижается быстродействие в виду того, что тиристоры не закрываются в точке естественной коммутации. Уменьшается рабочий диапазон регулирования углов, который связан с α_{\min} . При регулировании угла в интервал от 0 до α_{\min} при активно-индуктивной нагрузке напряжение на выходе будет повторять входное [69-71].

Для проведения исследований была разработана имитационная модель асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД в Matlab2007b/Simulink (рис. 2.9).

Источник питания формирует синусоидального напряжения U_A, U_B, U_C сдвинутые относительно друг друга на 120 градусов.

Силовая часть электропривода ТРН-АД представлена на рис. 2.10. Она состоит из трех пар встречно включенных тиристоров (VS1...VS6), ключей K1, K2, K3, и блока реверса. Тиристоры управляются с помощью сигналов, $t_1, t_{01}, t_2, t_{02}, t_3, t_{03}$. Элементы силовой части в модели выполнены на основе

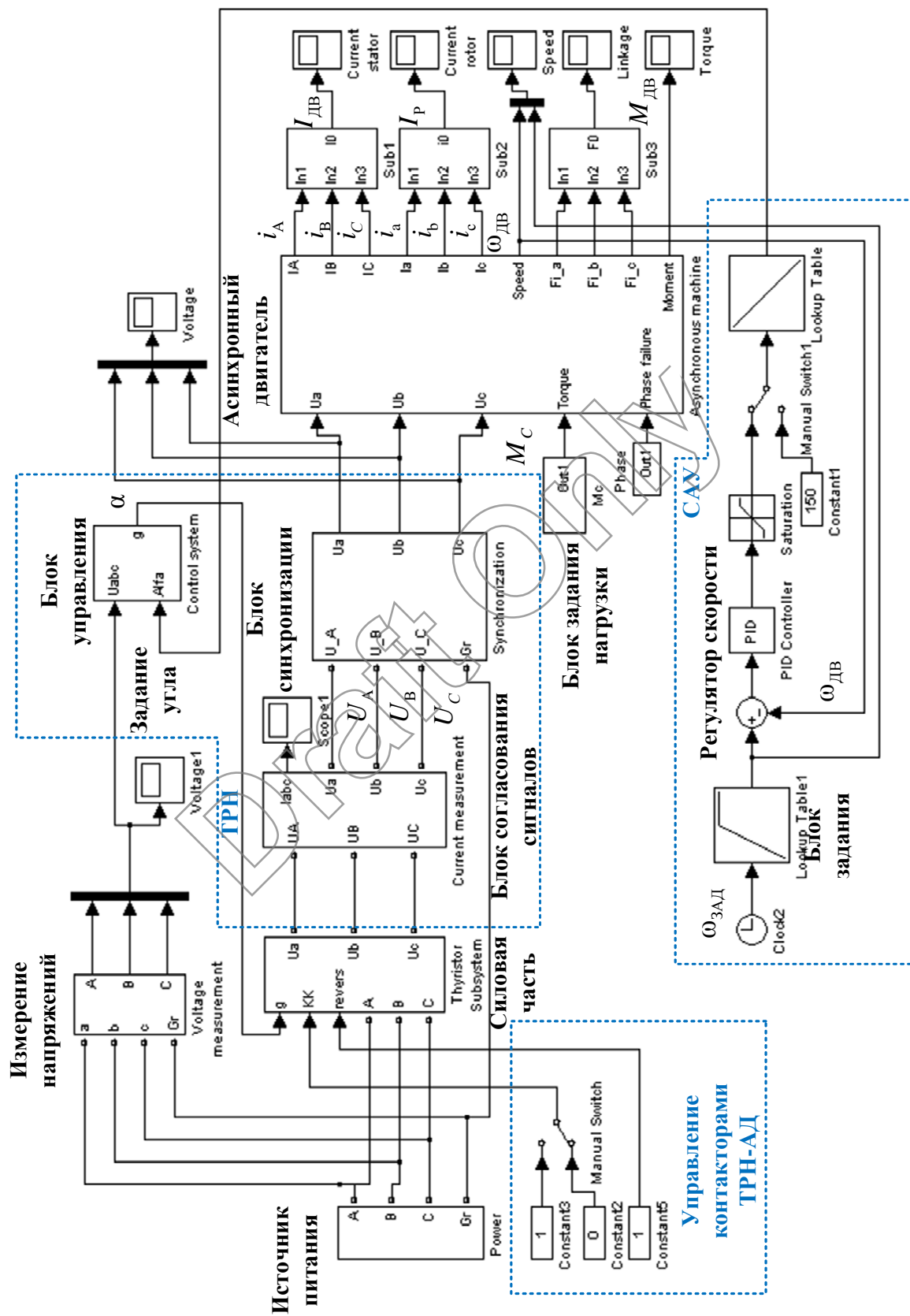


Рис. 2.9. Имитационная модель асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД

блоков, взятых из библиотеки SimPowerSystems [72,73]. Блок реверса меняет чередование фаз с помощью контакторов. Ключи К1, К2, К3 позволяют зашунтировать силовые тиристоры и подключить источник питания к АД напрямую. Имитация искажения сигналов напряжения, подаваемых на обмотки АД, осуществляется с помощью блока согласования силовых сигналов, идущих непосредственно с преобразователя ТРН на электродвигатель.

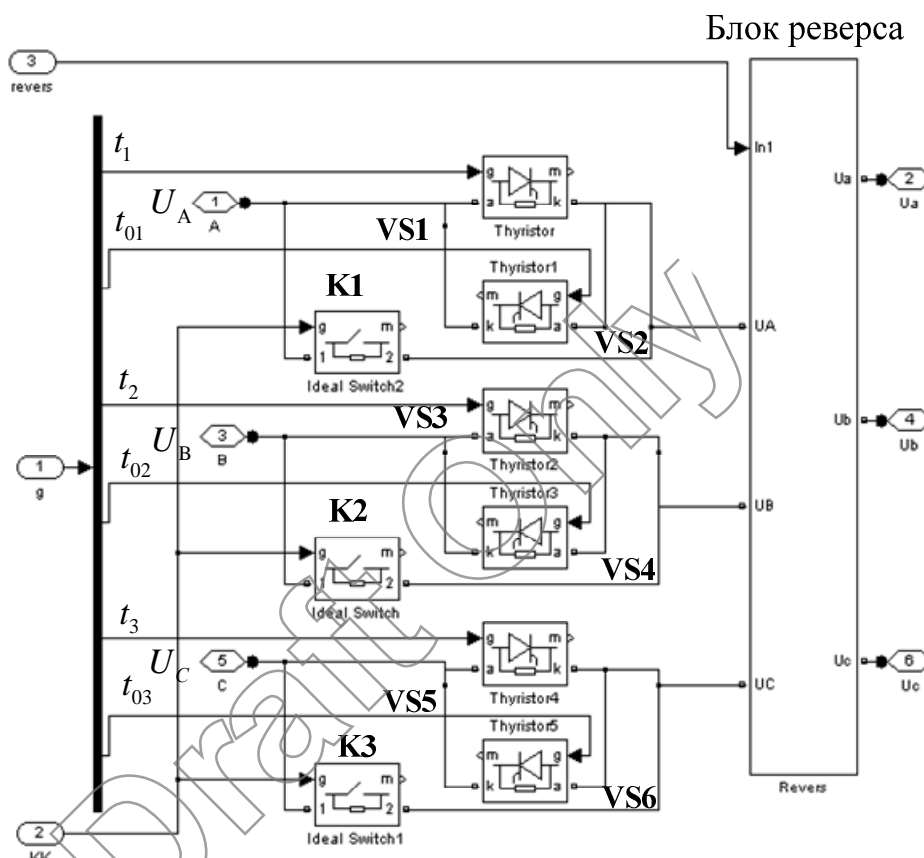


Рис. 2.10. Силовая часть имитационной модели ТРН-АД

Формирование управляющих сигналов в имитационной модели осуществляется с помощью блока управления. Данный блок состоит из двух частей. Первая часть отвечает за синхронизацию с сетью и подачу импульсов при переходе синусоидального напряжения через ноль. Вторая формирует непосредственно управляющие импульсы для тиристоров. Принцип работы блока синхронизации иллюстрируется рис. 2.10 б). В зависимости от дискретности датчиков напряжения формируется зона от U_{\min} до U_{\max} . При входе напряжения в эту зону компаратор срабатывает и выдается импульс, что

сигнализирует о переходе синусоиды через ноль. Для других фаз принцип работы данной системы аналогичен.

Система управления была реализована с помощью блока S-function Builder программным методом с шагом дискретизации 0,00001 с.

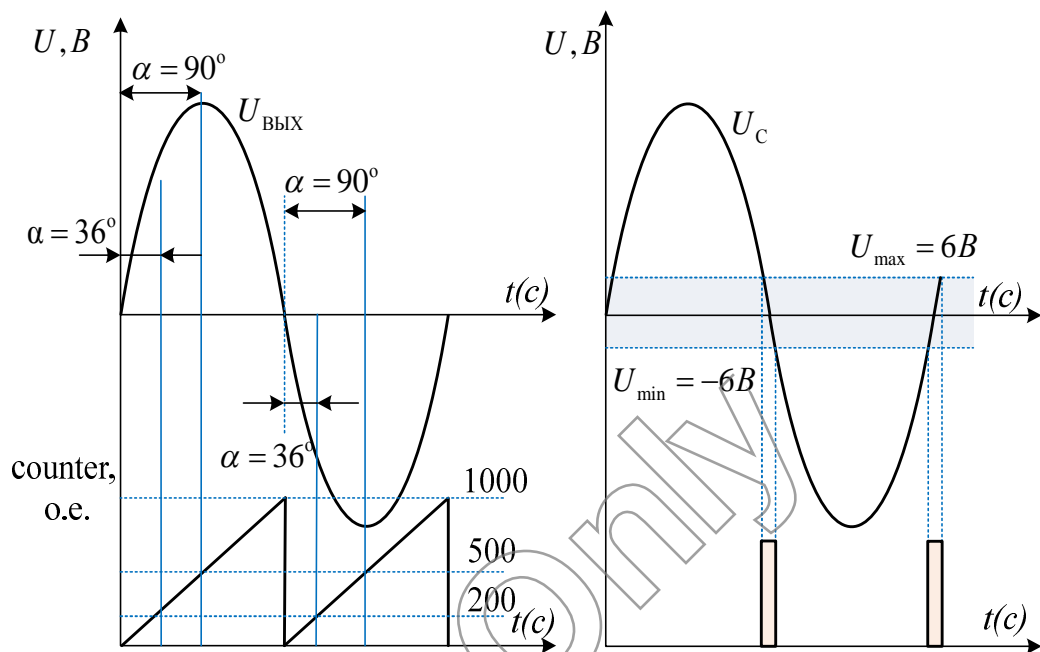


Рис. 2.11. Осциллограммы, иллюстрирующие работу СИФУ:

а) формирование управляющих импульсов СИФУ, б) алгоритм работы блок синхронизации

Работа системы управления ТРН осуществляется следующим образом: имеется три счетчика counter, counter1, counter2 (рис. 2.11), которые запускаются в момент прохождения синусоиды через ноль. При достижении определенного значения счетчика формируется управляющий сигнал и подается на тиристорную пару. В зависимости от того какая полуволна напряжения (отрицательная или положительная) открывается соответствующий тиристор в своей паре.

Полному открытию или 180 градусам для счетчиков соответствует значение равное 1000, следовательно, для 90 градусов будет 500, а для 1 градуса 5,5. Так как переменная counter инициализирована как integer (целочисленное число), то будет наблюдаться небольшая погрешность при регулировании.

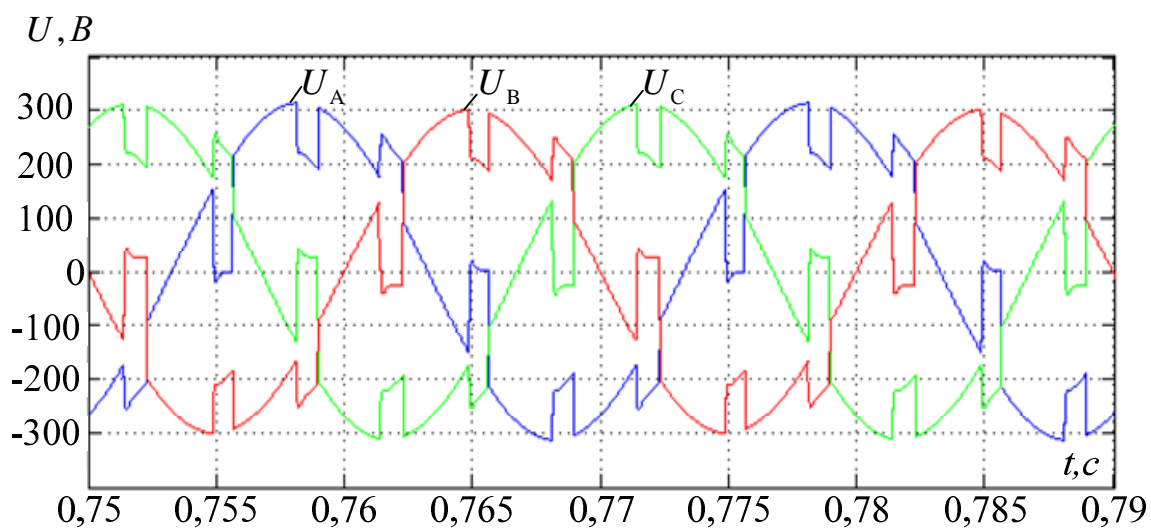


Рис. 2.12. Диаграммы выходных напряжений ТРН

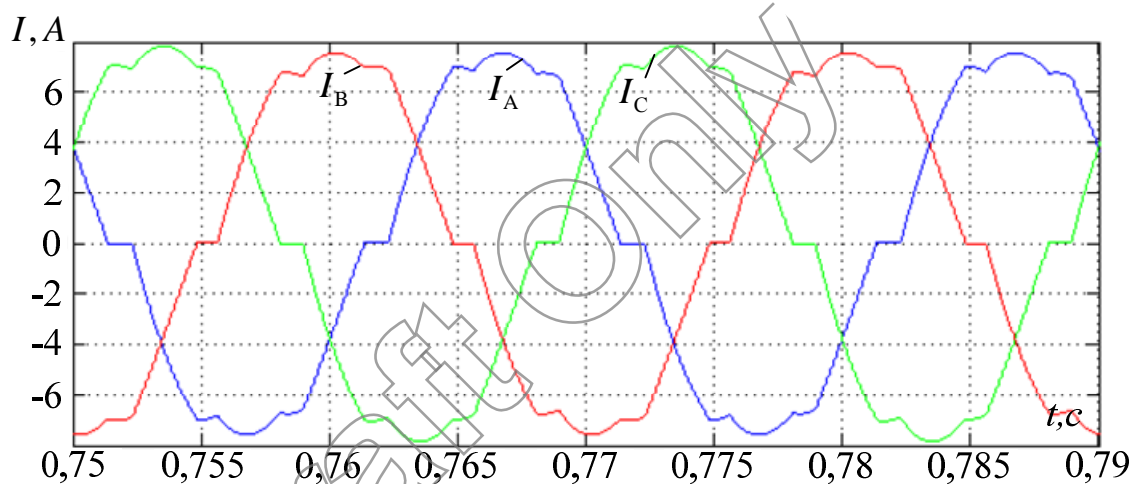


Рис. 2.13. Переходные процессы токов

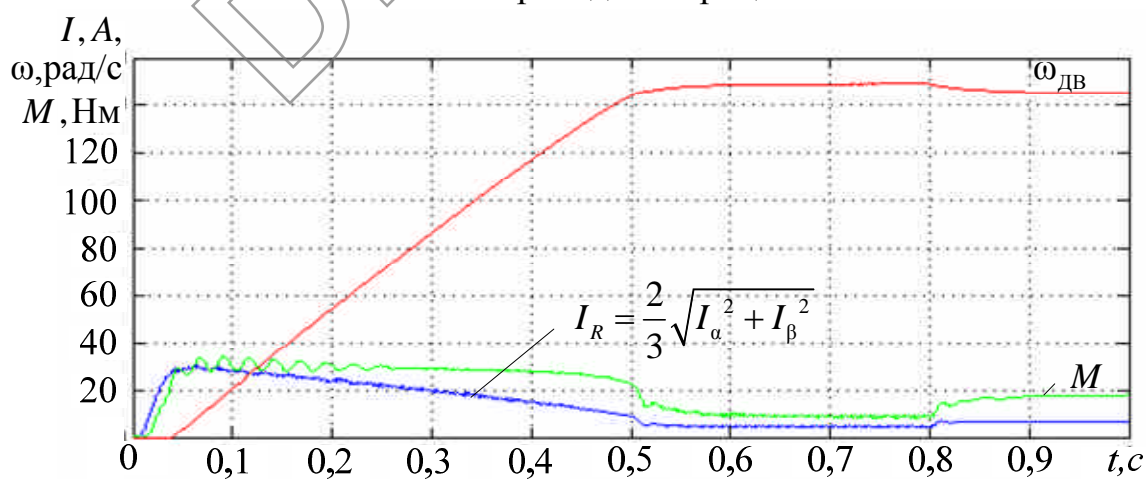


Рис. 2.14. Переходные процессы скорости $\omega_{ДВ}$, момента M , и модуля результирующего тока I_R

Асинхронный двигатель реализован как трехфазная машина на основе структурной схемы, представленной на рис. 2.9. При моделировании для согласования физических сигналов (токов и напряжений) ТРН и АД в блоке согласования сигналов использовались ресурсы библиотеки SimPowerSystems.

На диаграммах напряжений (рис.2.12) и токов (рис. 2.13) АД отчетливо видно влияние ЭДС двигателя на форму токов и напряжений. Переходные процессы скорости момента и модуля результирующего тока приведены на рис. 2.14.

Система автоматического управления (САУ) АЭП состоит из задатчика интенсивности, регулятора скорости, блока ограничения. Формирование разгонной характеристики осуществляется с помощью задатчика интенсивности. В качестве регулятора скорости используется элемент PID Controller из стандартного набора библиотеки Simulink. Блок Lockuptable позволяет реализовать обратную зависимость между углом задания и скоростью задания.

2.3. Основные допущения при математическом моделировании электропривода ТРН-АД

При моделировании сложных нелинейных систем возникают допущения, связанные с конечным числом дифференциальных уравнений. В зависимости от поставленной задачи и текущих вычислительных мощностей математические модели они могут быть расширены. Стоит отметить, что принимаемые допущения при моделировании сложных систем нередко искажают сущность процесса.

При моделировании асинхронного двигателя были приняты следующие допущения [76,77]:

- не учитываются потери в стали;
- рабочее поле электрической машины считается плоскопараллельным;

- учитываются только первые пространственные гармоники;
- не учитываются насыщения путей рассеяния и взаимное влияние потоков рассеяния;
- симметричные обмотки статора и ротора;
- линейные электромагнитные связи;
- не учитывается вытеснение тока;
- пренебрежение потерями стали и вихревыми токами;
- синусоидальное распределение магнитных полей.

При построении моделей ТРН принимались следующие допущения:

- учитывается только первая гармоника напряжения;
- СИФУ не имеет задержек;
- не учитываются инерционность датчиков и наводимые помехи;
- погрешность средств измерения (датчики тока, напряжения, скорости) и СИФУ определяется шагом модели;
- у тиристоров линейная вольтамперная характеристика.

2.4. Исследование имитационной модели электропривода ТРН-АД при работе на типовых механических нагрузках

Большая часть электроприводов ТРН используется как плавный пускатель для АД. Из работ [33-38] было установлено, что применение замкнутых систем ТРН по скорости позволяет не только осуществлять управление по скорости, но и повысить качество пуска АД. Авторы данных работ доказали, что заданную разгонную характеристику электродвигателя и темп разгона при изменяющемся моменте инерции и нагрузки на рабочем органе возможно обеспечить только в замкнутой системе по скорости.

Было проведено исследование пусковых режимов электропривода ТРН-АД как для разомкнутой, так и для замкнутой системы с характерным типом нагрузок для данных электроприводов.

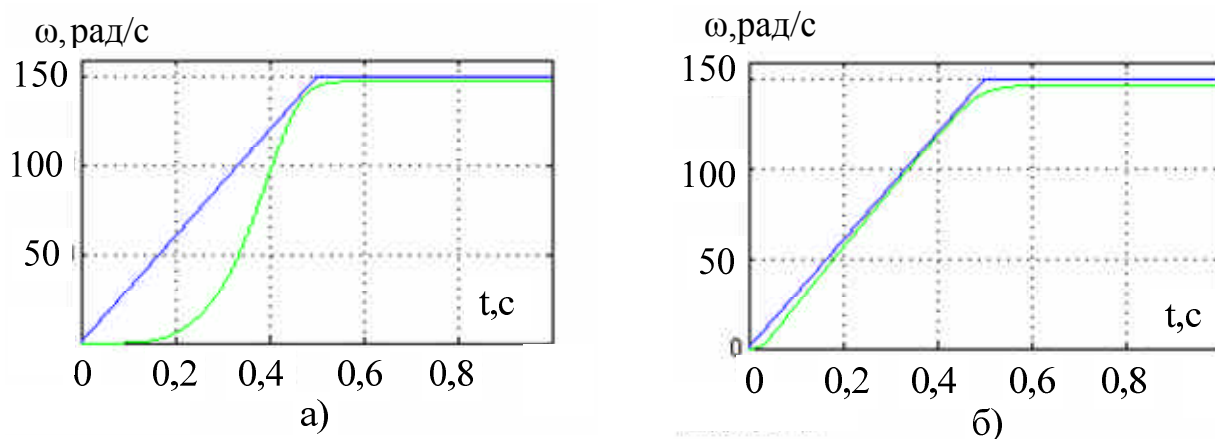


Рис. 2.15. Переходные процессы скорости ЭП ТРН-АД при работе на вентиляторной нагрузке (а – разомкнутая систем, б – замкнутая система)

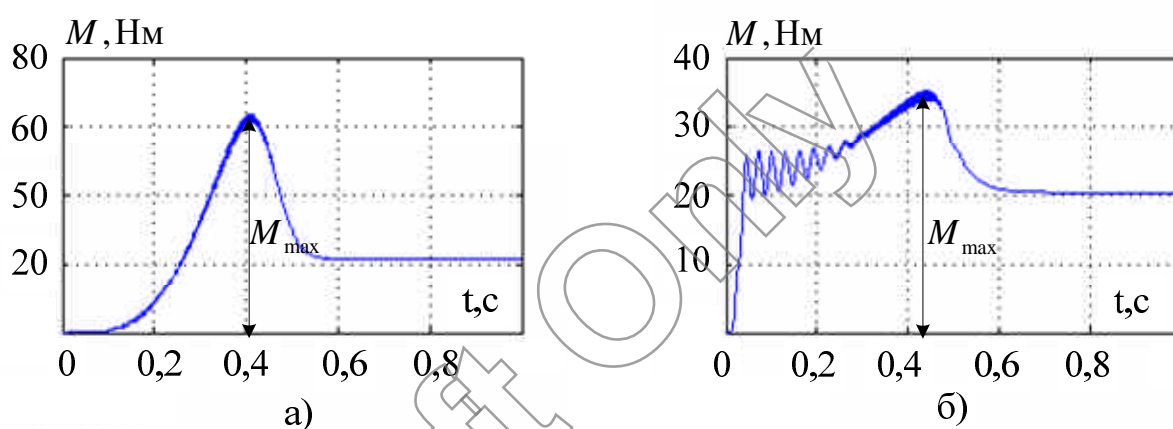


Рис. 2.16. Переходные процессы момента ЭП ТРН-АД при работе на вентиляторной нагрузке (а – разомкнутая систем, б – замкнутая система)

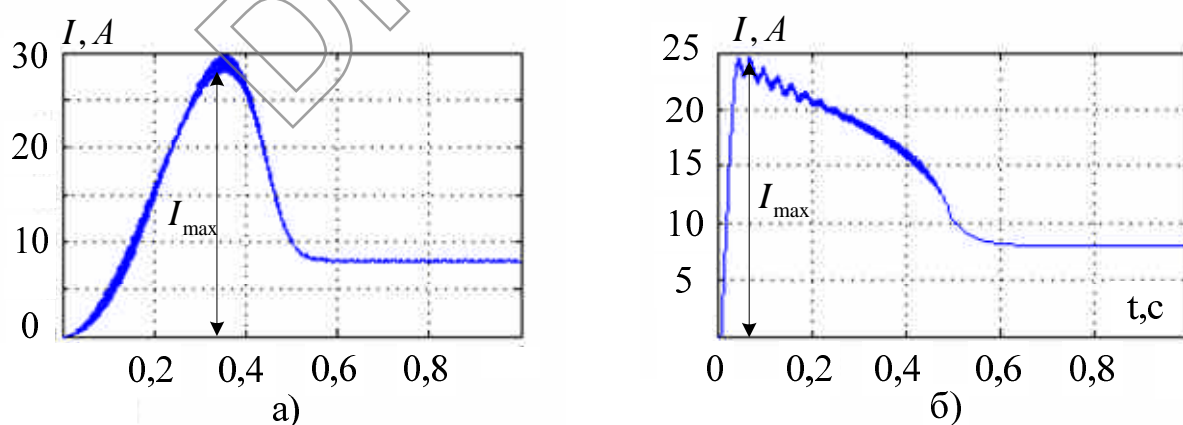


Рис. 2.17. Переходные процессы результирующего модуля тока в ЭП ТРН-АД при работе на вентиляторной нагрузку (а – разомкнутая систем, б – замкнутая система)

Типовыми нагрузочными механическими характеристиками для ТРН является насосная и вентиляторная. Одним из главных свойств данных нагрузочных характеристик является снижение момента сопротивления с уменьшением скорости.

Исследование имитационной модели электропривода ТРН-АД проводилось только на вентиляторной нагрузке ввиду того, что механические характеристики большинства насосов и вентиляторов примерно одинаковые. Современные устройства ТРН-АД позволяют осуществлять плавный пуск электроприводов насосных станций с настроечными параметрами для вентиляторов.

Для проведения опытной проверки использовалась имитационная модель в Matlab Simulink и АД с параметрами, представленными в табл. 2.1.

Таблица 2.1

P_H , кВт	f , Гц	R_s , Ом	R_r , Ом	L_s , Гн	L_r , Гн	L_m , Гн	z_p	n_H , об/мин
3	50	0,078	0,053	0,0002515	0,0004138	0,007	4	1420

Нагрузка для ТРН-АД определялась по следующему выражению [74,75]:

$$M_{CB} = M_{C0} + M_C \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^{\alpha_1}, \quad 2.5$$

где M_{CB} – вентиляторный тормозной момент; M_{C0} – момент механических потерь на трение; M_{C0} – статический момент вентилятора при номинальной скорости вращения ω_H , α_1 – коэффициент пропорциональности для вентиляторной нагрузки.

Для адекватности исследования формы разгонных характеристик, как для замкнутой, так и для разомкнутой системы были выбраны одинаковые. Из рис. 2.15 видно, что для разомкнутой системы характерна большая динамическая ошибка по скорости, чем для замкнутой системы. Пусковой ток (рис.2.17) и

момент (рис.2.16) практически в два раза меньше по сравнению с системой, где нет датчика скорости.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что качество пуска АД при наличии обратной связи по скорости в электроприводе ТРН повышается. Уменьшаются пусковые значения токов и моментов, разгон двигателя осуществляется по заранее заданной характеристике и обеспечивается заданный темп разгона. Обратная связь по скорости также позволяет обеспечить жесткость регулировочных характеристик и повысить устойчивость электропривода при работе на низких скоростях.

2.5. Выводы по второй главе

1. Разработана структура имитационной модели асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения в программной среде Matlab Simulink. Для полноценного моделирования процессов электропривода ТРН-АД необходимо использовать имитационную модель АД в трехфазной системе координат в виду искажения входных напряжений при изменении угла управления.
2. Особенности работы электроприводов ТРН-АД является как влияние ЭДС статора двигателя, так и угла управления на форму токов и напряжений, которые необходимо учитывать при разработке имитационной модели.
3. В результате исследования на имитационной модели асинхронного электропривода ТРН-АД было определено, что с вводом обратной связи по скорости повышается не только качество управления, но и улучшаются пусковые режимы АД, а именно, уменьшаются пусковые токи и пусковой момент. Двигатель разгоняется с заданным темпом разгона, что позволяет контролировать пуск АД на всем участке переходного процесса.

3. РАЗРАБОТКА КОСВЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ ТРН-АД

3.1. Принципы построения наблюдателей Люенбергера

Американский учёный Д. Г. Люенбергер разработал структуру наблюдателя, которая в последствие была названа его именем [74]. В основе данного наблюдателя лежит обратная связь, которая при определенных параметрах обеспечивает затухание ошибки. Рассмотрим модель линейной стационарной системы в пространстве состояний [78-80]:

$$\begin{cases} \dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t) \\ \vec{y}(t) = C\vec{x}(t) \end{cases}, \quad (3.1)$$

где $\dot{\vec{x}}(t)$ – вектор состояния, A – матрица объекта, B – матрица управления, C – матрица выхода, $\vec{u}(t)$ – вектор управления.

Наблюдатель тогда будет описывать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\vec{x}}}(t) = \hat{A}\hat{\vec{x}}(t) + \hat{B}\vec{u}(t) \\ \hat{\vec{y}}(t) = \hat{C}\hat{\vec{x}}(t) \end{cases}, \quad (3.2)$$

если принять во внимание, что параметры объекта известны, то $A = \hat{A}, B = \hat{B}, C = \hat{C}$.

Математическое описание наблюдателя Люенбергера:

$$\dot{\hat{\vec{x}}}(t) = A\hat{\vec{x}}(t) + B\vec{u}(t) + K(\vec{y}(t) - \hat{\vec{y}}(t)) \quad (3.3)$$

Ошибка наблюдателя вычисляется с помощью следующего выражения:

$$\vec{e}(t) = \vec{x}(t) - \hat{\vec{x}}(t) \quad (3.4)$$

Динамика наблюдателя определяться матрицей L :

$$L = A - KC, \quad (3.5)$$

где K – корректирующее воздействие.

Ошибка наблюдателя, выраженная через матрицу динамики объекта:

$$\dot{\vec{e}}(t) = L\vec{e}(t) \quad (3.6)$$

Согласно представленной на рис. 3.1 структурной схемы формируется наблюдатель Люенбергера.

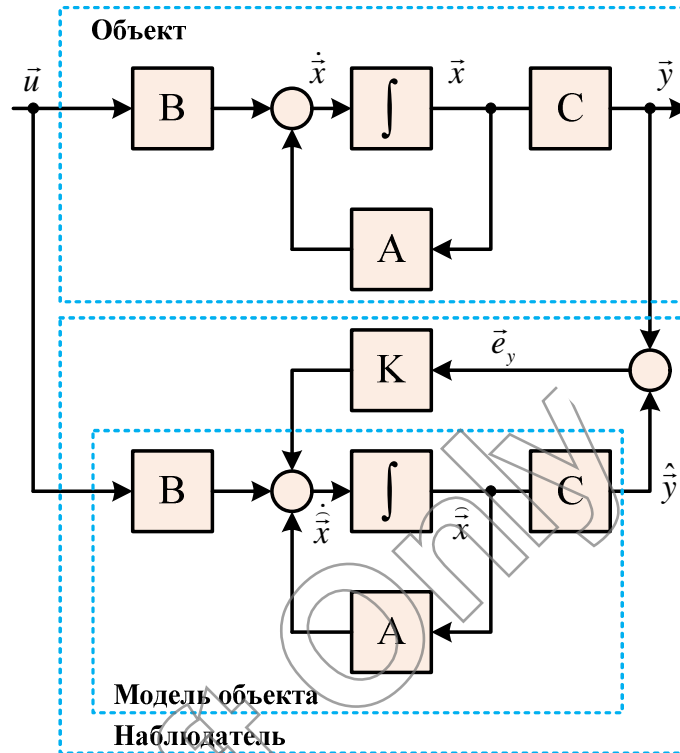


Рис. 3.1. Наблюдатель Люенбергера полного порядка

Достаточно много научных публикаций [78-80], где на основе математического аппарата Люенбергера синтезируются наблюдатели для систем первого и второго порядка. Поэтому с известными допущениями [81,82] в качестве исследуемого объекта можно взять двигатель постоянного тока с независимым возбуждением ДПТ НВ, который описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_1(t) = R_{\text{я}} i(t) + L_{\text{я}} \frac{di(t)}{dt} + c_{\text{дв}} \omega(t) \\ c_{\text{дв}} i(t) = J_{\text{дв}} \frac{d\omega(t)}{dt} \end{cases}, \quad (3.7)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря; $J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя; $c_{\text{дв}}$ – электромагнитная постоянная двигателя.

Система дифференциальных уравнений (СДУ) в нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L_{\text{ДВ}}} [U1(t) - R_{\text{ДВ}}i(t) - c_{\text{ДВ}}\omega(t)] \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{c_{\text{ДВ}}i(t)}{J_{\text{ДВ}}} \end{cases} . \quad (3.8)$$

СДУ в матричном виде:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{\text{ДВ}}}{L_{\text{ДВ}}} & \frac{-c_{\text{ДВ}}}{L_{\text{ДВ}}} \\ \frac{c_{\text{ДВ}}}{J_{\text{ДВ}}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U}{L_{\text{ДВ}}} \\ 0 \end{bmatrix} 1(t) . \quad (3.9)$$

Здесь $A = \begin{pmatrix} \frac{-R_{\text{ДВ}}}{L_{\text{ДВ}}} & \frac{-c_{\text{ДВ}}}{L_{\text{ДВ}}} \\ \frac{c_{\text{ДВ}}}{J_{\text{ДВ}}} & 0 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} \frac{U}{L_{\text{ДВ}}} \\ 0 \end{pmatrix}$, $x(t) = \begin{pmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{pmatrix}$

Известен принцип расчета коэффициентов наблюдателя [83].
Определяется характеристический полином объекта на основе матрицы А:

$$\varphi_A = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) = \lambda^2 + \alpha_{01}\lambda + \alpha_{02} . \quad (3.10)$$

Задаются собственные числа наблюдателя для обеспечения устойчивости:

$$\lambda_1^N = \lambda_2^N . \quad (3.11)$$

В итоге получаем характеристический полином:

$$\varphi_L(\lambda) = (\lambda - \lambda_1^N)(\lambda - \lambda_2^N) = \lambda^2 + \beta_1\lambda + \beta_2 . \quad (3.12)$$

Матрица коэффициентов будет определяться в идентификационном каноническом представлении ИКП:

$$K = \begin{bmatrix} \beta_2 - \alpha_{02} \\ \beta_1 - \alpha_{01} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Матрица перехода от исходного базиса к базису ИКП:

$$I_H = N_H^{-1}N_I \quad (3.13)$$

N_H^{-1} – обратная матрица наблюдаемости

N_I – матрица наблюдаемости в базисе ИКП:

Матрица коэффициентов в исходном базисе будет определяться тогда:

$$K_H = I_H^{-1} K_I \quad (3.14)$$

Для проверки работоспособности наблюдателя Люенбергера был взят ДПТ НВ с параметрами, представленными в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Параметры ДПТ НВ 2ПБ112ЛГУХЛ4

$P_H, \text{Вт}$	$U_H, \text{В}$	$n_H, \text{об/мин}$	$\eta, \text{о.е.}$	$L_{\text{я}}, \text{Гн}$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$J_{\text{дв}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$M_H, \text{Ом}$
2000	220	3150	0,81	0,0071	1,022	0,018	7,095

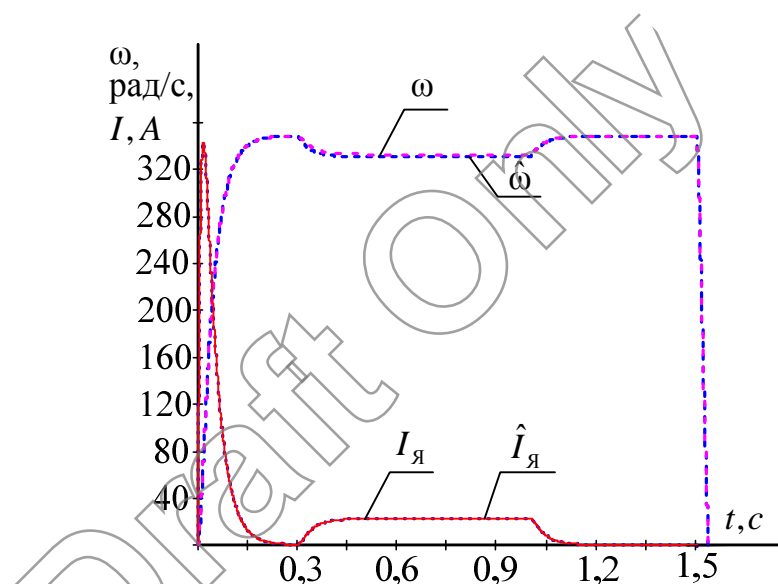


Рис. 3.2. Переходные процессы скорости и тока

$I_{\text{я}}, \hat{I}_{\text{я}}$ – ток якоря и его оценка; $\omega, \hat{\omega}$ – угловая скорость АД и ее оценка

На рис. 3.2 представлены переходные процессы по скорости, току для наблюдателя угловой скорости ДПТ НВ и непосредственно двигателя. Из рис. 3.2 видно, что кривые практически полностью идентичны и ошибка оценки скорости не превышает 1%. Разработанный наблюдатель угловой скорости на основе математического аппарата Люенбергера отрабатывает задание и возмущающие воздействия. Простота разработки и расчета коэффициентов наблюдателя Люенбергера для ДПТ НВ объясняется тем, что порядок системы

небольшой и ДПТ НВ неплохо описывается линеаризованной моделью. В отличие от ДПТ НВ АД является нелинейной электромеханической системой, математическое описание которой плохо поддается линеаризации. В электроприводе ТРН-АД дополнительно присутствуют проблемы с несинусоидальности напряжений статора вследствие импульсно-фазового управления. Поэтому для электропривода ТРН-АД необходимо разработать структуру наблюдателя угловой скорости, которая бы учитывала его особенности и в тоже время была простой для реализации.

В основе большинства наблюдателей лежит математическая модель объекта. Для адекватного использования математической модели объекта необходимо иметь параметры схемы замещения АД. Эти параметры часто отличаются от каталожных или не всегда доступны, поэтому возникает необходимость в разработке метода идентификации параметров схемы замещения АД на основе экспериментальных данных, полученных с статорных датчиков тока и напряжения.

3.2. Разработка метода идентификации параметров АД для построения модифицированного наблюдателя

Среди поисковых алгоритмов для решения сложных и нетривиальных задач хорошо себя зарекомендовали генетические алгоритмы (ГА). В отличие от других поисковых алгоритмов они оперируют не строгими правилами, а вероятностными.

(ГА) как глобальный метод оптимизации нашли широкое применение во многих сферах, например, их активно применяют для настройки нейронных сетей или для поиска глобального минимума функции [84,85].

ГА или по-другому как их называют, эволюционные алгоритмы, представляют собой адаптивные методы поиска, которые позволяют решать различные задачи. Данные алгоритмы получили такое название из-за того, что они используют принцип эволюции биологических организмов Ч. Дарвина, по

которому популяции развиваются в течении многих поколений, подчиняясь принципу естественного отбора [83].

ГА по аналогии с эволюционным механизмом оперируют совокупностью особей, где каждая из хромосом представляет возможное решение задачи. Этим ГА отличаются от аналогичных алгоритмов оптимизации, которые используют одно решение и циклично его улучшают [84].

В основе ГА лежит функция приспособленности, с помощью которой выделяют наиболее приспособленные особи для популяции:

- приспособленные особи получают возможность скрещиваться и давать потомство;
- наихудшие особи удаляются из популяции и не дают потомства.

После проведения несколько циклов отбора в итоге образуются особи наиболее приспособленные и с наследственными характеристиками родителей. Менее приспособленные особи постепенно отсеиваются из популяции как в процессе эволюции, где слабое звено в цепи погибает. Новое поколение обладает лучшими характеристиками по сравнению с предыдущими, так как оно отбирается по определенным критериям. Скрещивание и мутация приводят к тому, что в процессе эволюции отыскиваются перспективные решения в большом пространстве поиска. В итоге, популяция сходится к целевой функции, но это не гарантировано, так как в процессе эволюции одна из особей, которая характеризует истинное решение, может отсеяться на начальном этапе [86,87].

В последние годы появилось достаточно много разнообразных видов ГА. Это можно объяснить прежде всего наличием различных научных школ, каждая из которых развивает собственное направление, опираясь на фундаментальные принципы. Поэтому довольно часто под термином ГА понимается не какая-то одна единственная модель, а целый спектр. Основные отличия разрабатываемых аналогичных алгоритмов на основе ГА заключаются

в разном представлении операторов кроссовера, мутации, и других специальных операторов [85].

Модель эволюционного развития, которая реализована в ГА, имеет достаточно упрощенный вид и можно сказать, что далека от природных аналогов, но в то же время является достаточно мощным методом для решения разных задач. Например ГА могут применяться для решения задач, где невозможно иными методами добиться желаемого результата. Стоит отметить, что ГА не гарантируют нахождение глобального решения функции за отведенное время [88].

Одним из главных преимуществ ГА является возможность применения как для очень сложных задач, которые требуют высокую точность, так и для простых. Данные алгоритмы неплохо конкурируют с другими, уже устоявшимися алгоритмами, несмотря на высокую потребность в вычислительной мощности процессора.

Одним из вариантов решения задачи, где необходимо произвести идентификацию параметров нелинейного объекта с помощью ГА, представлен на рис.3.3.

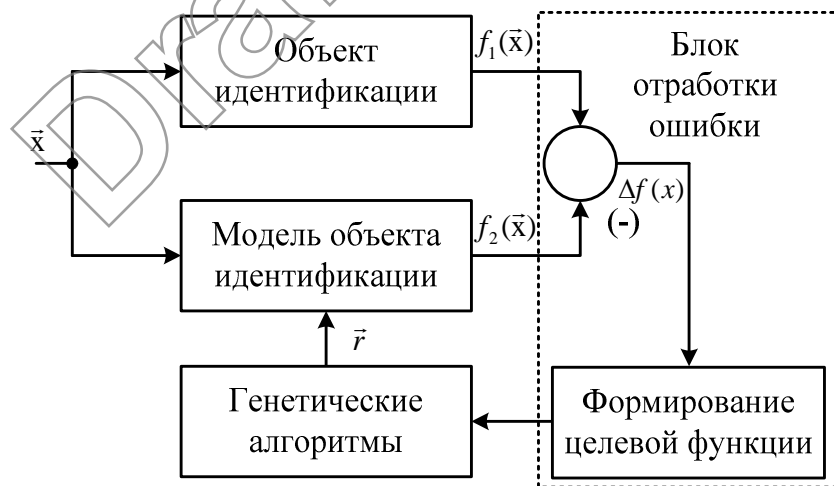


Рис.3.3. Структурная схема алгоритма идентификации параметров нелинейного объекта с помощью ГА

\vec{x} – вектор входного воздействия; $f_1(\vec{x})$ – функция объекта идентификации; $f_2(\vec{x})$ – функция модели объекта идентификации; $\Delta f(\vec{x})$ – функция ошибки; \vec{r} – вектор параметров идентификации

В основе данной схемы лежит математическая модель объекта, блок отработки ошибки и непосредственно ГА.

Если представить, что объект идентификации описывается функцией $f_1(\vec{x})$, а модель его $f_2(\vec{x})$, то вся задача сводится к нахождению минимума выражения $|f_1(\vec{x}) - f_2(\vec{x})| \rightarrow 0$ при одних и тех же входных значениях \vec{x} . Как только модуль функций $|\Delta f(\vec{x})| \rightarrow 0$ будет стремиться к нулю, то, следовательно, вектор параметров \vec{r} будет найден [89].

Принцип работы ГА рассмотрим на примере поиска глобального минимума для функции:

$$f(x) = 10 - 23x + 17x^2 - \frac{11x}{3} + \frac{x}{4} \quad (3.15)$$

График данной функции представлен на рис. 3.4, из которого видно, что функция $f(x)$ имеет два глобальных минимума: min1 и min2, при использовании стандартных методов оптимизации есть вероятность попасть в локальный минимум, т.е. в точку min2 и тем самым получить не тот результат, который необходим. Следует отметить, что координаты минимумов существенно отличаются и при преждевременной сходимости метода оптимизации к локальному минимуму min2 это приведет к «псевдорешению».

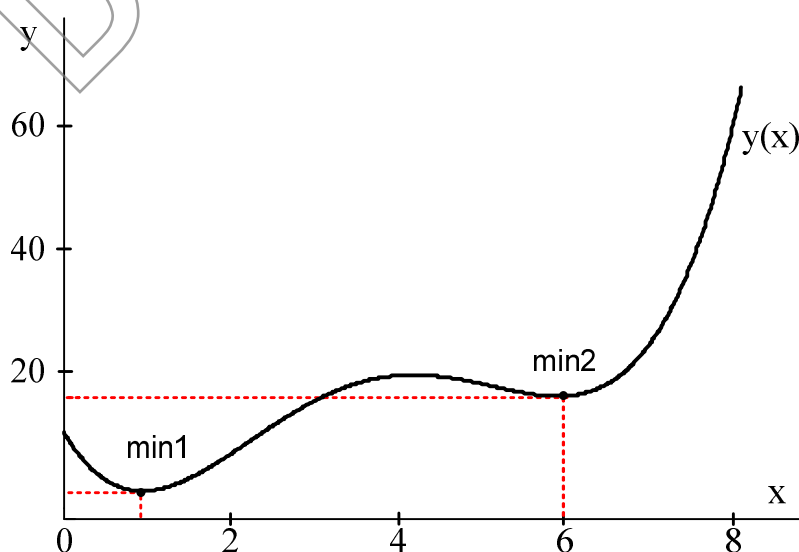


Рис. 3.4

Данное решение имеет высокую погрешность по сравнению с «истинным» решением \min_1 , которое соответствует глобальному минимуму и является лучшим из всех возможных решений.

Генетические алгоритмы позволяют находить глобальное решение, минуя локальные минимумы [90]. На основе представленного ниже алгоритма и структурной схемы на рис.3.5 была создана модель ГА в Matlab Simulink для поиска локального минимума функции $f(x)$.

Проиллюстрируем полный цикл работы алгоритма [91]:

1. Вначале формируются начальные особи – это массивы данных, которые будут использоваться в первых циклах работы алгоритма. Допустим, в качестве начальной особи у нас было число 7.

2. Далее кодируем данное число в двоичный код:

0	0	0	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

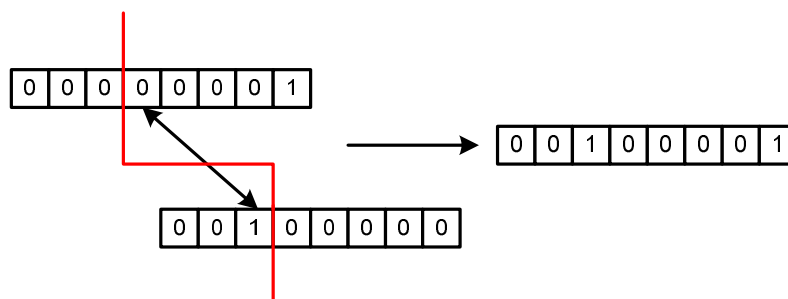
3. Затем преобразуем в код Грея:

0	0	0	0	0	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

4. Следующий шаг алгоритма это мутация. В результате данной операции один из битов слова случайным образом инвертируется.

0	1	0	0	0	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

5. Затем производится кроссовер. В результате данной операции часть одного слова меняется на другую. Второе слово для кроссовера в первом цикле берется из начальной популяции (1.1).



Предварительно оно также вначале преобразуется в двоичный код (1.2), а затем в код Грея (1.3).

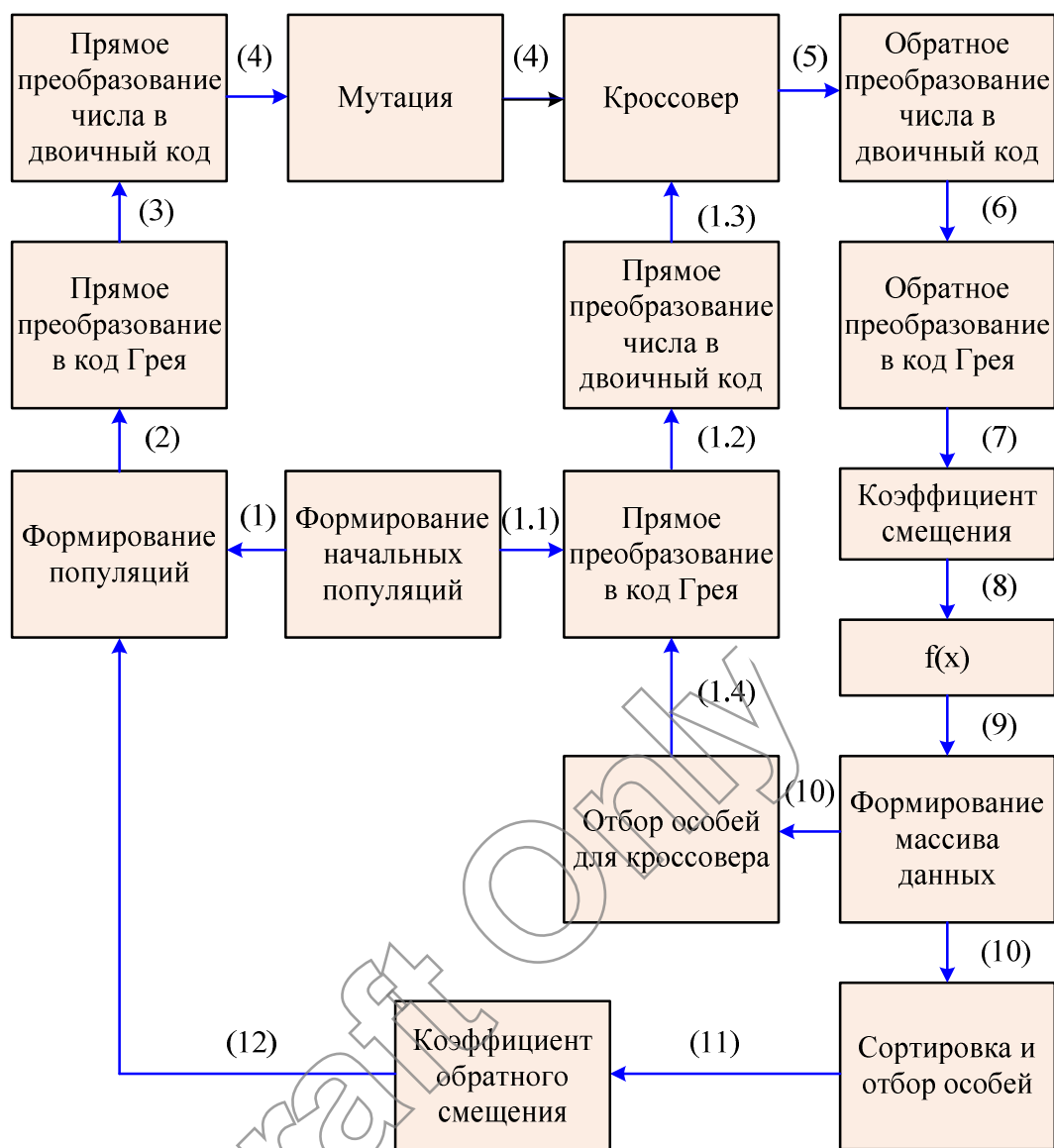


Рис. 3.5. Структурная схема ГА

6. К полученному в итоге слову применяют обратное преобразование Грея и преобразуют в двоичный код:

0	0	1	1	1	1	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

7. Затем двоичный код переводят в десятичный вид и получают число 60.
8. Данное число умножается на коэффициент смещения $K_{\text{см}}$. Это необходимо для работы с числами с плавающей точкой.
9. Далее вычисляется значение функции $f(x)$.
10. На основе полученных значений $f(x)$ формируются массивы данных для кроссовера и новой популяции ГА (11).

11. Из полученных массивов данных осуществляется отбор наиболее приспособленных особей для дальнейшего цикла работы ГА и кроссовера.

12. Отобранные популяции умножаются на $K_{\text{ОБ_СМ}}$ обратного смещения и цикл снова повторяется (12).

С помощью структурной схемы, представленной на рис. 3.5 и функции (1), была сформирована табл. 3.2, из которой видно, что с увеличением коэффициента смещения повышается точность определения глобального минимума функции $f(x)$, но в то же время растет расчетное время.

Таблица 3.2

Разрядность системы	Коэффициент смещения	Количество циклов	$\min f(x)$	x
8	1	4056	0,583	1
8	10	7506	0,561	0,9
8	100	10031	0,5509	0,94
16	1	12035	0,583	1
16	10	13015	0,561	0.9
16	100	15004	0,5509	0,94
16	1000	20504	0,5508	0,936
16	10000	22300	0,5501	0,9356

От выбора разрядности системы зависит точность определения глобального минимума функции. Чем выше разрядность системы, тем больше знаков после запятой мы можем определить. Так, например, для 8 битной системы составляет два знака после запятой, а для 16 битной четыре. С увеличением разрядности системы продолжительность поиска экстремума функции $f(x)$ становится значительно выше.

В ходе исследования было установлено, что разработанная модель ГА в Matlab Simulink плохо оптимизирована и требует значительные вычислительные мощности для многомерных нелинейных объектов, таких как АД. Поэтому для идентификации параметров АД была использована встроенная в Matlab библиотека ГА, которая позволяет значительно сократить

временные затраты [92-94]. Она лучше оптимизирована и имеет ряд дополнительных возможностей для нахождения экстремумов функции.

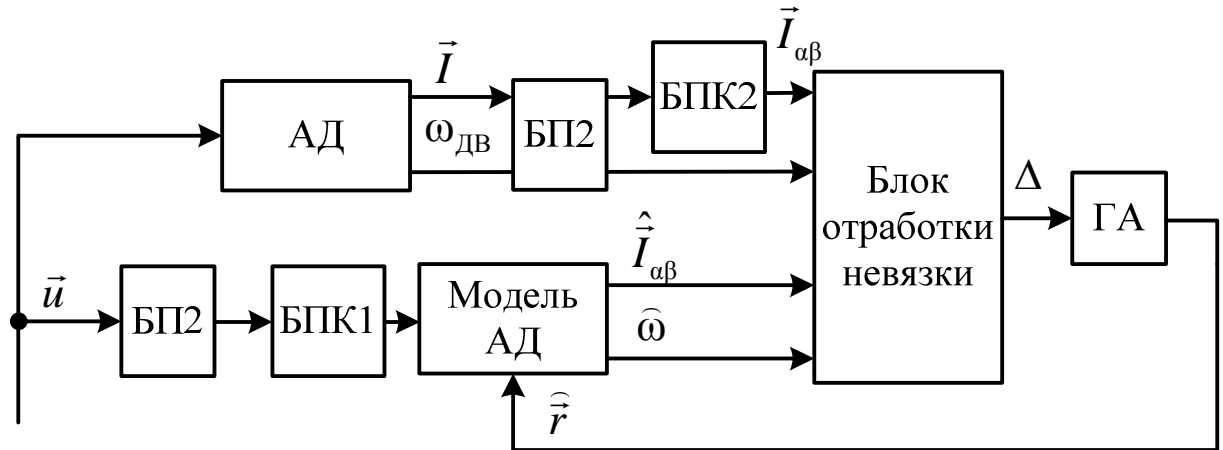


Рис. 3.6. Структурная схема идентификации параметров АД с помощью ГА

БПК1, БПК2 – блоки преобразования координат; БП1, БП2 – блоки памяти

$\vec{u} = [U_A \ U_B \ U_C]^T$ – вектор входных сигналов статорных напряжений, U_A , U_B , U_C ;

$\vec{u}_{\alpha\beta} = [U_\alpha \ U_\beta]^T$ – вектор входных сигналов напряжений в двухфазной неподвижной системе координат, α, β ;

$\vec{I} = [I_A \ I_B \ I_C]^T$ – вектор статорных токов;

$\vec{I}_{\alpha\beta} = [I_\alpha \ I_\beta]^T$ – вектор статорных токов в двухфазной неподвижной системе координат α, β ;

$\hat{\vec{I}}_{\alpha\beta} = [\hat{I}_\alpha \ \hat{I}_\beta]^T$ – вектор оценок статорных токов в двухфазной неподвижной системе координат α, β ;

$\hat{\vec{r}} = [\hat{R}_s \ \hat{L}_s \ \hat{R}_r \ \hat{L}_r \ \hat{L}_m \ j \ M_{c1} \ M_{c2}]$ – вектор оценок параметров АД;

M_{c1} – момент нагрузки холостого хода;

M_{c2} – момент нагрузки;

Δ – невязка, характеризующая точность оценки параметров;

$\omega_{дв}$ – угловая скорость АД;

$\hat{\omega}$ – оценка скорости АД.

С помощью датчиков тока статора и угловой скорости снимаются массивы данных \vec{I} , $\omega_{\text{дв}}$ для соответствующих входных воздействий \vec{u} , которые затем записываются в блоки памяти (БП1), (БП2).

Полученные входные воздействия напряжений преобразуются в двухфазную систему координат с помощью блока преобразования координат (БПК1) $\vec{u}_{\alpha\beta}$ и подаются в блок имитационной модели АД, где на выходе формируется вектор оценки токов $\hat{\vec{I}}_{\alpha\beta}$. В блоке отработки невязки сравниваются расчетные значения оценок тока $\hat{\vec{I}}_{\alpha\beta}$ и значения, полученные непосредственно с двигателя $\vec{I}_{\alpha\beta}$. В итоге вычисляется ошибка ΔI на основании которой ΔI , в блоке ГА формируется вектор оценки параметров двигателя $\hat{\vec{r}}$. Как только невязка достигает определенного критерия, цикл останавливается, и формируются окончательные значения параметров схемы замещения АД $\hat{\vec{r}}$ [95,96].

В зависимости от того как вычисляется текущее значение невязки Δ зависит скорость сходимости ГА, а следовательно, и время идентификации параметров АД. В таблице 3.3 приведены различные варианты отработки невязок по токам и скорости.

Таблица 3.3

№ Варианта	Структуры для отработки различных вариантов невязки	Время идентификация параметров АД
1		$t \rightarrow \infty$

2		$t \rightarrow \infty$
3		$t = 4450c$
4		$t = 2880c$

Первый вариант оказался неудачным для идентификации параметров асинхронного двигателя в виду того, что используются абсолютные значения невязок и происходит перекося при отработке невязок по токам и скорости в сторону большей невязки.

Второй вариант с использованием абсолютных невязок является также неудачным, так как система забывает начальные значения и пытается подстроиться под последние выборки невязок.

Как показали исследования первый и второй вариант могут найти применение для несложных линейных объектов первого, второго порядка.

Вариант 3 является модификацией варианта 2, здесь уже используется интегральный принцип отработки невязки. Основным преимуществом данного способа перед его предшественником является то, что информация о невязке не забывается и учитывается на каждом шаге итерации.

В основе варианта 4 лежат две структурные схемы из варианта 3. Отличительной особенностью данной отработки невязок является то, что часть входных сигналов пропускается вначале через временные задержки, а другая нет. Временные задержки позволяют повысить точность идентификации в динамике, так как алгоритм теперь сходится не по одному критерию, а сразу по двум. Наличие двух способов отработки невязки по току позволяет свести возможность к минимуму попадания решения оптимизационной задачи в «псевдорешения». Временные задержки выбираются экспертом исходя из конкретного случая. Они не должны быть слишком маленькими, так как в этом случае ГА не будут их чувствовать.

Для идентификации параметров АД использовалась стандартная функция `gaoptimset`, встроенная в Matlab. Файлы, используемые для идентификации параметров АД, представлены в приложении `par.m` (начальные параметры), `f1.m` (начальные параметры модели), `fga.m` (алгоритм идентификации). Список основных аргументов функции `gaoptimset` представлен ниже в табл. 3.4 [97-99].

Таблица 3.4. Список основных аргументов функции gaoptimset

Аргумент	Описание	Значение
CreationFcn	Используется для создания начальной популяции	{ @gacreationuniform }
CrossoverFraction	Вероятность кроссинговера, не включает элитных потомков, полученных при кроссинговере	Положительные числа
CrossoverFcn	Вид кроссинговера	Тип функции { @crossoverheuristic } { @crossoverscattered } { @crossoverintermedia } { @crossoversinglepoint }
FitnessLimit	Число при достижении которого функция пригодности останавливает алгоритм ГА	Число
HybridFcn	Устанавливает дальнейшую оптимизацию по завершению алгоритма	Установочная функция
MigrationFraction	Число между 0 или 1, соответствующее доли мигрирующих особей для каждой популяции.	Число
MigrationInterval	Положительное целое число соответствующее количеству поколений между миграциями	Положительное число

Продолжение таблицы 3.4

PopulationSize	Размер популяции	Положительное целое число
TimeLimit	Положительное целое число по достижении, которого, алгоритм останавливается.	Положительное число

Формирование начальных данных для генетических алгоритмов осуществлялось по следующему алгоритму пуск, выход на заданную скорость наброс нагрузки и сброс, торможение.

На основе переходных процессов тока (рис. 3.8) и скорости (рис 3.9) можно сделать вывод, что кривые практически полностью совпадают, что говорит о приемлемых результатах.

В табл. 3.5 приведены параметры идентификации и относительные ошибки. Максимальная ошибка при идентификации параметров асинхронной машины с помощью генетических алгоритмов не превышает 7%.



Рис. 3.7. Переходные процессы по скорости

$\omega_{ДВ}$ – угловая скорость АД, $\hat{\omega}$ – оценка угловой скорости

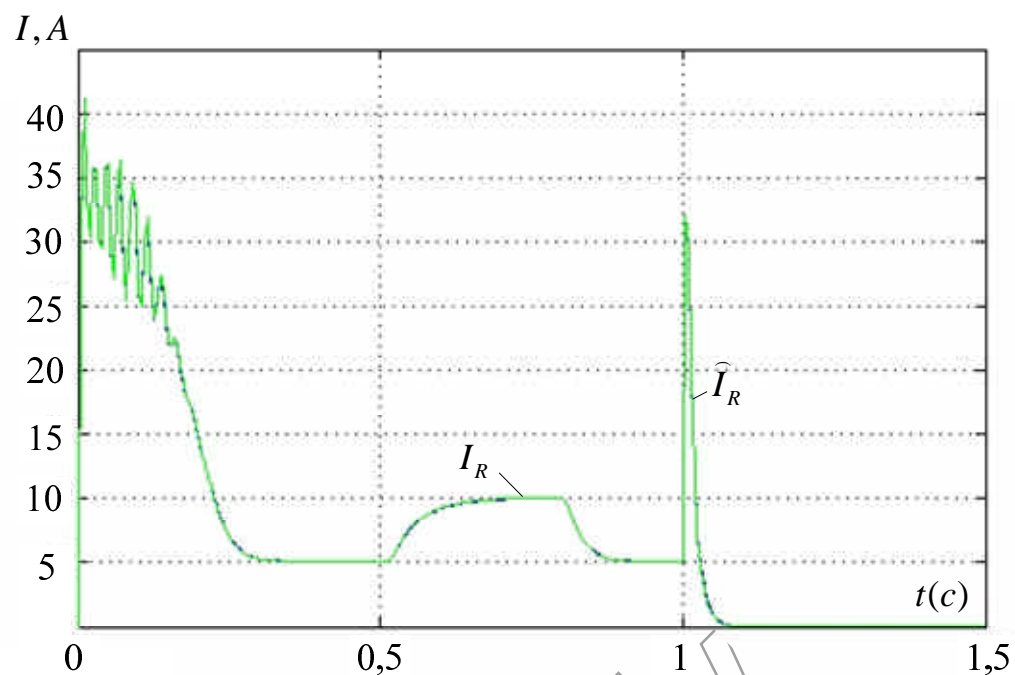


Рис. 3.8. Переходные процессы результирующего модуля тока

I_R – результирующий модуль тока АД;

\hat{I}_R – оценка результирующего модуля тока

Таблица 3.5 Параметры АД

	Параметры двигателя	Параметры идентификации	Относительная погрешность
R_s	1,27	1,285	1,18%
L_s	0,009568	0,0091	4,8%
R_r	1,9126	1,865	4,2%
L_r	0,00358	0,00335	6,4%
L_m	0,099469	0,0981	1,37%
J	0,07	0,0749	7%
M_{c1}	21,67	22,58	4,19%
M_{c2}	0,53	0,5	5,6%

Минимальная ошибка наблюдается для активного сопротивления статора, а максимальная для момента инерции. Средняя ошибка оценки параметров составляет 4,34%.

3.3. Разработка структуры наблюдателя скорости в системе ТРН-АД на основе модификации наблюдателя Люенбергера

Для повышения качества динамики электроприводов по схеме ТРН-АД в переходных режимах и отработки возмущающих воздействий при набросе нагрузки необходимо вводить обратную связь по скорости. Наиболее оптимальным вариантом решения данной проблемы для электропривода ТРН-АД является наблюдатель скорости.

В основе большинства разработанных наблюдателей, оценивающих скорость АД, лежит математическая модель электродвигателя. Она может быть представлена в виде трехфазной, двухфазной или ориентированной в пространстве определенным образом системы координат.

Для работы с математической моделью АД необходимо знать параметры схемы замещения, которые могут отличаться от реально существующих. Параметры схемы замещения АД определяются таким образом, чтобы переходные процессы по оценке скорости и тока были практически идентичны данным, полученным с помощью датчиков.

В случае ТРН-АД использование стандартного наблюдателя Люенбергера как для ДПТ НВ затруднено тем, что система имеет более высокий порядок.

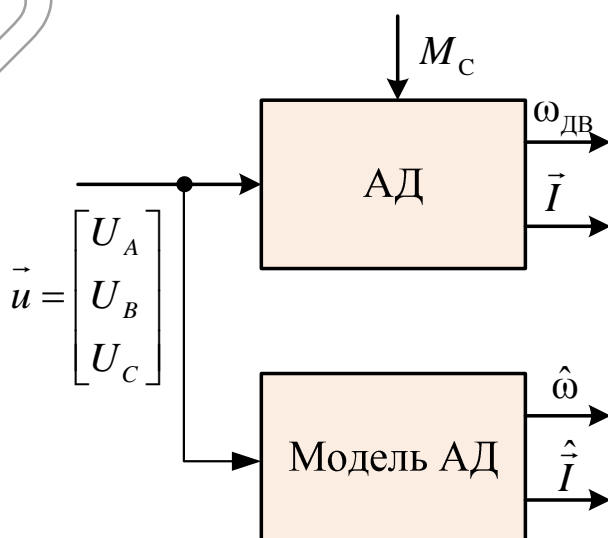
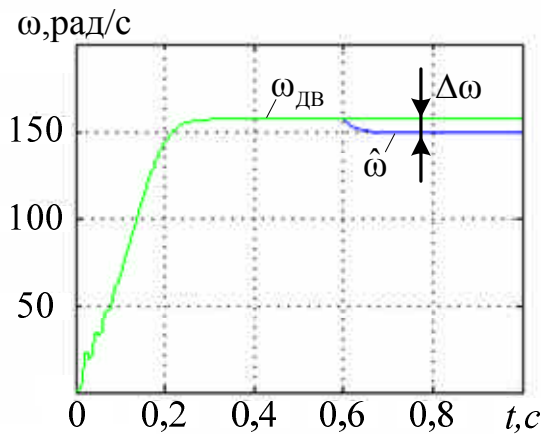


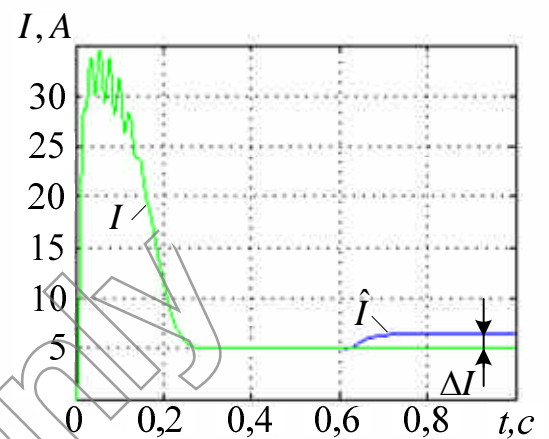
Рис. 3.9. Структурная схема наблюдателя скорости АД

Кроме того присутствуют перекрестные нелинейные связи, которые вызывают затруднения при синтезе наблюдателя скорости.

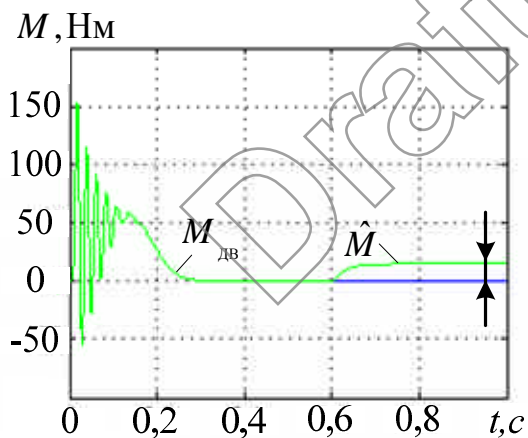
Асинхронный двигатель можно представить как черный ящик, где входными значениями являются вектор напряжения, выходными ток и скорость, а возмущающим фактором нагрузка M_c рис. 3.9.



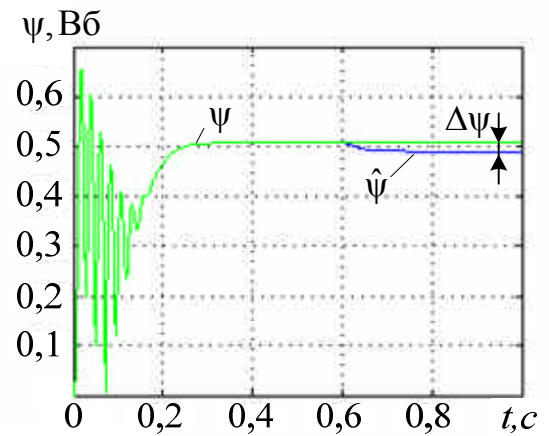
а) Переходные процессы скорости



б) Переходные процессы тока



в) Переходные процессы момента



г) Переходные процессы
потокосцепления

Рис. 3.10. Переходные процессы

$\omega_{дв}, \hat{\omega}$ – скорость АД и его оценка; $M_{дв}, \hat{M}$ – момент АД и его оценка;

$\psi, \hat{\psi}$ – потокосцепление АД и его оценка.

На рис. 3.9 представлен наблюдатель скорости, который состоит только из математической модели АД. К основному недостатку данной системы можно отнести отсутствие корректирующих сигналов, компенсирующих возмущающие воздействия. Данный наблюдатель не отрабатывает изменение нагрузки на валу двигателя (рис. 3.10).

Для адекватной работы наблюдателя необходимо вести оценку нагрузочного момента \hat{M}_C . Известно, что как в статике, так и в динамике статорные токи имеют нелинейную зависимость от текущего момента двигателя $M_{дв}$. Если принять $M_C \approx M_{дв}$, то приближенное определение момента нагрузки АД и его можно представить как:

$$\begin{aligned}\hat{M}_C &\approx K_{r1} \hat{I}_R, \\ M_C &\approx K_{r2} I_R,\end{aligned}\tag{3.16}$$

где, $I_R = \frac{2}{3} \sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2}$, $\hat{I}_R = \frac{2}{3} \sqrt{\hat{I}_\alpha^2 + \hat{I}_\beta^2}$ – результирующий модуль тока статора и его оценка;

K_{r1} – нелинейный коэффициент, характеризующий связь между моментом нагрузки и током электродвигателя

K_{r2} – нелинейный коэффициент, характеризующий связь между оценкой момента нагрузки и оценкой тока электродвигателя

Коэффициент K_{r1} имеет нелинейный характер, так как зависит от величины приложенного напряжения к статорным обмоткам, а также от текущей нагрузки на валу двигателя (рис.3.11). В табл. 3.6 приведены значения K_{r1} при углах управления $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 65^\circ$.

Таблица 3.6. Значения коэффициентов K_{r1} , Нм/А при различной нагрузке M_C

M_C , Нм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\alpha = 0^\circ$	0,34	0,67	0,98	1,28	1,55	1,796	2,01	2,2	2,4	2,5	2,6
$\alpha = 65^\circ$	0,43	0,83	1,15	1,44	1,67	1,8	1,9	2,1	2,1	2,2	2,21

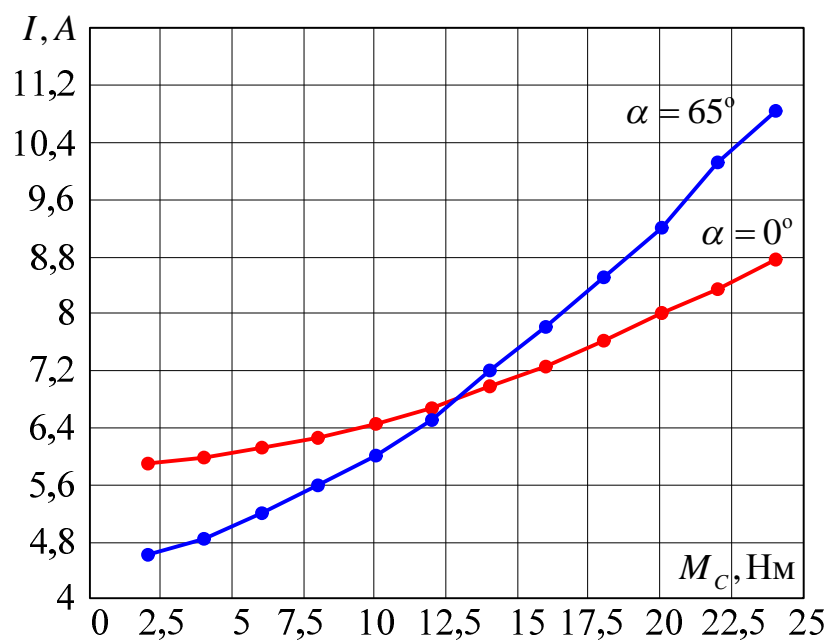


Рис. 3.11. Зависимости тока двигателя I_R от нагрузки M_c

На рис. 3.12 представлена зависимость просадки по скорости при постоянном угле управления и изменении момента нагрузки на валу двигателя, которая определялась с помощью следующего выражения:

$$\omega_{\text{пр}} = |\omega_{\text{хх}} - \omega_{\text{мс}}|, \quad (3.17)$$

где $\omega_{\text{пр}}$ – просадка по скорости;

$\omega_{\text{хх}}$ – скорость холостого хода;

$\omega_{\text{мс}}$ – скорость под нагрузкой.

Функция $\omega_{\text{пр}} = f(M_c)$ имеет практически линейную зависимость, что подтверждает табл. 3.7, полученная с помощью выражения:

$$K_{\text{пр}} = M_c / \omega_{\text{пр}} \quad (3.17)$$

Таблица 3.7. Значения коэффициентов $K_{\text{пр}}$, $\frac{\text{Нм}}{\text{рад/с}}$ при различной нагрузке M_c

$M_c, \text{Нм}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\alpha = 0^\circ$	1,3	1,6	1,77	1,8	1,85	1,87	1,89	1,9	1,89	1,89	1,89
$\alpha = 65^\circ$	0,96	1	1,05	1,05	1,04	1,03	1,01	1,01	0,97	0,95	0,92

Среднее значение $K_{\text{пр}}$ для $\alpha = 0^\circ$ составляет 1,79, а для $\alpha = 60^\circ$ 0,91. Если принять во внимание, что мы имеем адекватные параметры схемы замещения для математической модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат, то данное равенство можно принять за тождественное $K_{r1} = K_{r2}$.

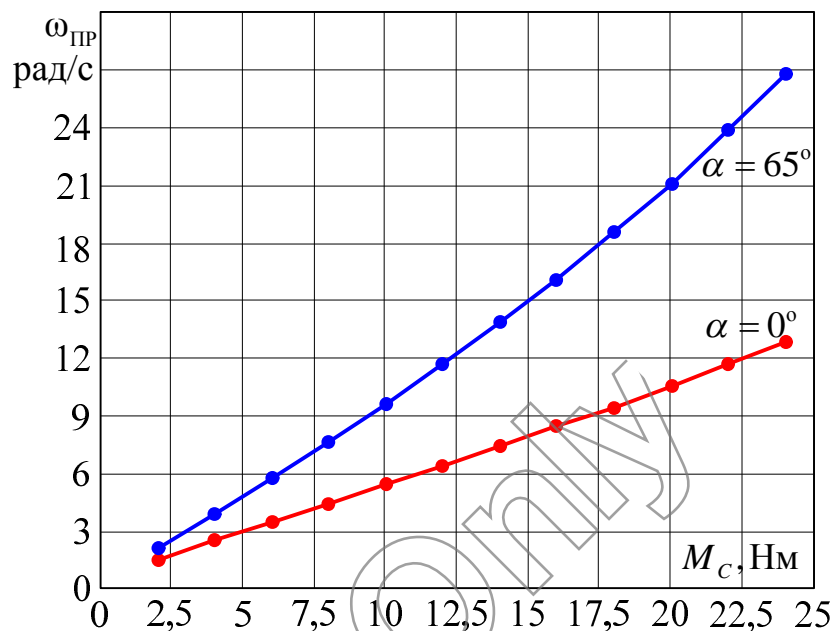


Рис. 3.12 Зависимость просадки по скорости $\omega_{\text{пр}}$ АД от нагрузки M_c

Если вычтем два выражения (3.16) и возьмем модуль, то получим:

$$|\hat{M}_c - M_c| = K_{r1} \Delta I, \quad (3.18)$$

где $\Delta I = |\hat{I}_R - I_R|$ — невязка токов.

Следовательно, если свести выражение $|\hat{I}_R - I_R| \rightarrow 0$ к нулю, то и левая часть $|\hat{M}_c - M_c| \rightarrow 0$ тоже будет стремиться к нулю. Для того, чтобы данное выражение стремилось к нулю необходимо найти соответствующее значение тока оценки, которое бы $\hat{I}_R = I_R$.

Адекватность равенства $K_{r1} = K_{r2}$ зависит в первую очередь от математического описания асинхронного двигателя и параметров схемы замещения.

Для нахождения оценки момента нагрузки \hat{M}_c можно воспользоваться разработанной структурой наблюдателя угловой скорости, имеющего схожие

черты с математическим аппаратом Люенбергера, где невязка ΔI обрабатывается пропорциональным регулятором рис. 3.13 [100].

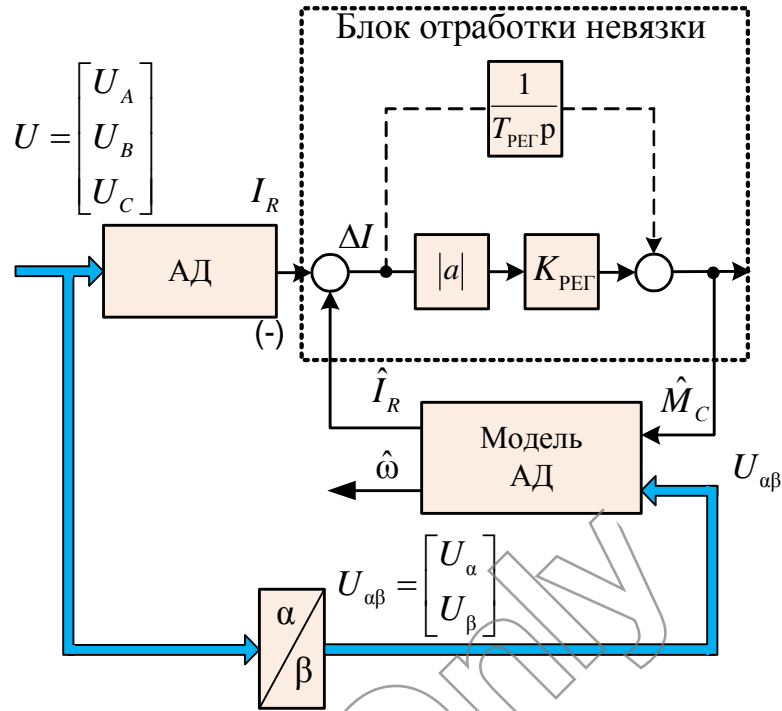


Рис. 3.13 Структура наблюдателя АД

Тогда момент оценки нагрузки будет определяться как:

$$\hat{M}_C = K_{\text{PEG}} |\hat{I}_R - I_R|, \quad (3.19)$$

K_{PEG} – коэффициент пропорционального регулятора

Наблюдатель скорости описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{I}_{S\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_E} \left[U_\alpha(t) - R_E \hat{I}_\alpha(t) + K_r A_r \hat{\psi}_\alpha(t) + K_r z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_\beta(t) \right] \\ \frac{d\hat{I}_{S\beta}}{dt} = \frac{1}{L_E} \left[U_\beta(t) - R_E \hat{I}_\beta(t) + K_r A_r \hat{\psi}_\beta(t) + K_r z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_\alpha(t) \right] \\ \frac{d\hat{\psi}_\alpha}{dt} = R_r K_r \hat{I}_{S\alpha}(t) - A_r \hat{\psi}_{r\alpha}(t) - z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_\beta(t) \\ \frac{d\hat{\psi}_\beta}{dt} = R_r K_r \hat{I}_{S\beta}(t) - A_r \hat{\psi}_{r\beta}(t) - z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_\alpha(t) \\ \hat{M}(t) = K_m [\hat{\psi}_\alpha(t) \hat{I}_\beta(t) - \hat{\psi}_\beta(t) \hat{I}_\alpha(t)] \\ \hat{M}_C(t) = k_{\text{PEG}} |\hat{I}_R - I_R|, \end{cases} \quad (3.20)$$

где $K_r = L_m / L_r$, $A_r = R_r / L_r$, $K_m = 1,5 K_r z_p$, $L_E = L_S + L_m^2 / L_r$, $R_E = R_S + R_r K_r^2$ –

вспомогательные коэффициенты;

U_α, U_β – статорные напряжения АД в двухфазной системе координат;

$\hat{I}_\alpha, \hat{I}_S$ – оценки токов в двухфазной системе координат;

$\hat{\Psi}_\alpha, \hat{\Psi}_\beta$ – оценки потокосцепления в двухфазной системе координат;

R_S, R_r – активные сопротивления статора и ротора;

L_S, L_r – индуктивность статора и ротора;

J – момент инерции.

Электромагнитные процессы, описываемые в наблюдателе, в матричном виде имеют следующее представление:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \\ \hat{\Psi}_\alpha \\ \hat{\Psi}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_E / L_E & 0 & K_r A_r / L_E & K_r z_p \hat{\omega} / L_E \\ 0 & -R_E / L_E & K_r z_p \hat{\omega} / L_E & K_r A_r \\ 0 & R_r K_r & A_r & z_p \hat{\omega} \\ R_r & 0 & z_p \hat{\omega} & A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha}(t) \\ \hat{i}_{s\beta}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{s\alpha}(t) / L_\Theta & 0 \\ 0 & U_{s\beta}(t) / L_\Theta \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} 1(t) \quad (3.21)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} -R_E / L_E & 0 & K_r A_r / L_E & K_r z_p \hat{\omega} / L_E \\ 0 & -R_E / L_E & K_r z_p \hat{\omega} / L_E & K_r A_r \\ 0 & R_r K_r & A_r & z_p \hat{\omega} \\ R_r & 0 & z_p \hat{\omega} & A_r \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} U_{s\alpha}(t) / L_\Theta & 0 \\ 0 & U_{s\beta}(t) / L_\Theta \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} i_{s\alpha}(t) \\ i_{s\beta}(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

выступать относительная ошибка по скорости и току проинтегрированная по времени.

$$\Delta I = \int_0^{t_1} \frac{|I_R - \hat{I}_R|}{I_R} dx, \quad \Delta \omega = \int_0^{t_1} \frac{|\omega_{3AD} - \omega_{ДВ}|}{\omega_{3AD}} dx, \quad \Delta M = \int_0^{t_1} \frac{|M_{ДВ} - \hat{M}|}{M_{ДВ}} dx \quad (3.24)$$

где I_R, \hat{I}_R – результирующий модуль тока статора двигателя и его оценка;

$M_{ДВ}, \hat{M}$ – момент двигателя и его оценка;

$\omega_{ДВ}, \omega_{3AD}$ – скорость АД, скорость задания

Таблица 3.6. Настроечный набор данных для наблюдателя скорости АД

Параметры набл.	Критерии адекватной работы наблюдателя		
$K_{РЕГ}$, Нм/А	ΔI , о.е	$\Delta \omega$, о.е	ΔM , о.е.
1	222,4	333,6	1438
5	94,6	87,89	1202
10	56,89	57,8	1768
20	32,06	39,7	1103
30	21,8	30,15	32,2
40	16,9	26,45	28,39
50	16,43	24,16	40,73
60	16,36	22,56	49,23
70	16,3	21,45	$6,7 \cdot 10^6$
80	16,15	20,68	$1,5 \cdot 10^7$
90	15,9	20	$3,1 \cdot 10^7$
100	15,6	19,46	$4 \cdot 10^7$
110	15,41	19,02	$4,7 \cdot 10^7$
120	15,39	18,68	$5,3 \cdot 10^7$
130	15,36	18,41	$5,8 \cdot 10^7$
140	15,43	18,81	$5,9 \cdot 10^7$

По полученным данным (табл. 3.6) был построен график, представленный на рис. 3.14

Для удобства анализа графиков значения интегральных ошибок по скорости, току, моменту были приведены в базисные значения:

$$\Delta I_B = \frac{\Delta I}{\Delta I_{\text{МАКС}}}, \quad \Delta \omega_B = \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_{\text{МАКС}}}, \quad \Delta M_B = \frac{\Delta M}{\Delta M_{2\text{МАКС}}}, \quad (3.25)$$

где $\Delta I_{\text{МАКС}}$, $\Delta \omega_{\text{МАКС}}$, $\Delta M_{\text{МАКС}}$ – максимальные значения тока, скорости и момента.

Из графика, представленного на рис. 3.15 видно, что при увеличении коэффициента $K_{\text{РЕГ}}$ интегральные ошибки по току и скорости сначала резко уменьшаются, но при входе в зону 2 изменения становятся незначительными.

При переходе значений $K_{\text{РЕГ}}$ в область 3 интегральная ошибка по моменту начинает резко расти. Основной причиной резкого ее увеличения является появление автоколебаний в контуре тока (рис.3.16 а) .

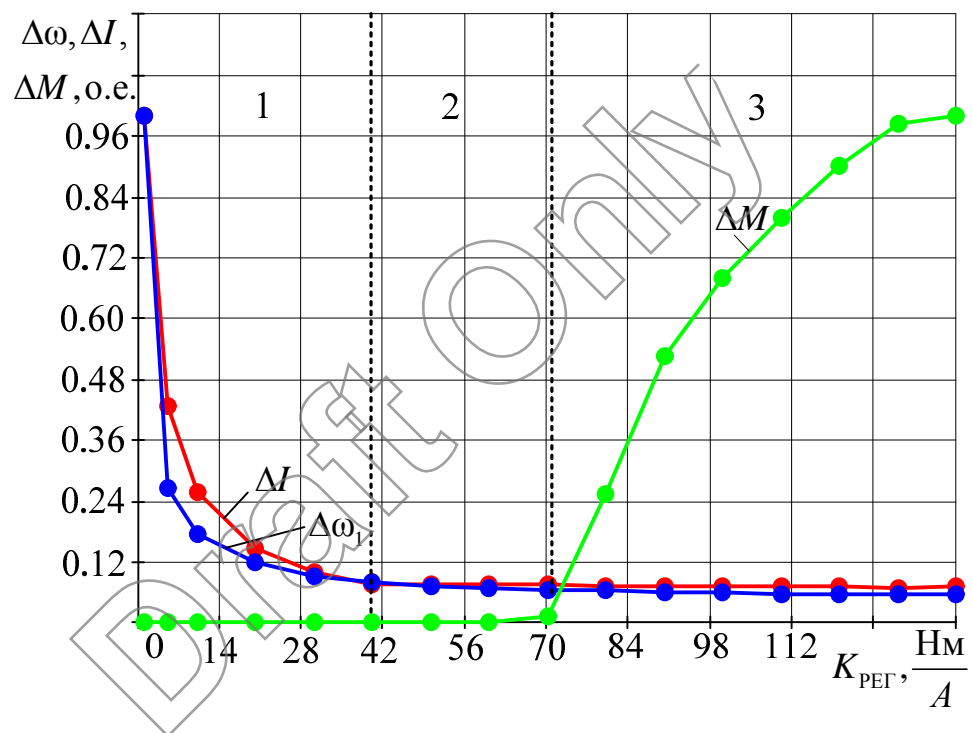


Рис. 3.15. Графики интегральных ошибок скорости, тока и момента в зависимости от коэффициента $K_{\text{РЕГ}}$

Экспериментально было установлено, что автоколебания в контуре тока полностью исчезают при значениях $K_{\text{РЕГ}}$ меньше 35 (рис. 3.16 б)). В качестве окончательного коэффициента $K_{\text{РЕГ}}$ было выбрано значение 30.

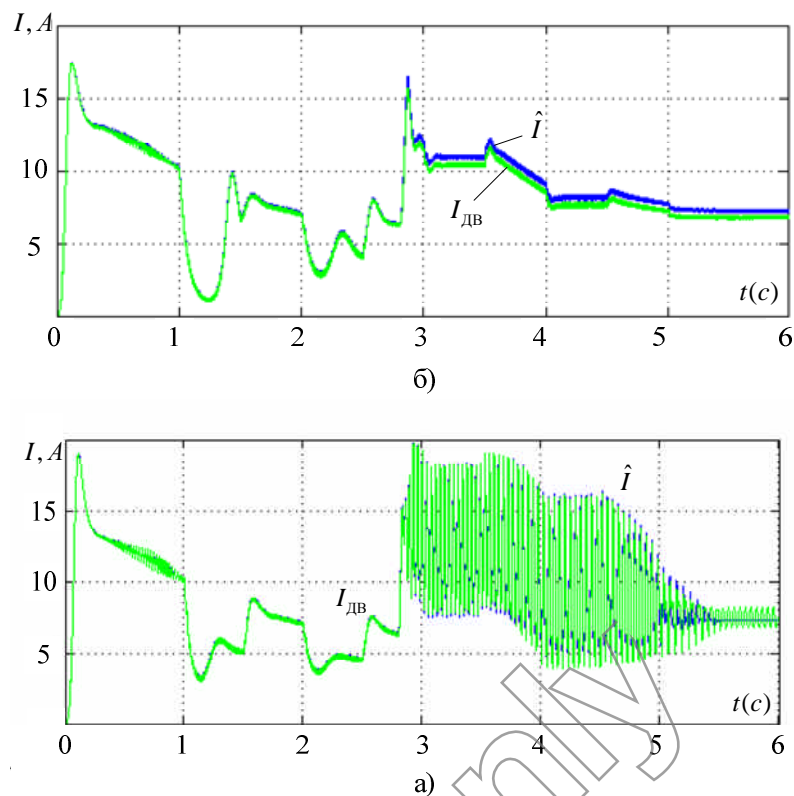


Рис. 3.16 График переходного процесса результирующего модуля тока

а) $K_{\text{REG}} = 140$; б) $K_{\text{REG}} = 30$

Отрабатывать невязку по току ΔI можно также с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) звена.

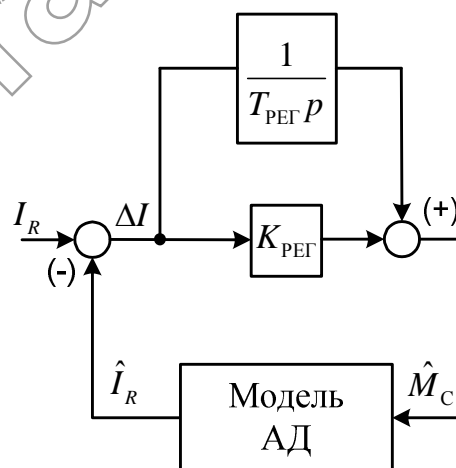


Рис. 3.17 Структура наблюдателя АД

Для ранее определенного значения K_{REG} была сформирована табл. 3.7 при различных значениях T_{REG} и построены графики интегральных ошибок рис. 3.17.

Таблица 3.7. Настроечный набор данных для наблюдателя скорости АД

Параметры наблюдателя		Критерии адекватной работы наблюдателя		
$K_{\text{рег}}$, Нм/А	$T_{\text{рег}}$, с	ΔI , о.е.	$\Delta \omega$, о.е.	ΔM , о.е.
30	0,0005	15,31	17,9	160
30	0,0008	0,31	17,77	0,91
30	0,001	0,29	17,93	0,89
30	0,0025	0,38	18,44	0,94
30	0,005	0,7224	19,06	1,2
30	0,01	1,473	20,27	1,817
30	0,015	2,3	21,19	2,6
30	0,02	3,2	21,9	3,6
30	0,025	4,1	22,49	4,6
30	0,03	4,96	22,99	5,8
30	0,035	5,8	23,43	6,9
30	0,04	6,6	23,81	8
30	0,045	7,3	24,14	9
30	0,05	7,9	24,5	10
30	0,055	8,5	24,72	10,9

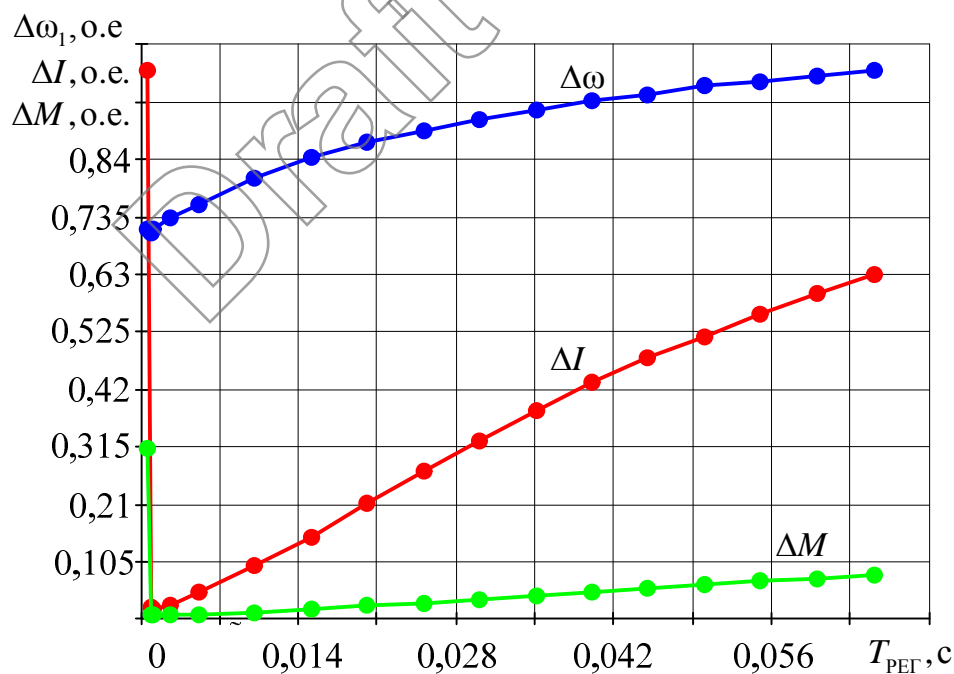


Рис. 3.18. Графики интегральных ошибок скорости тока и момента в зависимости от коэффициента $T_{\text{рег}}$

Видно, что в точке $T_{\text{рег}} = 0,001$ с. наблюдается минимум для всех трех зависимостей. С ростом постоянной времени появляется плавное увеличение интегральной ошибки оценки скорости и момента. При уменьшении $T_{\text{рег}}$ от точки 0,001 наблюдается скачкообразный рост интегральных ошибок по току, моменту и скорости (рис. 3.18).

Из диаграмм, представленных на рис. 3.19 видно, что с вводом интегральной составляющей качество и эффективность работы наблюдателя повысилась. Интегральная ошибка по току уменьшилась практически в 75 раз, это свою очередь привело к повышению точности оценки момента и скорости.

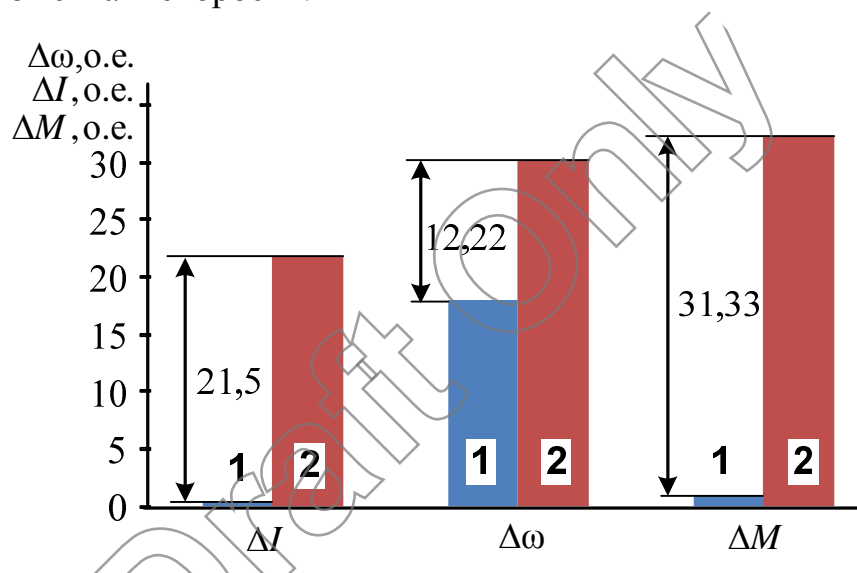


Рис. 3.19. Диаграммы интегральных ошибок при работе наблюдателя с интегральной составляющей 1 и без нее 2

Конечными настроечными коэффициентами для наблюдателя скорости были выбраны $K_{\text{рег}} = 30$, $T_{\text{рег}} = 0,001$ с. Параметры АД, используемого для настройки наблюдателя, представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8. Параметры электродвигателя АИМ А-100L4

$P_{\text{н}}, \text{Вт}$	$f, \text{Гц}$	$R_{\text{с}}, \text{Ом}$	$R_{\text{r}}, \text{Ом}$	$L_{\text{с}}, \text{Гн}$	$L_{\text{r}}, \text{Гн}$	$L_{\text{м}}, \text{Гн}$	$z_{\text{р}}$	$n_{\text{н}}, \text{об/мин}$
4	50	1,272	1,9126	0,009568	0,00358	0,0994	4	1410

На рис. 3.20 представлены переходные процессы по скорости для замкнутой системы ТРН-АД. Разработанный наблюдатель позволяет производить не только оценку скорости, момента нагрузки, но и потокосцепление.

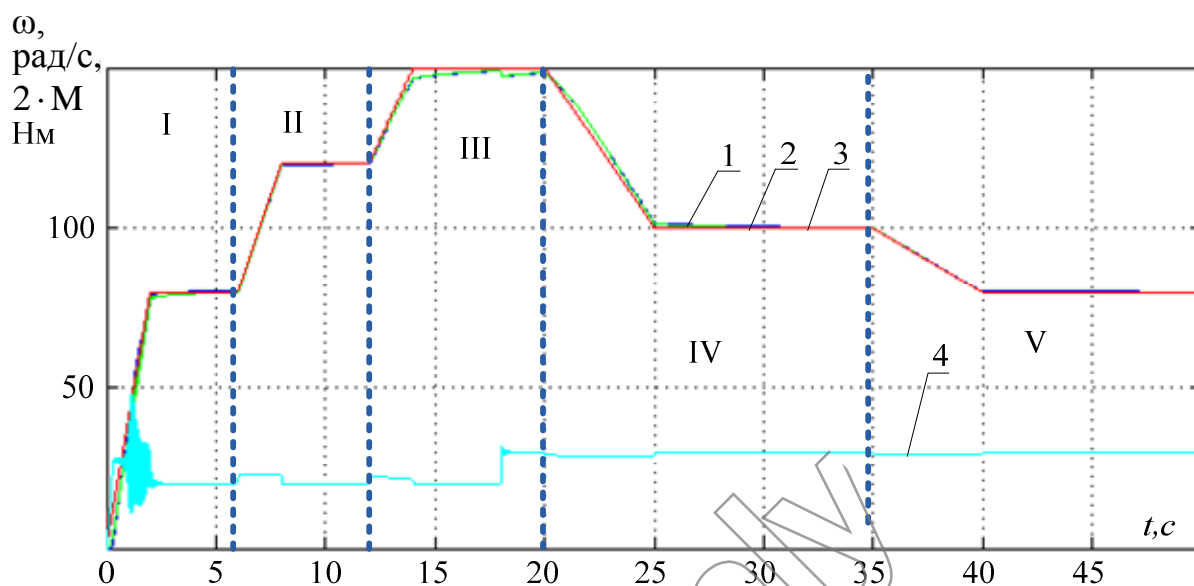


Рис. 3.20. Переходные процессы по скорости и моменту АД;

1 – угловая скорость АД $\omega_{ДВ}$, 2 – скорость задания $\omega_{ЗАД}$; 3 – оценка скорости $\hat{\omega}$; 4 – момент АД M

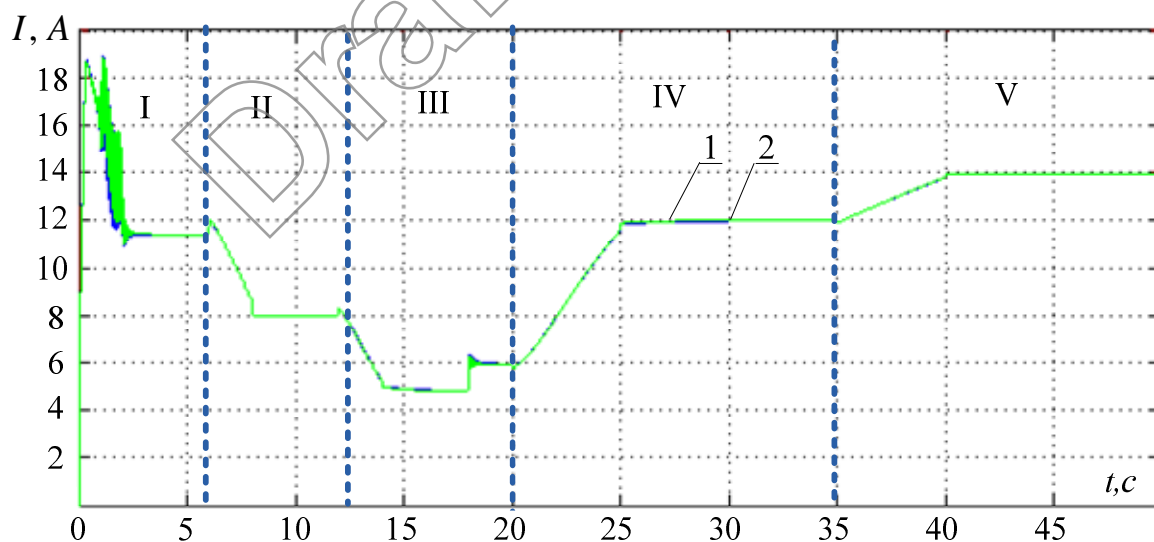


Рис. 3.21. Переходные процессы по току

1 – результирующий модуль тока АД I_R ; 2 – оценка результирующего модуля тока \hat{I}_R

Максимальная ошибка по току наблюдается на участках 1,3 в момент пуска и наброса нагрузки рис. 3.22 .

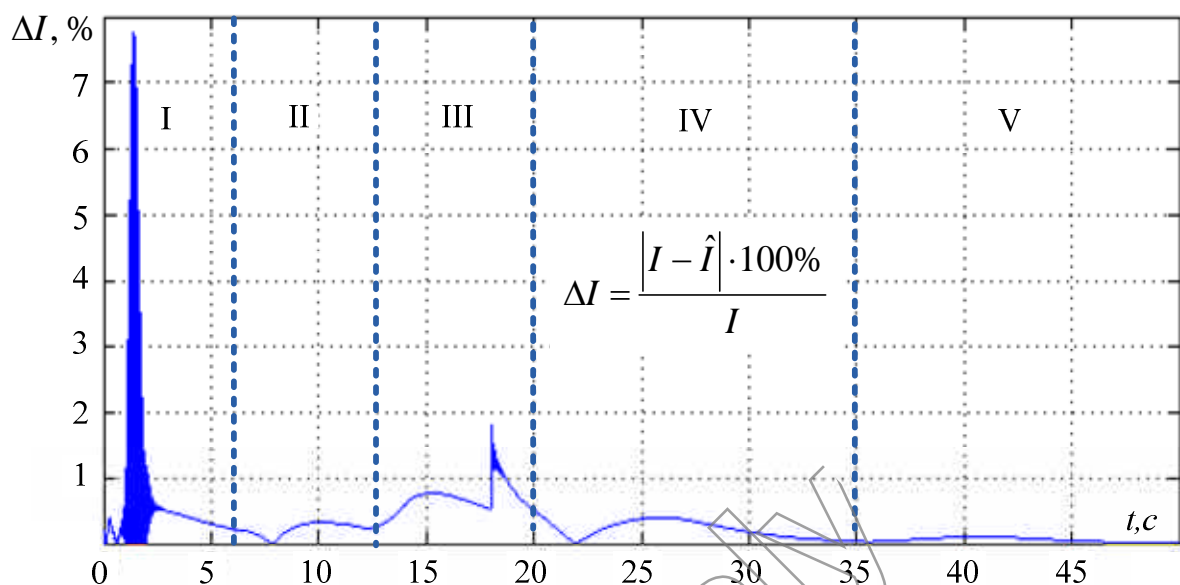


Рис. 3.22. Динамическая ошибка по току

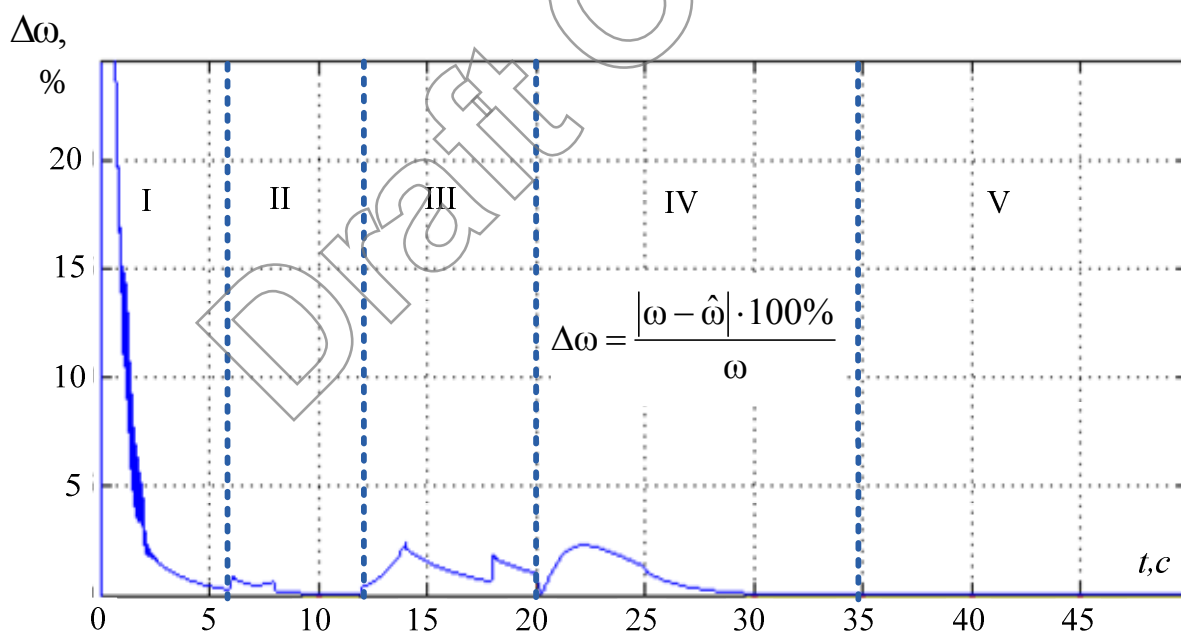


Рис. 3.23. Динамическая ошибка по скорости

Отработка возмущающего воздействия происходит с определенной задержкой, что показывает плавное спадание ошибки по скорости (рис. 3.23). Статическая ошибка оценки скорости меньше 3%.

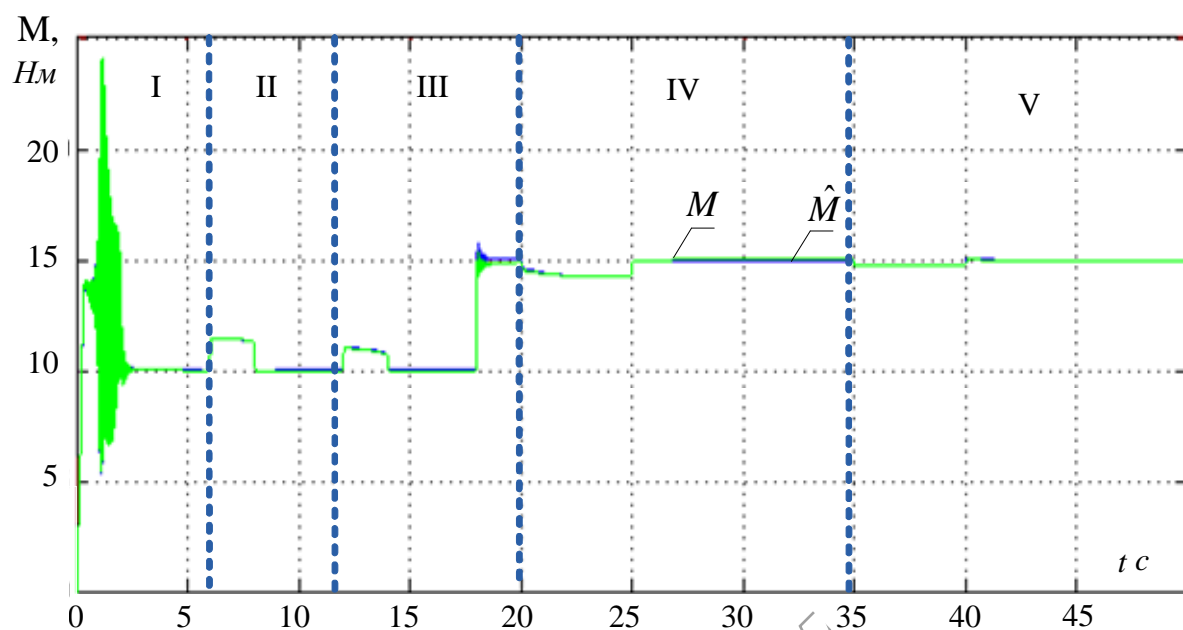


Рис. 3.24. Переходные процессы момента

Характер изменения динамической ошибки момента (рис. 3.25) и тока (рис. 3.22) имеют схожие черты на участках 1,3 что говорит об их влиянии друг на друга.

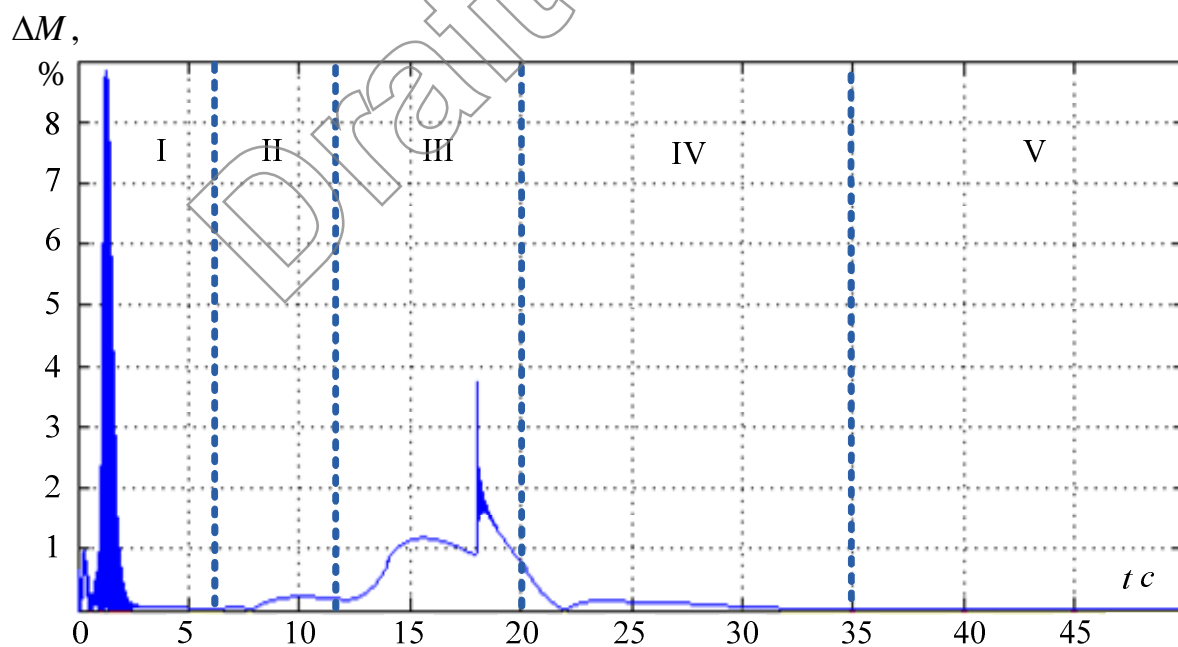


Рис. 3.25. Динамическая ошибка по моменту

Из данных процессов видно, что ТРН-АД обрабатывает заданную скорость. Максимальная ошибка по скорости, току и потокосцеплению наблюдается в момент пуска.

3.4. Определение настроечных коэффициентов для наблюдателя угловой скорости

Для выявления связи между параметрами двигателя, системы управления и настроечными коэффициентами наблюдателя использовалась аналогичная методика для нахождения параметров схемы замещения АД на основе ГА.

Структурная схема, на основе которой происходило определение настроечных коэффициентов для наблюдателя угловой скорости электропривода, выполненного по схеме ТРН-АД, представлена на рис. 3.26.

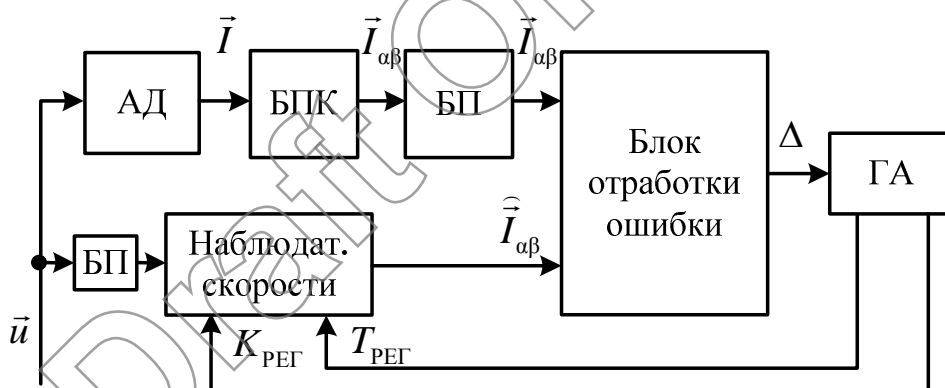


Рис. 3.26. Структурная схема идентификации параметров АД с помощью ГА

Вначале с помощью датчиков напряжения и тока снимаются входные значения напряжений \vec{u} и выходные данные токов \vec{I} АД. Затем вектор тока \vec{I} преобразуется в двухфазную систему координат и записывается в блок памяти БП1, а в БП2 входной вектор напряжения \vec{u} . Далее в блоке обработки ошибки сравнивается результирующий модуль вектор тока АД I_R и его оценка \hat{I}_R . Полученная ошибка Δ поступает на вход блока ГА, где на основе ее происходит вычисление коэффициентов наблюдателя угловой скорости $K_{\text{РЕГ}}$,

$T_{\text{РЕГ}}$. Далее цикл повторяется до тех пор пока ошибка Δ не будет стремиться к граничному минимальному значению, определяющему остановку работы ГА.

Затем были проведены эксперименты для серии 4А АД и полученные коэффициенты разработанного наблюдателя угловой скорости были занесены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Тип двигателя	Мощность двигателя	Параметры регулятора скорости		Параметры наблюдателя	
	P_H , кВт	T_{PC} , с	K_{PC} , о.е.	$T_{\text{РЕГ}}$, с	$K_{\text{РЕГ}}$, Нм/А
4А90L4У3	2,2	1,2	1,3	0,002	40
4А100L4У3	4	1,8	1,1	0,001	30
4А132S4У3	7,5	1,4	1	0,08	18
4А132M4У3	11	1,2	0,8	0,05	1
4А160M4У3	18,5	2	1,2	0,04	4
4А200L4У3	45	15	1	0,03	6
4А250S4У3	75	12	4	0,02	23
4А280S4У3	110	10	3	0,01	50
4А315S4У3	160	12	5	0,005	80
4А315M4У3	200	14	25	0,003	180
4А355S4У3	250	18	8	0,002	258
4А355M4У3	315	25	9	0,001	350

Из рис. 3.27 видно, как зависят от мощности параметры наблюдателя угловой скорости, где вначале коэффициент интегральной составляющей растет быстро, но потом спадает.

Коэффициент пропорциональной части вначале спадает до величины мощности ТРН равной 11 кВт, но потом также начинает расти. Максимальный коэффициент $K_{\text{РЕГ}}$ наблюдается для мощности АД равной $P_H = 315$ кВт, а $T_{\text{РЕГ}}$ для $P_H = 7,5$ кВт.

На основе полученных данных необходимо найти усредненные значения коэффициентов наблюдателя для промежуточных значений входных параметров. Основной сложностью при решении таких задач является многомерное пространство, которое необходимо аппроксимировать и где нужно найти соответствующие связи между входными и выходными сигналами

Поэтому для решения данной задачи использовалась ИНС, которая является мощным многомерным аппроксиматором.

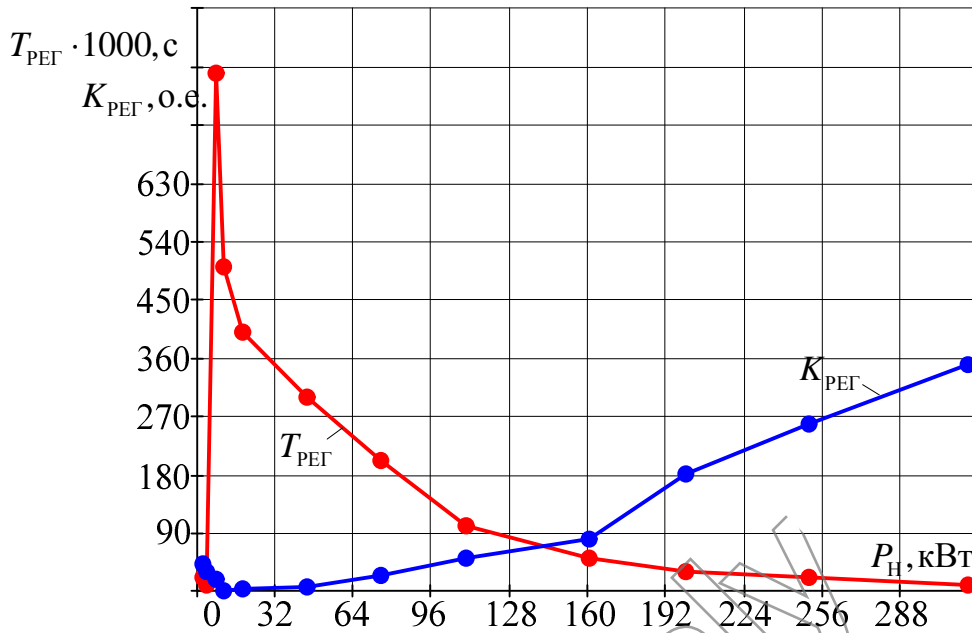


Рис. 3.27. Зависимость T_{PEG} и K_{PEG} от мощности АД

На рис. 3.28 представлена нейронная сеть со структурой 12-35-2, где 12 нейронов во входном, 35 в скрытом слое и 2 в выходном [101-103].

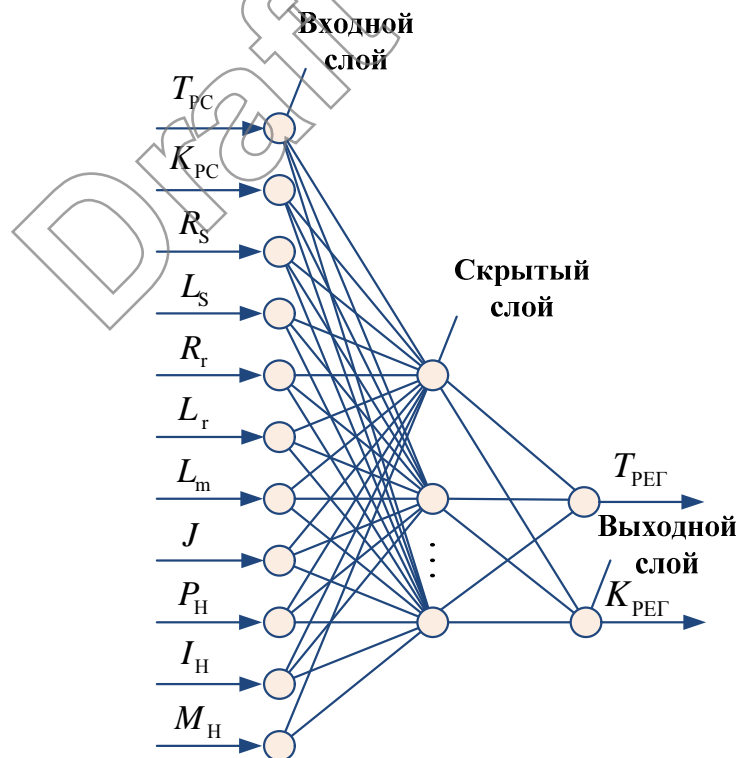


Рис. 3.28. Структура нейросетевого аппроксиматора

Входными сигналами для ИНС являются параметры двигателя $R_s, L_s, R_r, L_r, L_m, J, P_H, M_H, I_H$ и параметры регулятора скорости K_{PC}, T_{PC} , а выходными сигналами коэффициенты наблюдателя $K_{PEГ}, T_{PEГ}$.

Обучение нейронной сети проводилось в Matlab с использованием стандартных библиотек. В качестве метода обучения нейронной сети был выбран алгоритм Левенберга–Марквардта. Обучение нейронной сети производилось до достижения минимальной ошибки равной 0,001. После обучения ИНС была получена база данных, которая позволяет в соответствии с входными данными получить адекватные коэффициенты разработанного наблюдателя. Для проверки адекватности работы ИНС использовались тестовые параметры, которые не применялись при обучении [104].

Таблица 3.10

$P_H, \text{кВт}$		Параметры наблюдателя			
Эталонный двигатель	Тестовый двигатель	Эталонный двигатель		Тестовый двигатель	
		$T_{PEГ}, \text{с}$	$K_{PEГ}, \text{Нм/А}$	$T_{PEГ}, \text{с}$	$K_{PEГ}, \text{Нм/а}$
4	5,5	0,001	30	0,0018	38
11	15	0,05	1	0,045	3,4
45	55	0,03	6	0,022	8
75	90	0,02	23	0,015	30
110	132	0,01	50	0,0018	68
200	250	0,002	258	0,0016	267

Таблица 3.11

$P_H, \text{кВт}$		Интегральные ошибки			
Эталонный двигатель	Тестовый двигатель	Эталонный двигатель		Тестовый двигатель	
		$\Delta I, \text{о.е.}$	$\Delta \omega, \text{о.е.}$	$\Delta I, \text{о.е.}$	$\Delta \omega, \text{о.е.}$
4	5,5	0,29	17,93	0,34	20
11	15	0,56	21,1	0,48	25,89
45	55	0,8	23,4	0,78	24
75	90	0,9	26	0,88	27
110	132	1,2	27,5	1,35	26
200	250	1,5	40	1,6	48

В табл. 3.10 представлены параметры наблюдателя для эталонных и тестовых двигателей.

Адекватность полученных коэффициентов подтверждается с помощью интегральных критериев качества в табл. 3.11, проанализировав которую, можно увидеть, что с ростом мощности электропривода ТРН, растет погрешность, как по току, так и по скорости.

3.5. Исследование модифицированного наблюдателя на робастность

Для выявления чувствительности наблюдателя к изменению параметров АД была проведена серия экспериментов на имитационной модели электропривода ТРН-АД. При тепловом воздействии на электродвигатель активные сопротивления обмоток статора и ротора изменяются, в результате чего это может сказаться на устойчивой работе наблюдателя скорости.

Таблица 3.12. Пропорциональное увеличение сопротивления ротора и статора в электроприводе ТРН-АД с АД АИМ А-100L4

Диапазон устойчивого рег.	Процентное увеличение сопротивления статора	Процентное увеличение сопротивления ротора	Интегральная ошибка по скорости, $\Delta\omega$, о.е	Интегральная ошибка по току, ΔI , о.е.
70-151	5%	5%	36,72	1,3
	Первоначальное состояние АД		19,86	0,33
100-151	10%	10%	41,53	3,57
	Первоначальное состояние АД		10,5	0,16
110-151	20%	20%	61,53	5,77
	Первоначальное состояние АД		7	0,13

На основе полученных данных было установлено, что диапазон устойчивого регулирования скорости в замкнутом электроприводе по наблюдателю при изменении активных сопротивлений ротора и статора уменьшается. Появляется статическая ошибка оценки скорости, которая зависит от угла задания. Чем больше угол, тем существеннее ошибка наблюдателя. При выходе наблюдателя

из области устойчивого регулирования скорости появляются автоколебания в токе и моменте двигателя, что может привести электропривод в неустойчивое состояние. Наиболее чувствительным оказался наблюдатель к одновременному изменению сопротивлений обмоток статора и ротора (табл. 3.12), менее чувствительным к изменению сопротивления статора (табл. 3.13).

Таблица 3.13. Пропорциональное увеличение сопротивления статора в электроприводе ТРН-АД с АД АИМ А-100L4

Диапазон устойчивого рег.	Процентное увеличение сопротивления статора	Процентное увеличение сопротивления ротора	Интегральная ошибка по скорости, $\Delta\omega$, о.е	Интегральная ошибка по току, ΔI , о.е.
70-151	5%	0%	34,2	0,63
	Первоначальное состояние АД		19,86	0,33
70-151	10%	0%	48,15	1,1
	Первоначальное состояние АД		19,86	0,33
70-151	15%	0%	50	1,95
	Первоначальное состояние АД		19,86	0,33
90-151	25%	0%	58,1	25,4
	Первоначальное состояние АД		12,5	0,21
90-151	30%	0%	75	32,7
	Первоначальное состояние АД		12,5	0,21

Таблица 3.14. Пропорциональное увеличение сопротивления ротора в электроприводе ТРН-АД с АД АИМ А-100L4

Диапазон устойчивого рег.	Процентное увеличение сопротивления статора	Процентное увеличение сопротивления ротора	Интегральная ошибка по скорости, $\Delta\omega$, о.е	Интегральная ошибка по току, ΔI , о.е.
70-151	0%	5%	38,74	1,4
	Первоначальное состояние АД		19,86	0,33
90-151	0%	10%	53	4,5
	Первоначальное состояние АД		12,5	0,21
100-151	0%	15%	70,2	4,36
	Первоначальное состояние АД		10,5	0,16

Из табл. 3.14 видно, что АД весьма чувствителен к изменению активного сопротивления ротора, так оно влияет на жесткость механической характеристики асинхронного двигателя.

Неадекватная оценка скорости, выдаваемая наблюдателем, при изменении параметров АД объясняется в первую очередь тем, что параметры регулятора скорости и наблюдателя остаются прежними, а у исследуемого объекта изменяются. Наблюдатель начинает подавать в обратную связь по скорости оценку, которая не учитывает изменения параметров АД. Все это приводит к неустойчивой работе электропривода, замкнутого по наблюдателю. Поэтому, для обеспечения устойчивой работы разработанного наблюдателя угловой скорости при изменении параметров АД, необходимо вводить корректирующее воздействие.

3.6. Оптимизация работы модифицированного наблюдателя при изменении параметров АД

Исследование наблюдателя угловой скорости на робастность для электропривода ТРН-АД показало, что при изменении параметров АД появляются автоколебания в оценке скорости. Чем ниже скорость, тем существеннее происходит влияние изменения состояния АД на работу наблюдателя. Наблюдатель может продолжать отрабатывать заданную скорость с определенной погрешностью, но не во всем диапазоне.

Для повышения эффективности работы наблюдателя при изменении состояния АД необходимо вводить корректирующее воздействие, которое стабилизировало бы работу наблюдателя на средних и низких скоростях [105].

Рис. 3.31 показывает, как ведет себя абсолютная ошибка по скорости электропривода при изменении активного сопротивления ротора и статора АД, которая определяется по следующему выражению:

$$\begin{aligned}\omega_{\Delta 1} &= \omega_{\text{зАд1}} - \omega_{\text{дВ1}}, \\ \omega_{\Delta 2} &= \omega_{\text{зАд2}} - \omega_{\text{дВ2}},\end{aligned}\tag{3.26}$$

где $\omega_{\text{зАд1}}, \omega_{\text{зАд2}}$ – скорость задания;

$\omega_{\Delta 1}, \omega_{\Delta 2}$ – абсолютные значения ошибок;

$\omega_{\text{дВ1}}, \omega_{\text{дВ2}}$ – угловая скорость АД при различных углах задания.

Абсолютная ошибка по скорости для наблюдателя при изменении состояния тогда будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\omega_{1\text{Н}} &= \omega_{\text{зАд1}} - \hat{\omega}_1, \\ \omega_{2\text{Н}} &= \omega_{\text{зАд2}} - \hat{\omega}_2,\end{aligned}\tag{3.27}$$

где $\omega_{1\text{Н}}, \omega_{2\text{Н}}$ – абсолютные ошибки наблюдателя;

$\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2$ – оценки скорости АД при различных углах задания.

Из рис. 3.29 видно, что в зависимости от угла задания изменяется ошибка по скорости для электропривода $\omega_{\Delta 1}$ и $\omega_{\Delta 2}$. Чем ниже скорость, тем больше ее величина ошибки. Наблюдатель не чувствует изменение состояния АД, поэтому абсолютные ошибки для него можно с определенной погрешностью считать одинаковыми $\omega_{1\text{Н}} \approx \omega_{2\text{Н}}$.

Ввиду того, что наблюдатель угловой скорости продолжает формировать оценку угловой скорости на основе первоначальных данных о электродвигателе, то это приводит к неустойчивой работе замкнутой системы. Если в контур обратной связи вести смещение, то абсолютная ошибка по скорости для наблюдателя будет вычисляться тогда по следующему выражению:

$$\begin{aligned}\omega_{1\text{Н_СМ}} &= \omega_{\text{зАд1}} - \hat{\omega}_1 + \omega_{\text{СМ1}}, \\ \omega_{2\text{Н_СМ}} &= \omega_{\text{зАд2}} - \hat{\omega}_2 + \omega_{\text{СМ2}},\end{aligned}\tag{3.28}$$

где $\omega_{1\text{Н_СМ}}, \omega_{2\text{Н_СМ}}$ – абсолютные значения ошибок оценки угловой скорости при вводе в смещения в контур скорости;

$\omega_{\text{СМ1}}, \omega_{\text{СМ2}}$ – смещения оценки угловой скорости.

Абсолютная ошибка скорости для АД с учетом смещения будет определяться по следующему выражению:

$$\begin{aligned}\omega_{1_CM} &= \omega_{3AD1} - \omega_{ДВ1} + \omega_{CM_1} \\ \omega_{2_CM} &= \omega_{3AD2} - \omega_{ДВ2} + \omega_{CM_2}\end{aligned}\quad (3.29)$$

где ω_{1_CM} , ω_{2_CM} – абсолютные значения ошибок угловой скорости при вводе в смещения в контур скорости; ω_{CM_1} , ω_{CM_2} – смещения оценки угловой скорости.

$$\begin{aligned}\omega_{1H_CM} &= \omega_{3AD1} - \hat{\omega}_1 + \omega_{CM1}, \\ \omega_{2H_CM} &= \omega_{3AD2} - \hat{\omega}_2 + \omega_{CM2},\end{aligned}\quad (3.30)$$

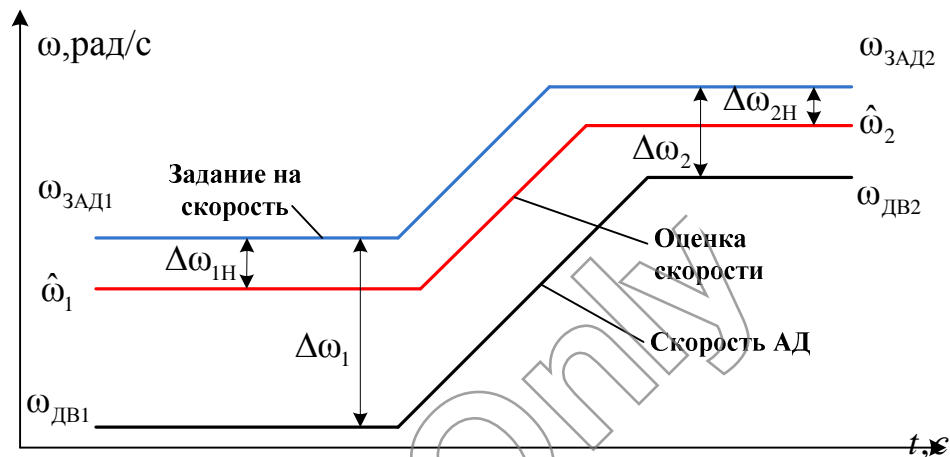


Рис. 3.29 Зависимость ошибки скорости от уровня задания при изменении состояния АД

Как видно из графика 3.30 ошибка по скорости для наблюдателя с вводом смещения увеличилась, но погрешность относительно задания для электропривода уменьшилась.

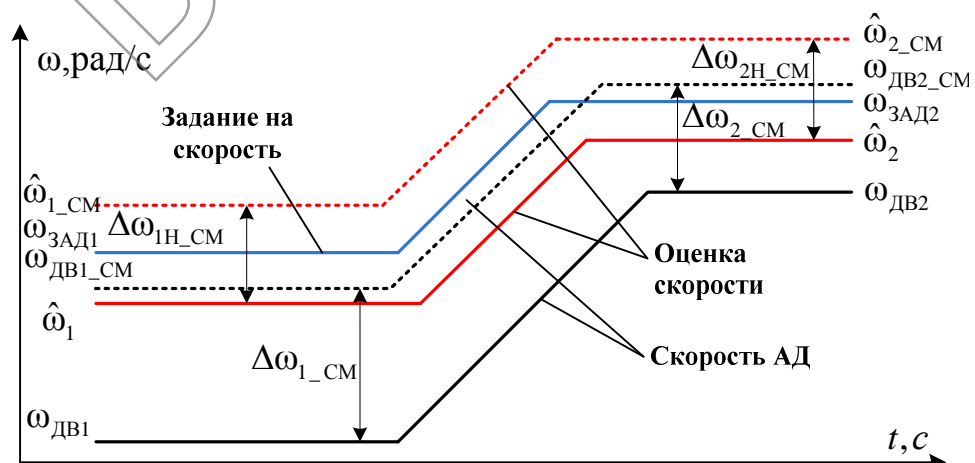


Рис. 3.30 Зависимость ошибки скорости от уровня задания при введении смещения и при изменении состояния АД

Стоит отметить, что ошибка оценки скорости для электропривода на средних скоростях может иметь как положительный, так и отрицательный характер в зависимости от конкретного случая, в данном случае она имеет отрицательный характер $\omega_{2H_CM} < 0$.

Ввод смещения (рис. 3.32) позволяет уменьшить величину относительной ошибки по скорости на низких скоростях для электропривода, тем самым увеличивает устойчивость работы наблюдателя.

Ввиду того, что для систем ТРН-АД высоких требований к регулированию скорости обычно не предъявляется, то принципиальной разницы, какой характер будет иметь абсолютная ошибка по скорости положительный или отрицательный характер, нет. При работе системы ТРН-АД, замкнутой по наблюдателю, это имеет значение, так как от этого зависит работоспособность всей системы. Следовательно, чем меньше будет ошибка оценки скорости по модулю для электропривода на низких скоростях, тем устойчивее и эффективнее будет работать наблюдатель. Для обеспечения устойчивого состояния электропривода ТРН-АД, замкнутого по наблюдателю угловой скорости, была разработана структурная схема блока смещения (рис.3.31). Принцип работы данного блока заключается в ведении адаптивного смещения в контур скорости в зависимости от текущего состояния АД.

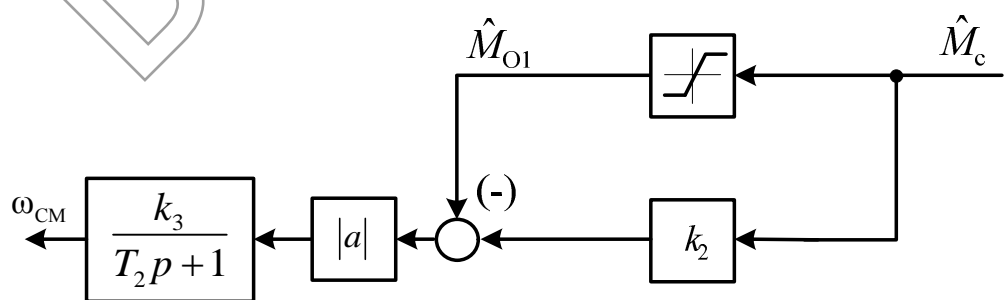


Рис. 3.31 Структурная схема блока смещения БСМ

Текущее состояние АД определяется с помощью блока ограничения оценки нагрузки. Если выражение стремится к нулю:

$$|\hat{M}_{01} - \hat{M}_c k_2| \approx 0, \quad (3.33)$$

где \hat{M}_{01} – ограниченный момент оценки нагрузки, \hat{M}_c – оценка момента нагрузки, k_2 – пропорциональный коэффициент, то это говорит о том, что состояние АД не изменилось. Как только момент оценки \hat{M}_c попадет в область ограничений, которая обычно выбирается в пределах от 0 до $1,05M_H$, то это свидетельствует о наличии изменения параметров АД. Следовательно, значение выражения 3.33 уже изменится и будет расти.

Так как в системе уже присутствует небольшой сдвиг за счет коэффициента k_2 , то при попадании \hat{M}_c в область ограничений, значение выражения $\Delta M_{11} = |\hat{M}_{01} - \hat{M}_c k_2|$ увеличится. Значительная величина ΔM_{11} говорит о том, что произошло изменение состояния АД, а именно, увеличились активные сопротивления обмоток статора и ротора АД.

Итоговое выражения для определения смещения текущего состояния АД будет определяться по следующему выражению:

$$\Delta \omega_{cm} = |\hat{M}_{01} - \hat{M}_c k_2| \frac{k_3}{T_2 p + 1}, \quad (3.35)$$

Пропорциональный коэффициент k_2 выбирается из диапазона 0,95... 1,2 и служит для введения небольшого первоначального смещения. При анализе раннее полученных графиков было установлено, что зависимость просадки по скорости от момента нагрузки на валу двигателя можно считать линейной. Поэтому на основе данных зависимостей пропорциональный коэффициент k_3 для данного двигателя принимаем $k_3 = 0,44$. Для уменьшения пульсаций в сигнале коррекции вводится апериодическое звено, где постоянная времени выбирается экспертом исходя из текущих условий.

Из рис. 3.33 и 3.34 видно, что с увеличением активного сопротивления ротора и статора на 10% при работе даже на холостом ходу (рис. 3.33, участок 1) на низких скоростях имеется ошибка по скорости для электропривода.

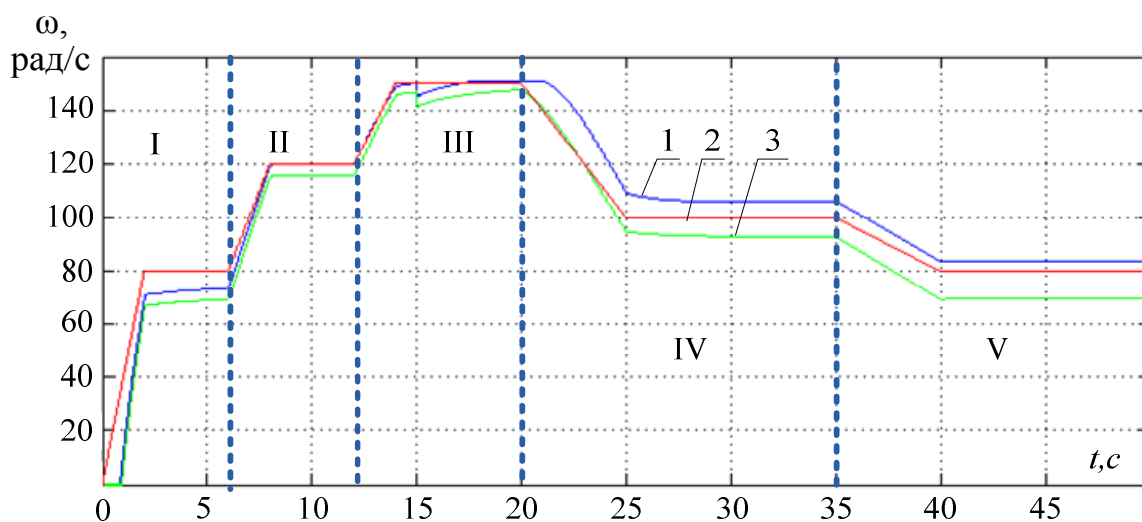


Рис. 3.33 Переходные процессы скорости при 10% увеличении сопротивления статора и ротора;

1– угловая скорость АД с компенсацией изменения параметров; 2 – заданная скорость;
3 – скорость АД без компенсации

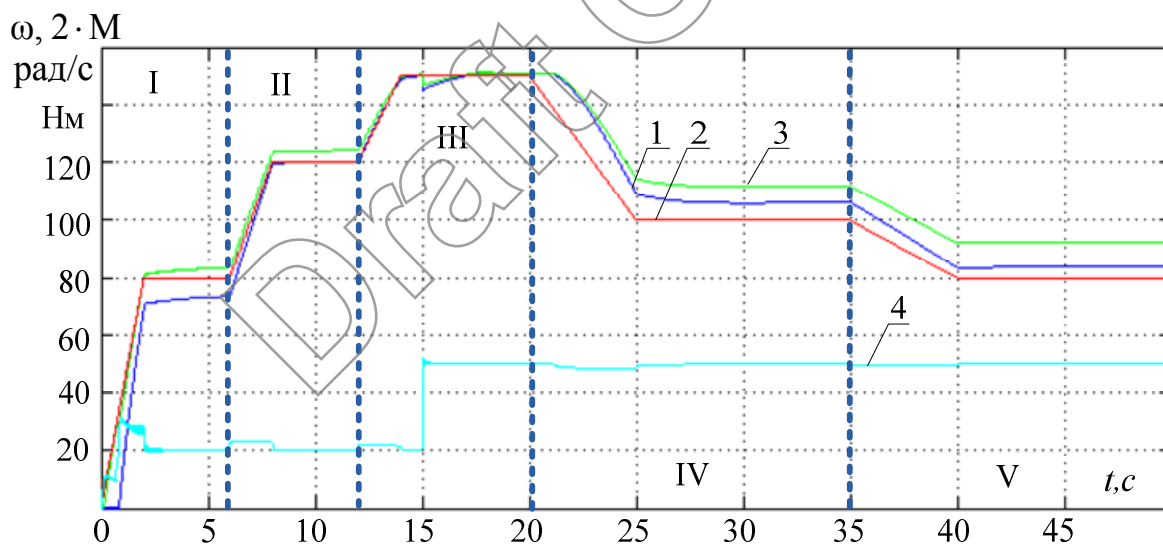


Рис. 3.34 Переходные процессы скорости при 10% увеличении сопротивления статора и ротора;

1– угловая скорость АД с компенсацией изменения параметров; 2 – заданная скорость; 3 – оценка скорости; 4 – момент двигателя с компенсацией

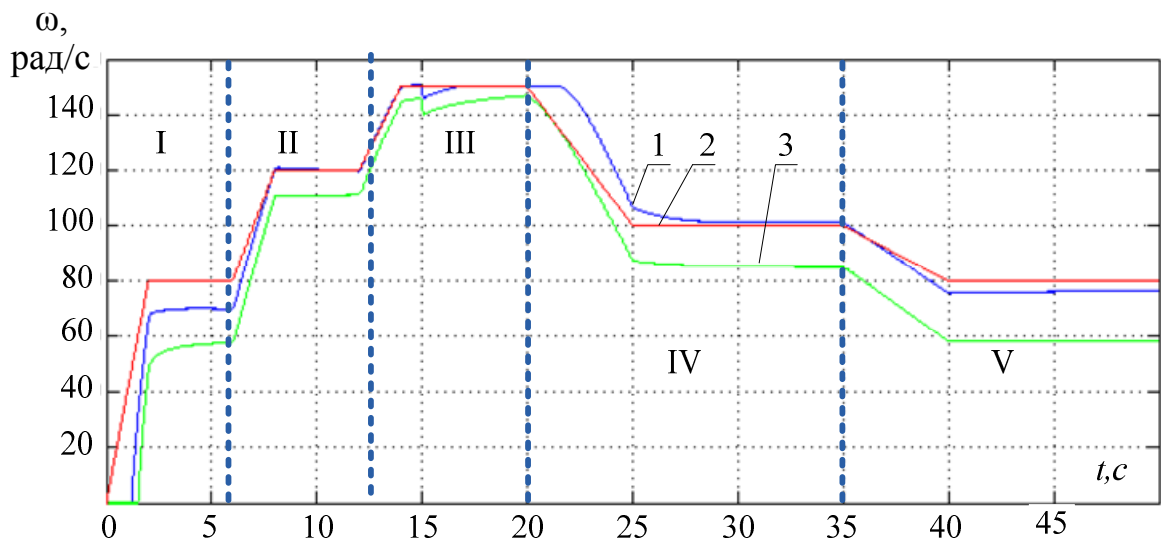


Рис. 3.35 Переходные процессы скорости при 20% увеличении сопротивления статора и ротора;

1– угловая скорость АД с компенсацией изменения параметров; 2 – заданная скорость;
3 – скорость АД без компенсации

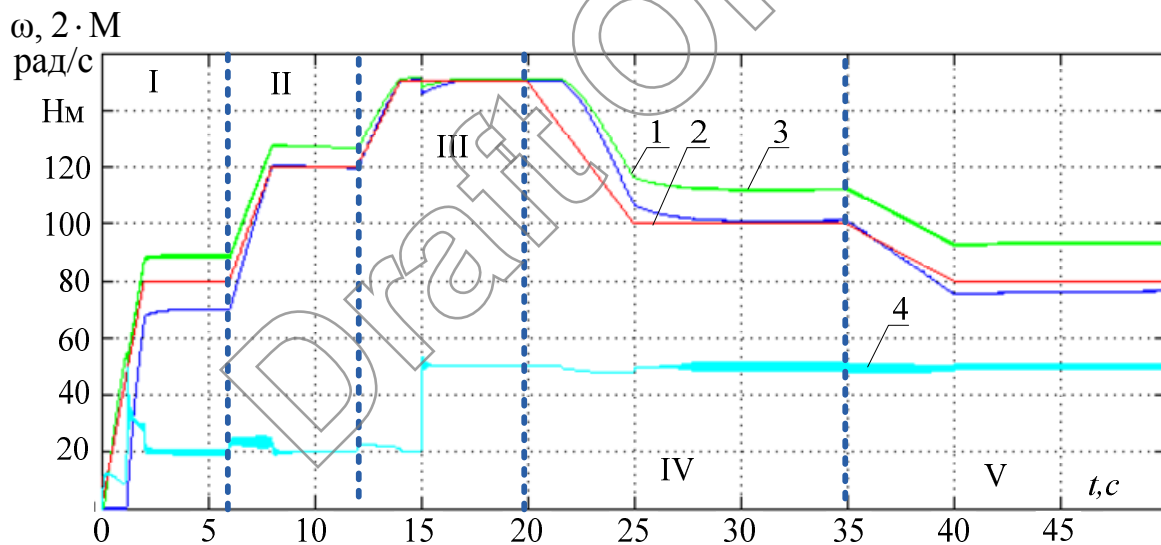


Рис. 3.36 Переходные процессы скорости при 20% увеличении сопротивления

1– угловая скорость АД с компенсацией изменения параметров; 2 – заданная скорость;
3 – оценка скорости; 4 – момент двигателя с компенсацией

Ввод смещения немного ее уменьшает, а на средних (рис. 3.33, участок 2) и высоких (рис. 3.33, участок 3) скоростях практически полностью ее ликвидирует. При работе под нагрузкой с блоком смещения появляется отрицательная ошибка на средних и низких скоростях (рис. 3.33, участки 4,5,). При увеличении сопротивления ротора и статора на 20% (рис. 3.35,), как на холостом ходу, так и под нагрузкой, значительно уменьшается ошибка по скорости по сравнению с системой управления без коррекции.

Как видно из переходных процессов, при значительном увеличении сопротивлений статора и ротора, блок смещения эффективнее формирует корректирующее воздействие. Это объясняется тем, что чем более ярко выражены изменения состояния системы АД, тем легче их идентифицировать и сформировать необходимое корректирующее воздействие для контура скорости.

Из переходных процессов (рис. 3.34, рис. 3.36) видно, что в моменте двигателя отсутствуют автоколебания, приводящие к неустойчивой работе электропривода. Также данные переходные процессы показывают, что смещение для оценки скорости формируется адаптивно, в зависимости от текущего состояния АД и угла задания.

Основная опасность работы замкнутого электропривода ТРН-АД при изменении состояния АД заключается в том, что наблюдатель перестает адекватно определять оценку скорости, но САУ принимает ее за текущую скорость АД. Разработанный блок коррекции для наблюдателя угловой скорости позволяет путем введения смещения в оценку скорости относительно текущего состояния АД повысить эффективность работы наблюдателя, как на низких, так и на средних скоростях. Также устранить автоколебания в моменте двигателя и уменьшить погрешность оценки скорости при изменении параметров двигателя.

3.7. Выводы по третьей главе

1. К одному из основных недостатков ГА относится высокая требовательность к вычислительной мощности, а также довольно продолжительное время поиска глобального минимума функции. Но в тоже время с помощью ГА на основе экспериментальных данных можно получать оценки параметров двигателя с неплохой точностью, необходимой для построения наблюдателей угловой скорости.
2. Классический подход при разработке наблюдателя скорости на основе математического аппарата Люенбергера для асинхронного электропривода затруднен тем, что АД является сложным нелинейным объектом высокого порядка.
3. Разработанная структура наблюдателя хорошо подходит для систем ТРН-АД, где происходит постоянно изменение электромагнитного момента в результате импульсно-фазового регулирования питающего напряжения, подаваемого на статорные обмотки.
4. Для обеспечения устойчивой работы наблюдателя при изменении состояния АД в обратную связь по скорости вводится смещение. Установлено, что на высоких скоростях наблюдатель ведет себя лучше и стабильнее, чем на низких.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТРН-АД

4.1. Описание экспериментальной установки

Для апробации диссертационных результатов, была проведена серия экспериментов на экспериментальной установке, предназначенной для исследования асинхронного электропривода, выполненного по схеме ТРН-АД.

Данный стенд позволяет производить исследования разомкнутой системы электропривода ТРН-АД по скорости и записывать полученные результаты в виде массивов данных или графиков.

Основные элементы установки электропривода: АД, ТРН и ДПТ НВ, использующиеся в качестве нагрузочной машины.

Помимо этого, в состав экспериментальной установки входят:

- Трехфазный источник питания, предназначенный для обеспечения трехфазным переменным напряжением ТРН. Источник питания дополнительно снабжен защитой от перегрузок, устройством защитного отключения, кнопкой аварийного отключения и ключом несанкционированного включения.
- Тиристорный преобразователь, предназначенный для регулирования частоты вращения ДПТ (режим преобразователя) и трехфазного АД (режим регулятора). С помощью данного преобразователя, возможно, осуществлять регулирование напряжения, как в цепи постоянного тока, так и переменного. Выходное напряжение ТРН регулируется в ручном или автоматическом режиме.
- Трехполюсный выключатель, предназначенный для ручного, дистанционного или автоматического включения/отключения электрической цепи.
- Трехфазная трансформаторная группа, обеспечивающая ТРН трехфазным напряжением.

- Блок мультиметров с жидкокристаллическим дисплеем, позволяющий измерять токи, напряжения, омические сопротивления.
- Указатель частоты вращения, обеспечивающий индикацию угловой скорости электрических машин в аналоговой форме.
- Коннектор, предназначенный для обеспечения удобного доступа к входам или выходам платы сборки данных PCI 6024E персонального компьютера.
- Персональный компьютер, позволяющий осуществлять дистанционное, автоматическое управление лабораторным комплексом, отображать и записывать полученную информацию.
- Блок датчиков тока, напряжения обеспечивает получение нормированных электрических сигналов, которые пропорциональны напряжениям и токам в измеряемых силовых цепях постоянного и переменного тока. Блок датчиков тока и напряжения имеет гальваническую развязку.

Основные параметры АД и нагрузочной машины представлены в табл. 4.1 и табл. 4.2.

Таблица 4.1. Параметры АД

$P_H, \text{Вт}$	$U_H, \text{В}$	$\cos \varphi$	$I_H, \text{А}$	$n_H, \text{об/мин}$	$\eta_H, \%$	$x_1, \text{о.е.}$	$R_1, \text{о.е.}$	$x'_2, \text{о.е.}$	$R'_2, \text{о.е.}$
30	127	0,73	0,35	1250	36	0,087	0,18	0,15	0,150

Таблица 4.2. Параметры машины постоянного тока

$P_H, \text{Вт}$	$U_H, \text{В}$	$I_H, \text{А}$	$n_H, \text{об/мин}$	$\eta_H, \%$	$I_{BH}, \text{А}$	$\cos \varphi$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_{\text{оя}}, \text{Ом}$
90	220	0,56	1500	57,2	0,087	0,73	86	1,15

Основные параметры датчиков тока и напряжения представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Параметры датчиков токов и напряжения

	Выходные параметры	Величины измеренные мультиметром	Коэффициенты усиления
Датчики тока	0,54	0,42	1,1
Датчики напряжения	0,53	74,3	198,257
Датчик скорости	5	1300	260

Расшифровка и основные характеристики оборудования, используемые в ходе эксперимента, приведены ниже в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Параметры оборудования и их обозначения

Обозначение	Наименование	Параметры
ТТ	Трехфазная трансформаторная группа	3 х 80 ВА 230 /242, 235, 230, 226, 220,133,127 В
QA	Трехфазный выключатель	~400 В; 10 А
ВА	Блок датчиков тока и напряжения	три измерительных преобразователя «ток-напряжение» 5А/0,5А/5 В; три измерительных преобразователя «напряжение-напряжение» 1000 В/100 В/3 В
GA	Трехфазный источник питания	~400 В; 16 А
GB	Источник питания двигателя постоянного тока	– 0...250 В, – 3 А (якорь) – 200 В, – 1 А (возб.)
D2	Машина постоянного тока	90 Вт; – 220 В, – 0,76 А (якорь) 220 В (возбуждение)
DD	Преобразователь угловых перемещений	Шесть выходных сигналов
TP	Тиристорный преобразователь/регулятор	~3 х 400 В / 2 А Шесть тиристоров
D1	Машина переменного тока	50 Вт; ~230 В; 1500 мин ⁻¹
IV	Указатель частоты вращения	-2000...0...2000 мин ⁻¹
BM	Блок мультиметров	Три мультиметра – 0...1000 В – 0... 10 А – 0...20 МОм
KK	Коннектор	Восемь аналоговых дифф. входов; Два аналоговых выхода; Восемь цифровых входов/выходов
ПК	Персональный компьютер	Плата сбора информации PCI 6024E

Сбор данных производился при помощи платы 6024Е фирмы National Instruments. Характеристики аналогового входа [106] сведены в табл. 4.4.

Таблица 4.5. Характеристики аналогового входа платы

Количество каналов	16 однопроводных и 8 дифференциальных (режим выбирается программно для каждого канала)
Тип АЦП	последовательная аппроксимация
Разрешение	12 бит, 1 в 4096
Скорость сэмпирования	20000 сэмплов в секунду (гарантировано)
Диапазон входных сигналов	только биполярный
Входная связь	постоянный ток
Макс. рабочее напряжение (сигнал + синфазный режим)	каждый вход должен находиться в пределах 11 В от земли
Передача данных	DMA, прерывания, программируемый ввод/вывод
Режим DMA	сбор вразброс (одна передача, запрос на передачу)
Размер памяти конфигурирования	512 слов
Время стабилизации для полномасштабного шага	5 мс (максимум)

Внешний вид экспериментальной установки, использующейся для исследования электропривода ТРН-АД, представлен на рис. 4.1

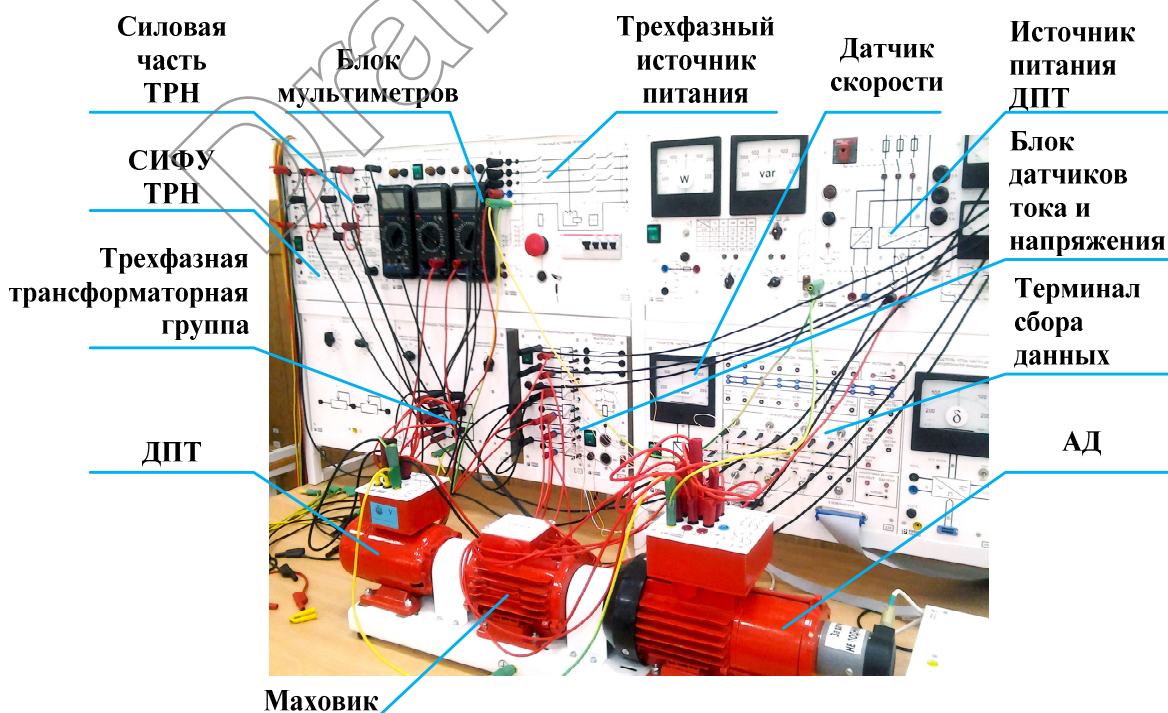


Рис. 4.1. Внешний вид экспериментальной установки ТРН-АД

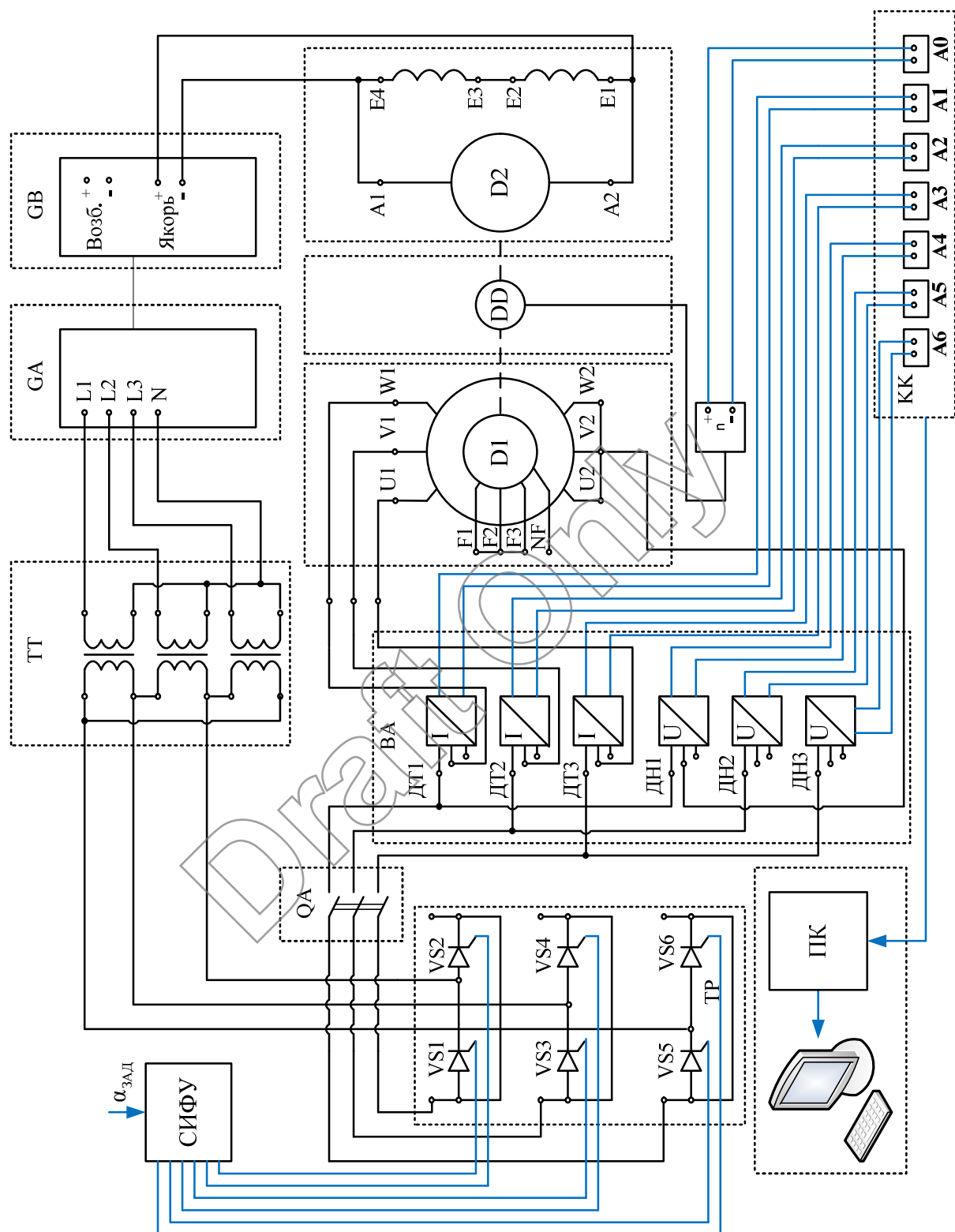


Рис. 4.2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки ТРН-АД

СИФУ ТРН-АД обеспечивает изменение угла управления тиристоров ТРН в функции управляющего сигнала. Особенностью СИФУ электропривода является цифровой принцип ее реализации на интегральных микросхемах средней и малой степени интеграции. Структурная схема СИФУ показана на рис. 4.3.

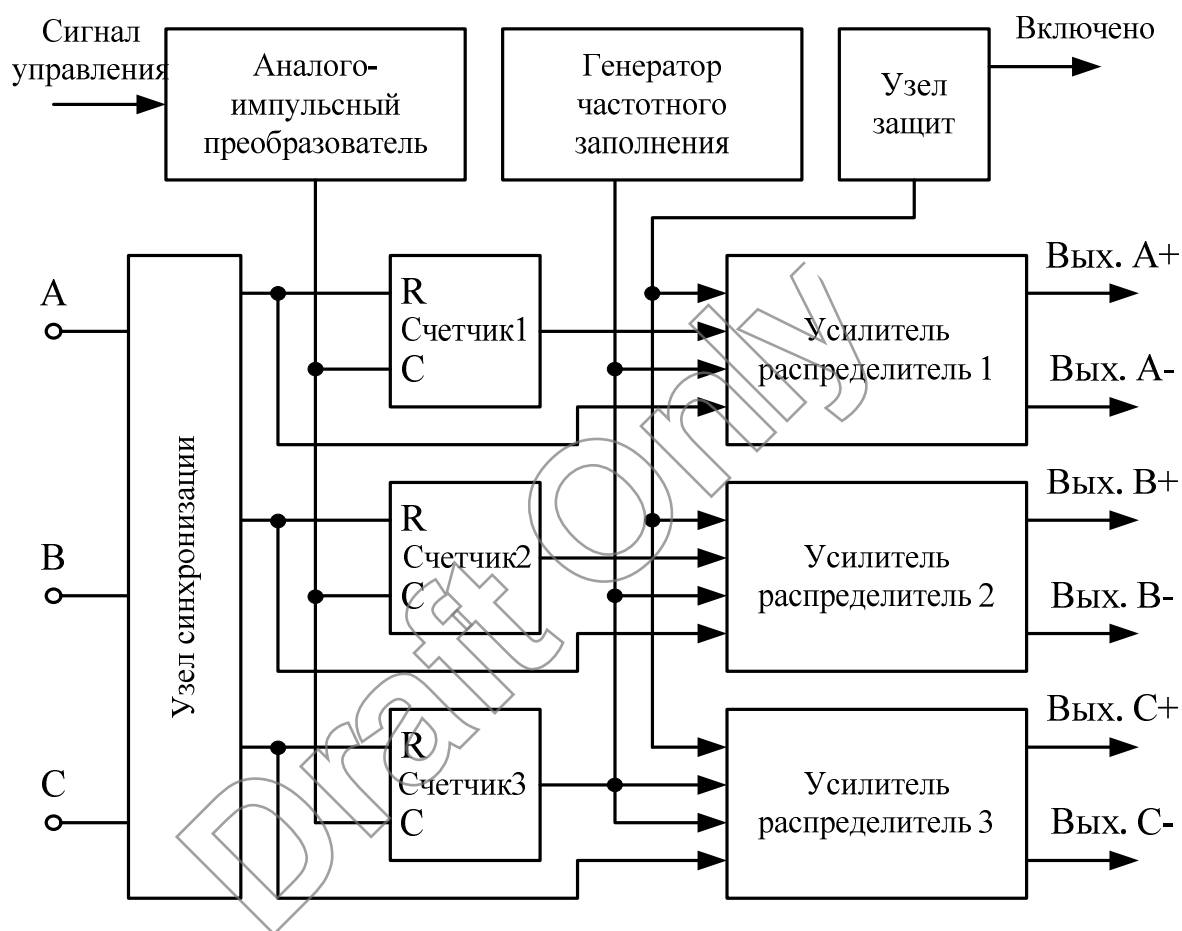


Рис. 4.3. Структурная схема СИФУ

Сигнал управления 0...10 В поступает на аналого-импульсный преобразователь, который формирует на выходе последовательность импульсов постоянной длительности с частотой, определяемой напряжением сигнала управления.

Импульсы с аналого-импульсного преобразователя (АИП) поступают на счетные входы счетчиков 1, 2 и 3. Счетчики построены таким образом, что при достижении значения 80 на одном из их выходов появляется сигнал логической единицы, который сохраняется до прихода импульса сброса.

Узел синхронизации формирует импульсы синхронизации для каждой фазы. Импульсы вырабатываются при переходе синусоиды питающего напряжения через “0”, т.е. два раза за период. В зависимости от частоты импульсов аналого-импульсного преобразователя меняется время счета импульсов до 80, а, следовательно, и время нахождения счетчиков в состоянии логического нуля от момента перехода синусоиды “0”.

Команда на открытие тиристоров вырабатывается усилителями-распределителями 1,2 и 3 путем логического умножения четырех логических сигналов:

- от счетчиков, которые определяют угол открытия тиристоров;
- от узла синхронизации, позволяющих распределить импульсы одного канала счета на два тиристора;
- от узла защит, вырабатывающего разрешение на работу;
- от генератора частотного заполнения.

Узел защит обеспечивает защиту электропривода от обрыва фазы и от неправильного чередования фаз.

Генератор частотного заполнения обеспечивает устойчивую работу электропривода на активно-индуктивную нагрузку при любых углах управления.

Узел синхронизации предназначен для синхронизации импульсов СИФУ с фазами сетевого напряжения. Узел построен на транзисторных ключах. Напряжение синхронизации поступает на схему с вторичных обмоток трансформатора. Это напряжение синфазно связано с напряжением силовой схемы.

Усилители импульсов предназначены для усиления импульсов управления СИФУ и гальванической развязки цепей управления и силовых цепей.

Счетчики предназначены для формирования интервала времени, соответствующего углу управления тиристорами α , путем счета импульсов АИП.

4.2. Описание программного комплекса экспериментальной установки ТРН-АД

Для исследования электропривода, выполненного по схеме ТРН-АД, с модифицированным наблюдателем был разработан программный комплекс, при реализации которого использовалась среда C++Builder 2007. Архитектура проекта Projekt1:Build Configurations; Projekt1.res; ADm.cpp (ADm.cpp, ADm.dfm, Adm.h); Par1.h; Projekt1.cpp.

Для настройки системы в состав программы была включена математическая модель ТРН-АД с непосредственным управлением ключами. Особенности данной модели является упрощенное моделирование силовой части электропривода ТРН-АД, а также применение двухфазной имитационной модели АД в неподвижной системе координат. Для исследования замкнутой системы электропривода ТРН-АД по угловой скорости в программном комплексе предусмотрено два типа регулятора скорости: релейный и классический пропорционально-интегральный регулятор.

Программный комплекс позволяет исследовать пусковые режимы ТРН-АД, как на имитационной модели, так и на экспериментальной установке.

Основные кнопки управления: «Пуск», «Стоп», «Default», «Диагностика», «Заккрыть». Кнопка «Пуск» осуществляют запуск программы, «Стоп» – останов программы, «Default» – сброс настроек на первоначальные, «Заккрыть» – выход из программы.

В программном комплексе выводятся следующие графики: напряжение фазы с углом управления, переходные процессы скорости, оценка момента, зависимость угла управления от времени.

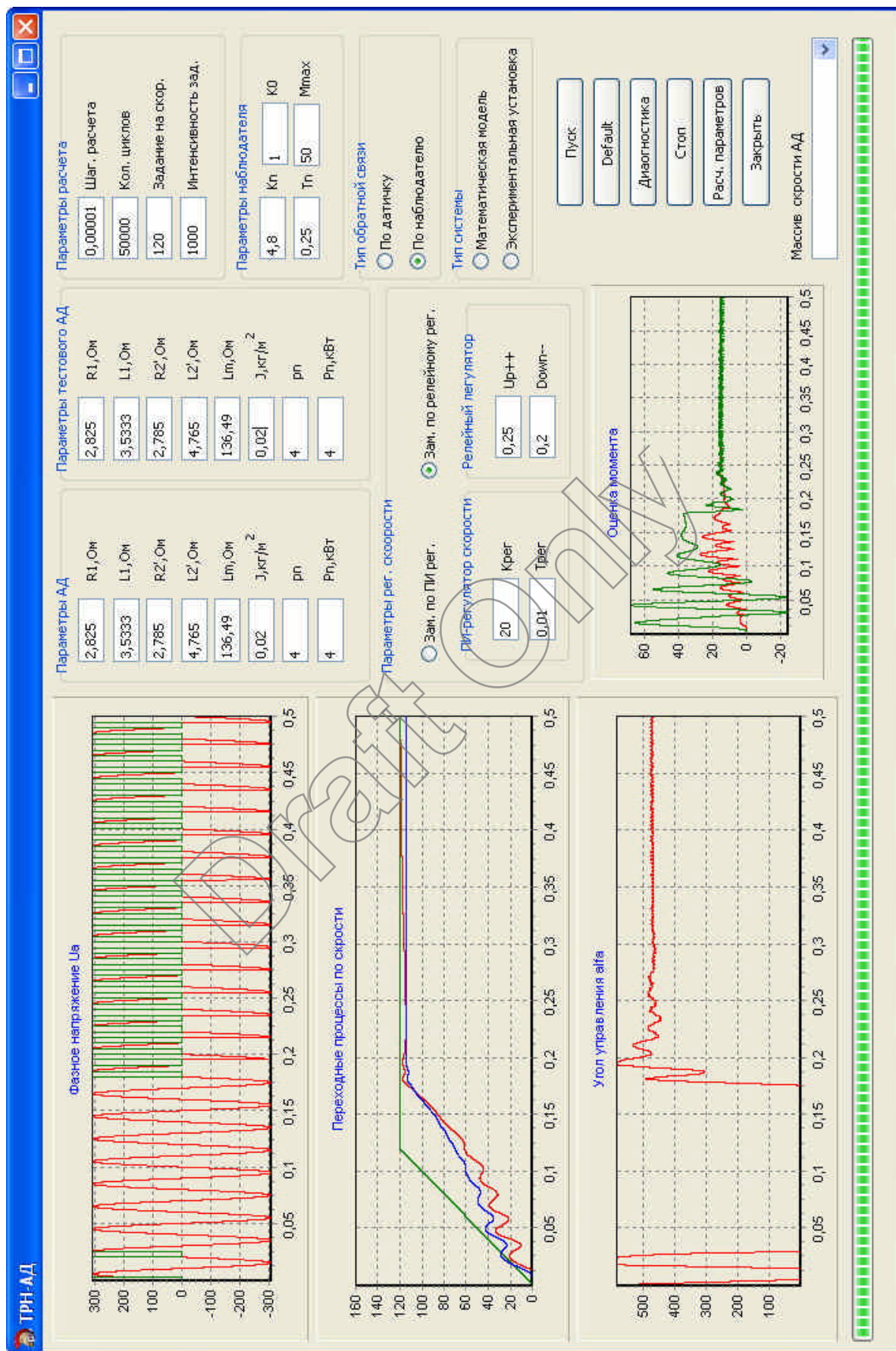


Рис.4.4. Программный комплекс

4.3. Исследование статики электропривода ТРН-АД в составе экспериментальной установки

4.3.1. Работа электропривода ТРН-АД на холостом ходу

Для получения основных характеристик и зависимостей ТРН была проведена серия опытов на холостом ходу в статическом режиме. На рис. 4.5 представлены осциллограммы напряжений, а на рис. 4.6 осциллограммы токов при минимальном угле управления и $\alpha = 70^\circ$.

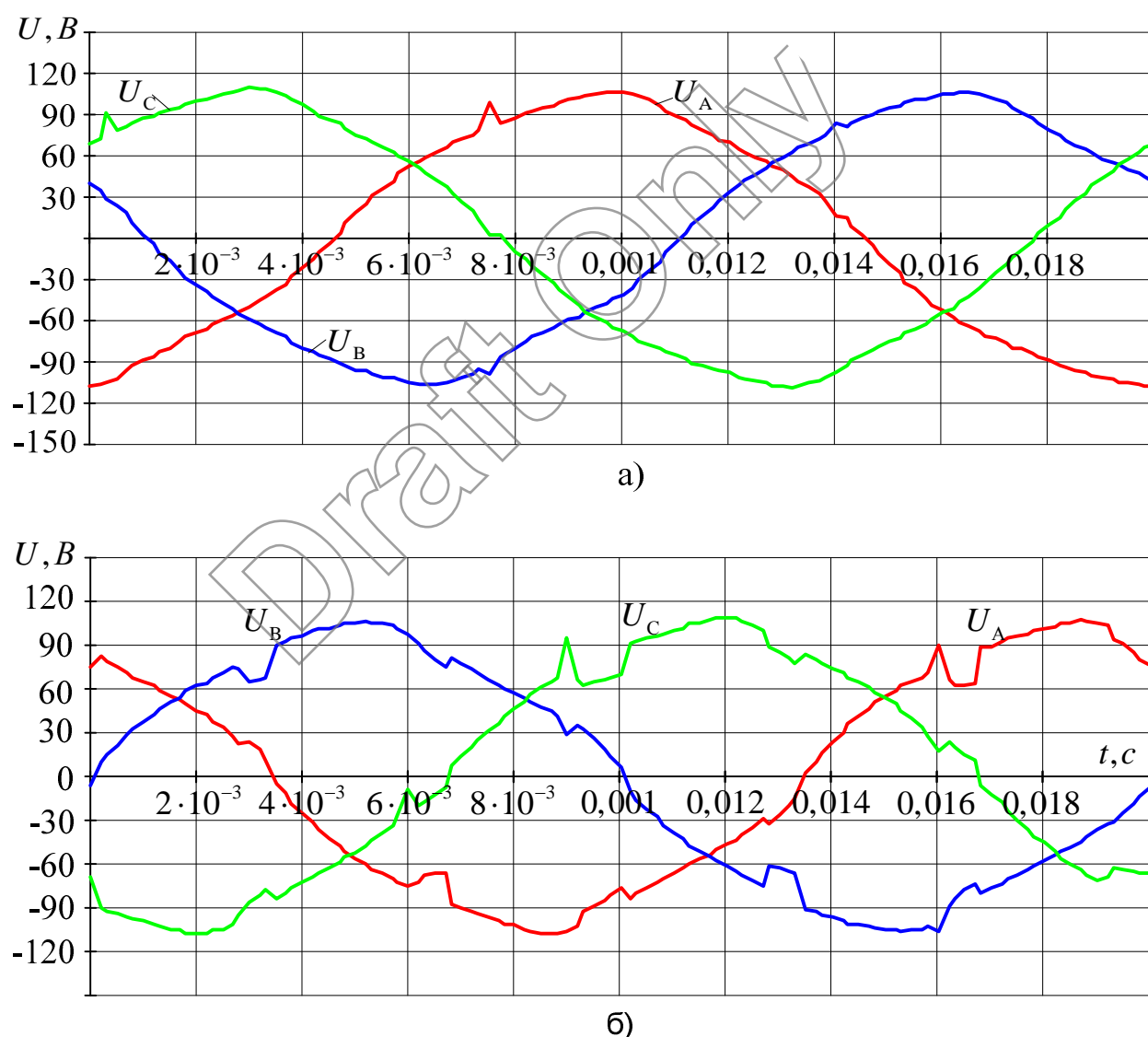


Рис. 4.5. Осциллограммы статорных напряжений ТРН-АД при углах управления: а) α_{\min} ; б) $\alpha = 70^\circ$

Выходные напряжения ТРН не имеют чисто синусоидальный характер даже при минимальном угле задания (рис.4.5). Чем больше угол задания в электроприводе ТРН-АД, тем наиболее ярко выражена токовая пауза в осциллограммах тока (рис. 4.6).

В отличие от активно-индуктивной нагрузки, в АД есть магнитная связь между обмотками фаз ротора и статора, на которую непосредственно влияет также скорость, поэтому при изменении угла управления электродвижущая сила может существенно изменять форму фазового напряжения.

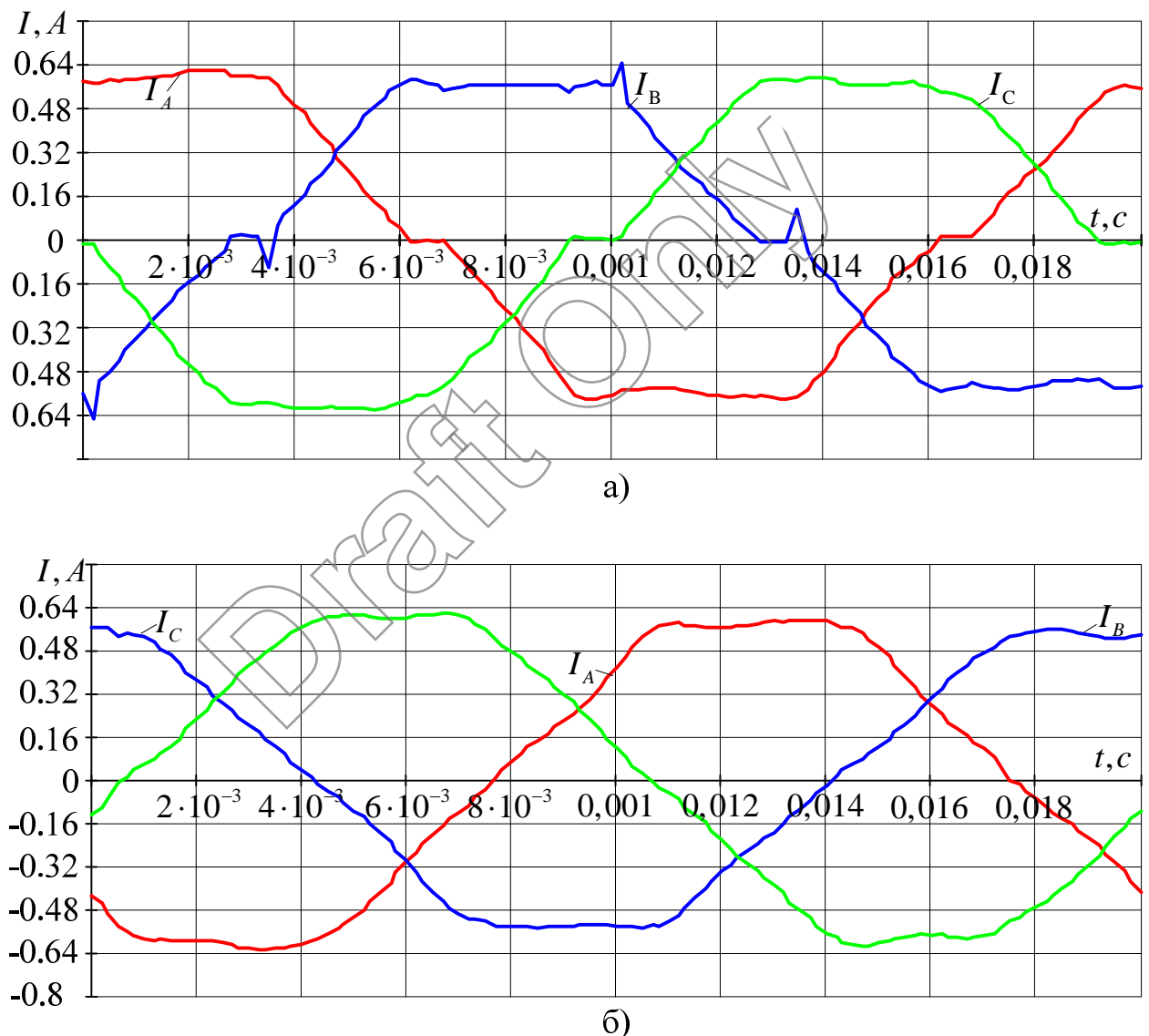


Рис. 4.6. Осциллограммы статорных токов ТРН-АД при углах управления:

а) α_{\min} ; б) $\alpha = 70^\circ$

Ввиду большой индуктивной нагрузки, минимальный угол управления, при котором появляются характерные участки (токовая пауза) для ТРН в осциллограммах тока и напряжения составляет 65-70 град.

При угле управления, равным 85-87°, электромагнитный момент двигателя становится меньше момента холостого хода, и двигатель начинает тормозиться до полного останова.

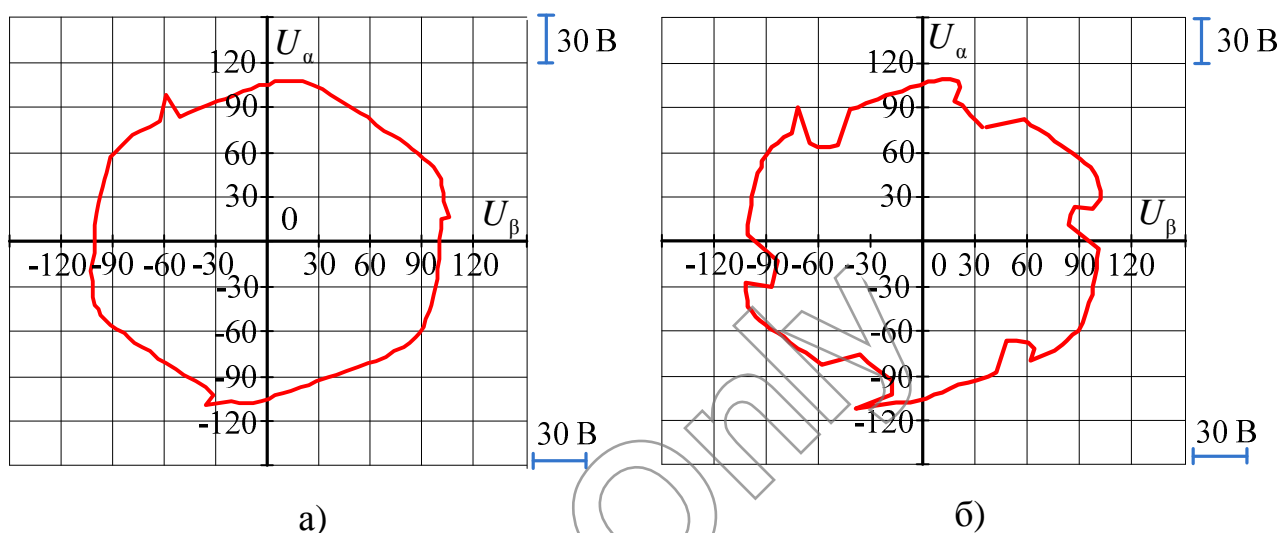


Рис. 4.7. Осциллограммы вектора напряжения электропривода ТРН-АД в проекциях неподвижной системы координат при углах управления:

а) α_{\min} ; б) $\alpha = 70^\circ$

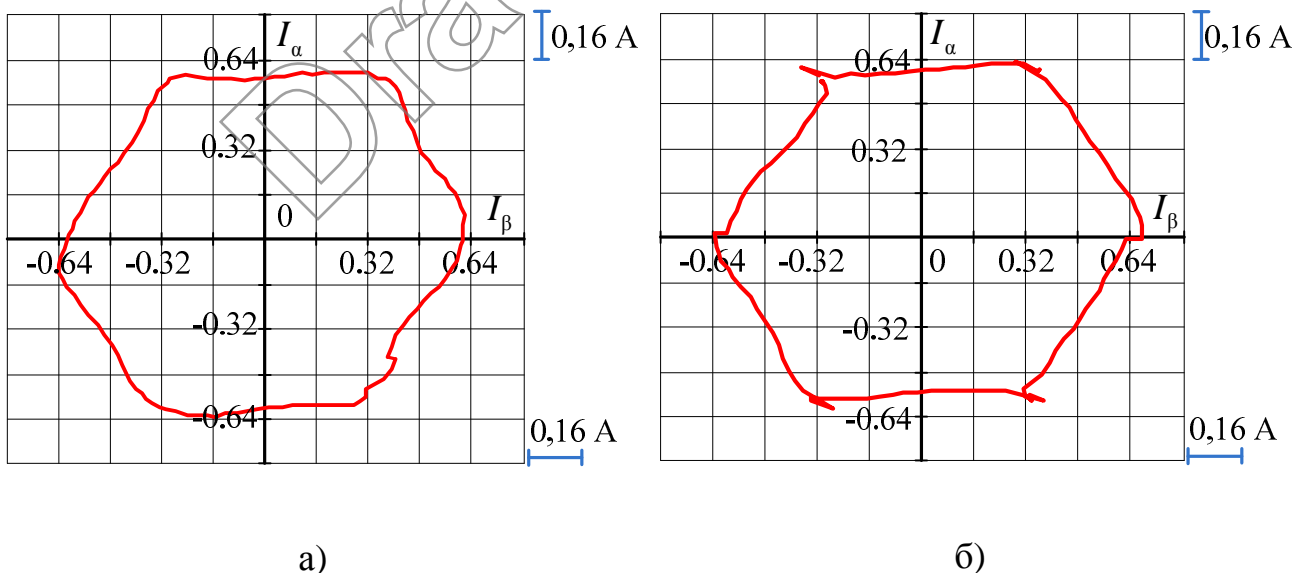


Рис. 4.8. Осциллограммы вектора результирующего модуля тока в проекциях неподвижной системы координат при углах управления: а) α_{\min} ; б) $\alpha = 70^\circ$

Рис. 4.8 а) отчетливо показывает, что при работе даже на минимальном угле управления, напряжения, подаваемые на обмотки АД, имеют несинусоидальный характер, так как вектор напряжения не описывает правильную окружность. При увеличении угла управления в электроприводе форма фазных напряжений дополнительно изменяется, что в свою очередь сказывается и на векторе напряжения (рис. 4.8 б)).

Для более точной оценки изменения результирующего модуля тока и вектора напряжения были введены следующие выражения:

$$S_U = \sum_{n=t_1}^{t_2} \frac{2}{3} \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}, \quad S_i = \sum_{n=t_1}^{t_2} \frac{2}{3} \sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2}, \quad (4.1)$$

где U_α, U_β – напряжения, переведенные в двухфазную систему координат, I_α, I_β – токи в двухфазную систему координат, $t_1 \dots t_2$ – интервал времени равный одному периоду.

В табл. 4.6 показано, что с ростом угла управления α действующее напряжение U_d , подаваемое на обмотки АД, и коэффициент S_U уменьшаются, действующий ток I_d и коэффициентом S_i увеличиваются, что показывает изменение площадей, описываемых векторами тока и напряжения

Таблица 4.6. Характерные величины токов и напряжений, скорости в зависимости от угла управления.

α , град	Напряжения		Токи		$\omega_{дв}$, рад/с
	S_U , В	U_d , В	S_i , А	I_d , А	
0	$1,26 \cdot 10^4$	74,3	73,78	0,412	140
20	$1,258 \cdot 10^4$	73,8	74,315	0,413	136,3
40	$1,257 \cdot 10^4$	73,5	75,315	0,415	135,1
60	$1,256 \cdot 10^4$	73,3	76,075	0,422	134,5
70	$1,219 \cdot 10^4$	71,5	77,632	0,425	130,2
80	$1,11 \cdot 10^4$	63,4	78,084	0,43	125,7
87	$8,2 \cdot 10^3$	48,5	79,032	0,48	68,1

4.3.2. Работа электропривода ТРН-АД под нагрузкой

Ввиду того, что при изменении питающего напряжения развиваемый АД момент уменьшается, то было проведено исследование с постоянной нагрузкой в виде ДПТ НВ.

Из рис. 4.9 и рис. 4.10 видно, что формы фазных токов и напряжений АД значительно отличаются от осциллограмм, рассмотренных в предыдущем параграфе. При работе под нагрузкой электропривода ТРН-АД, искажения напряжений и токов, вызванные ЭДС АД, становятся более ярко выраженными.

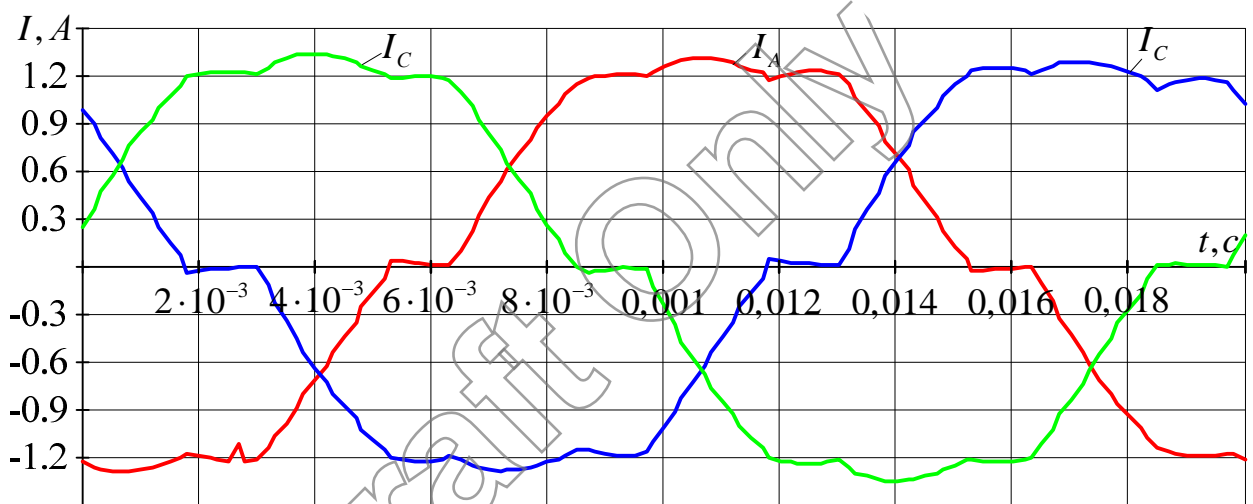


Рис. 4.9. Осциллограммы статорных токов при угле задания $\alpha = 60^\circ$

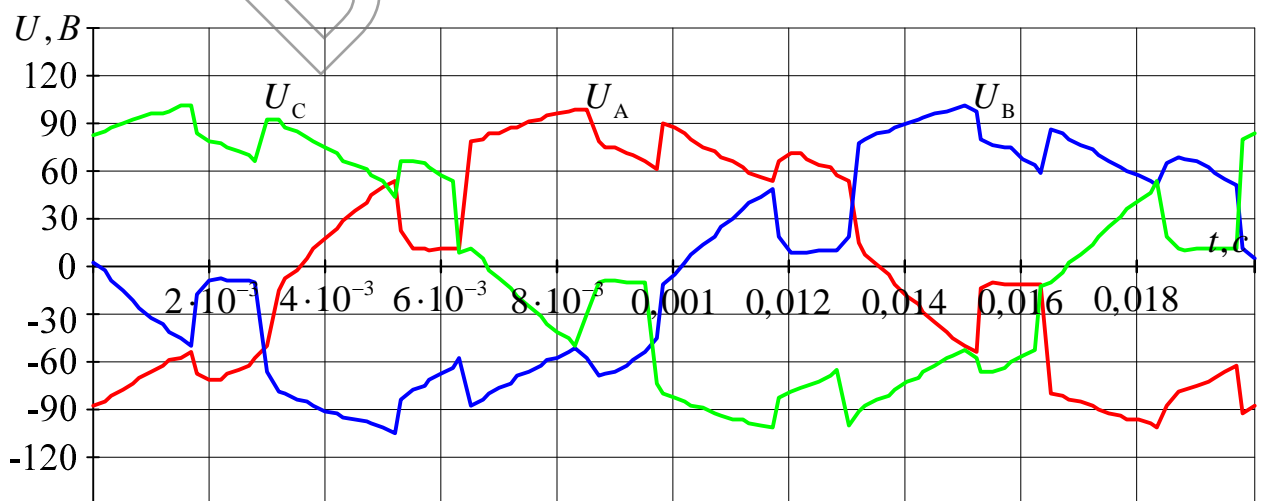


Рис. 4.10. Осциллограммы статорных напряжений при угле задания $\alpha = 60^\circ$

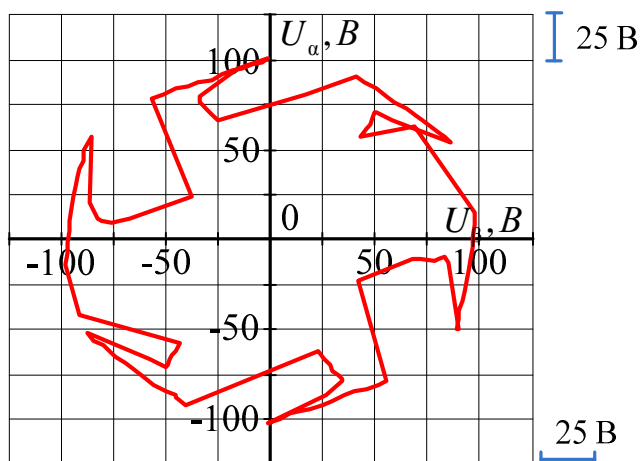


Рис. 4.11. Вектор напряжения
при $\alpha = 60^\circ$

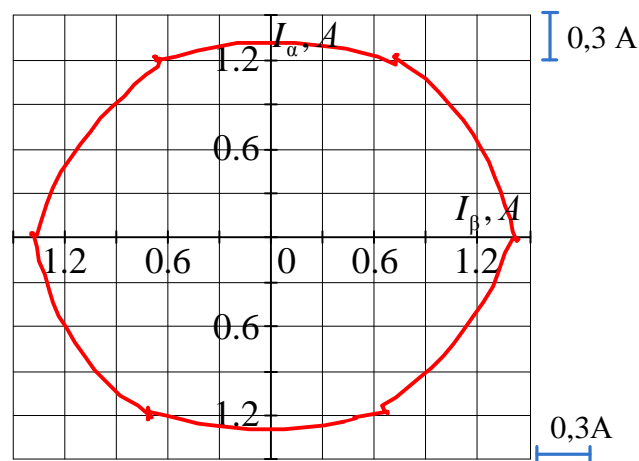


Рис. 4.12. Вектор тока
при $\alpha = 60^\circ$

При работе под нагрузкой электропривода ТРН-АД появляются характерные черты для данного типа управления в осциллограммах статорных токов и статорных напряжений.

Искажения статорных напряжений имеют строгую определенную периодичность, что показывает вектор напряжения рис. 4.11. Токи, протекающие в обмотках двигателя, также имеют несинусоидальный характер, что не так ярко выражено как в осциллограммах напряжений, но также заметно (рис. 4.12).

В табл. 4.7 представлены основные показатели статики электропривода ТРН-АД при работе под нагрузкой.

Таблица 4.7

α , град	Напряжения		Токи		$\omega_{\text{дв}}$, рад/с
	S_U	$U_{\text{д}}$		$I_{\text{д}}$	
0	$1,212 \cdot 10^4$	71,9	138,07	0,75	89,01
20	$1,21 \cdot 10^4$	71,4	139,186	0,755	87,97
40	$1,198 \cdot 10^4$	71,1	148,091	0,77	84,82
50	$1,152 \cdot 10^4$	68,2	156,6	0,815	81,0
55	$1,131 \cdot 10^4$	65,6	160,1	0,875	3,7
60	$1,1 \cdot 10^4$	64	163,7	0,9	2,1
65	$8,28 \cdot 10^3$	62,7	175,5	0,92	0,5

С увеличением угла управления α напряжение U_d , подаваемое на обмотки АД, намного быстрее уменьшается, чем при работе на холостом ходу (табл. 4.7), что подтверждает также коэффициент S_U , а ток I_d наоборот значительно увеличивается вместе с коэффициентом S_i .

При регулировании угла α в диапазоне от 0 до 50 град изменение скорости крайне мало, но при дальнейшем увеличении угла α наблюдается резкий спад скорости на валу двигателя.

4.4. Идентификация параметров схемы замещения асинхронной машины экспериментальной установки с помощью генетических алгоритмов

Для первоначальной настройки наблюдателя необходимы параметры схемы замещения асинхронной машины. С имеющимися параметрами схемы замещения АД невозможно произвести синтез наблюдателя угловой скорости, так как они в силу различных причин не соответствуют действительности. Поэтому для получения необходимых параметров АД был использован разработанный алгоритм идентификации на основе ГА.

Алгоритм идентификации параметров следующий:

1. Вначале снимаются массивы данных токов I_A, I_B, I_C и напряжений U_A, U_B, U_C с каждой фазы, скорость I_R на валу двигателя.
2. Вычисляется результирующий модуль тока I_R , трехфазные напряжения U_A, U_B, U_C переводятся в двухфазную систему U_α, U_β .
3. Производится очистка сигналов $I_R, \omega_{дв}$ от шумов.
4. Очищенные сигналы $I_R, \omega_{дв}$ и U_α, U_β пересохраняются в формате structure with time.
5. После этого итоговые данные загружаются в модель modga_8a.mdl.

6. Затем производится настройка генетических алгоритмов с помощью файлов; fga.m – алгоритм идентификации par.m – начальные параметры модели fl.m – функция задания входных и выходных переменных; modga_08a.mdl – структура имитационной модели для идентификации параметров АД (рис. 4.13)

7. Осуществляется запуск генетических алгоритмов с помощью файла fga.m

Очистка сигналов производилась с помощью вейвлет функций, встроенных в Matlab. В качестве базисной функции для вейвлет-преобразования используется вейвлет Хаара. В основу вейвлетов положена аппроксимация с помощью кратномасштабного анализа. Суть этого анализа заключается в разложении сигнала на ортогональные $S_j(t)$ и $D_j(t)$ сигнальные компоненты в различных масштабах j . Полученные вейвлет-коэффициенты разделяются на низкочастотные (грубые) и высокочастотные (детализирующие) составляющие.

Затем устанавливаются необходимые параметры в окне GUI WAVEMENU, после чего зашумленный сигнал раскладывается на вейвлеты и затем осуществляется обратное преобразование [107,108]. Очищать сигналы $I_R, \omega_{дв}$ необходимо для повышения точности идентифицируемых параметров АД.

Очистка от высокочастотных импульсных помех для напряжений U_α, U_β не производилась, в виду их малой зашумленности.

Идентификация параметров АД производилась в Matlab/Simulink с применением встроенной библиотеки генетических алгоритмов и структурной схемы рис 4.13.

Основными настроечными коэффициентами генетических алгоритмов являются: минимальная ошибка, при достижении которой происходит окончание идентификации, количество особей, диапазон значений, в которых будет производиться поиск параметров АД.

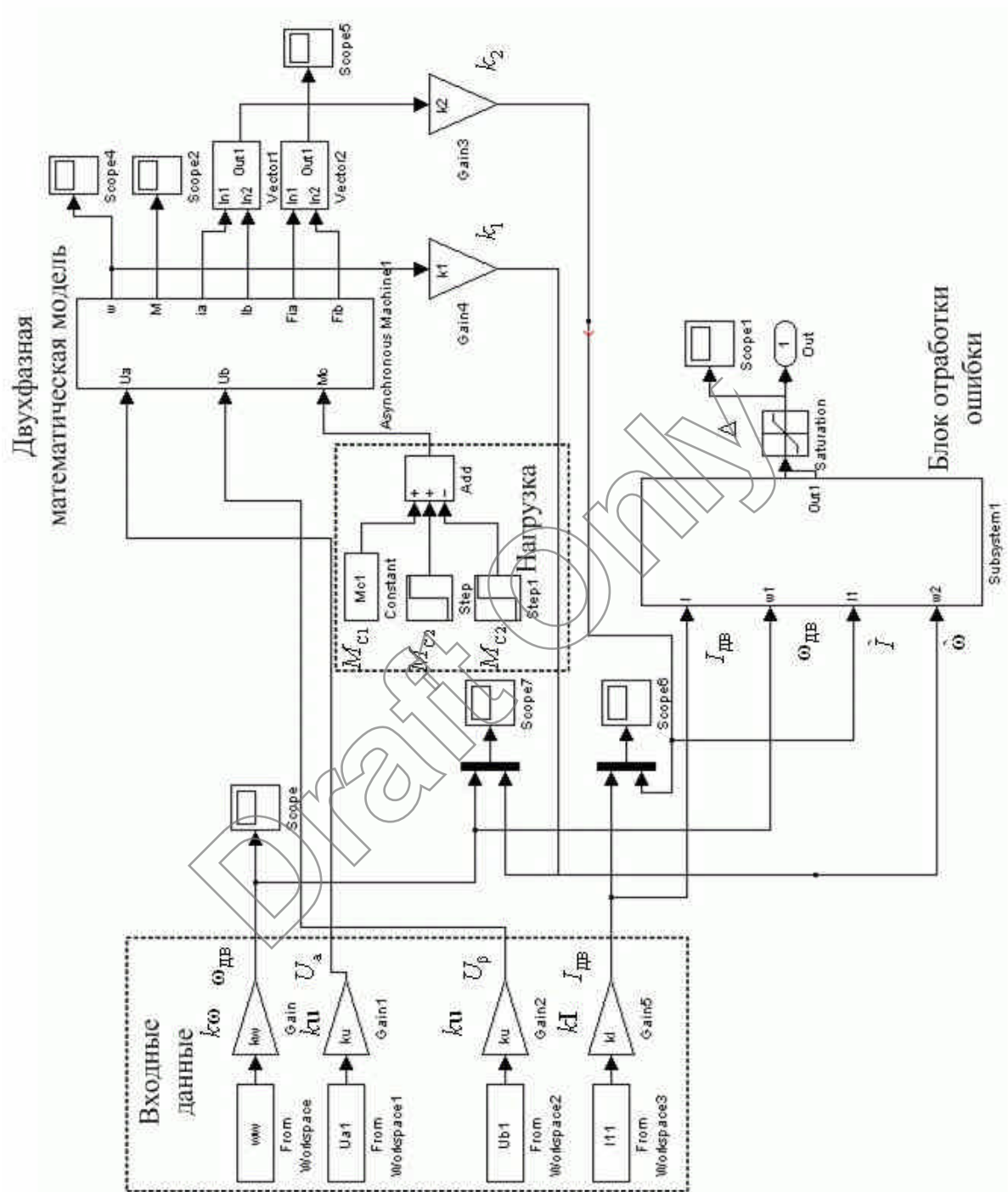


Рис. 4.13. Имитационная модель modga_8a.mdl для идентификации параметров АД

После окончания идентификации были получены следующие параметры схемы замещения АД, которые представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8. Параметры схемы замещения АД, полученные в результате идентификации

Параметр	R_s , Ом	R_r , Ом	L_s , Гн	L_r , Гн
Минимальное значение	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Максимальное значение	100	100	2	2
Оценка	46,086	45,699	1,106	0,929
Параметр	L_m , Гн	J_Σ , кг·м ²	M_{c1} , Нм	M_{c2} , Нм
Минимальное значение	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Максимальное значение	2	0,1	10	10
Оценка	0,924	0,0045	0,11	0,34

Адекватность полученных данных была подтверждена с помощью графиков абсолютных ошибок по скорости рис. 4.15 и току рис. 4.16. Из рис. 4.14 видно, что кривые результирующих токов, а также скорости, практически полностью совпадают, что говорит о удачной идентификации.

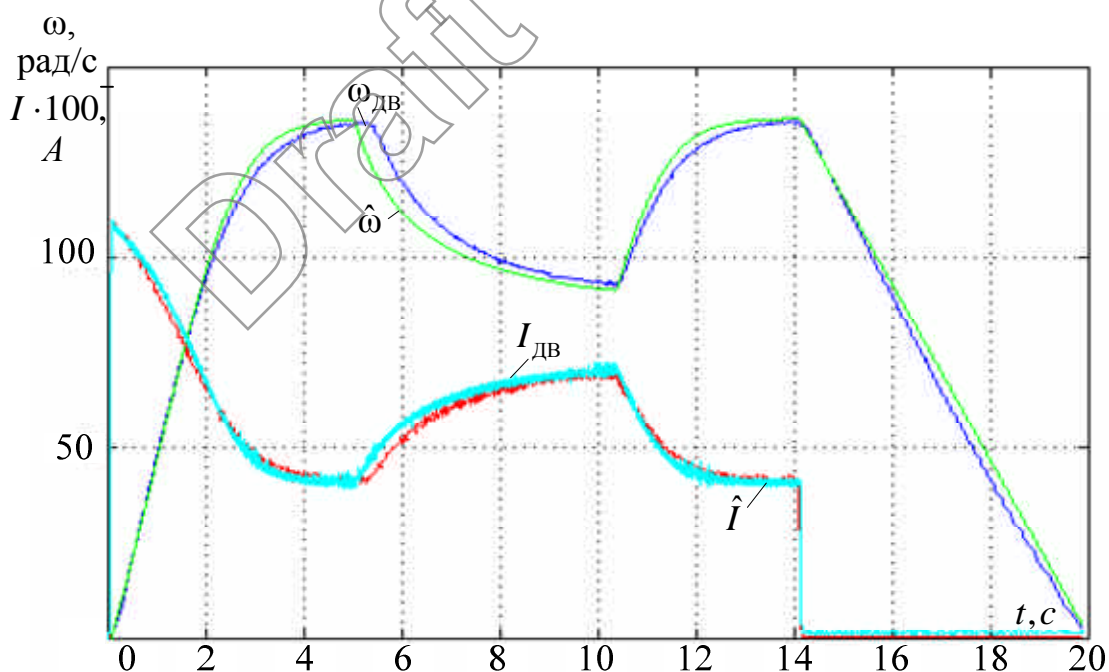


Рис. 4.14. Переходные процессы скорости и тока

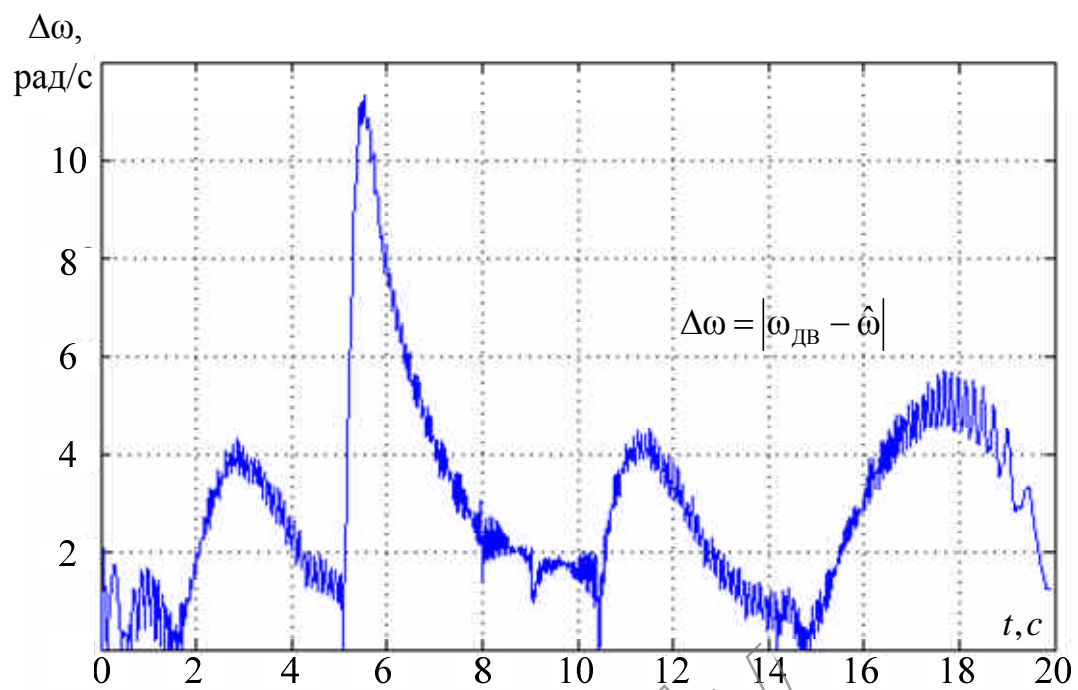


Рис. 4.15. Абсолютная ошибка по скорости

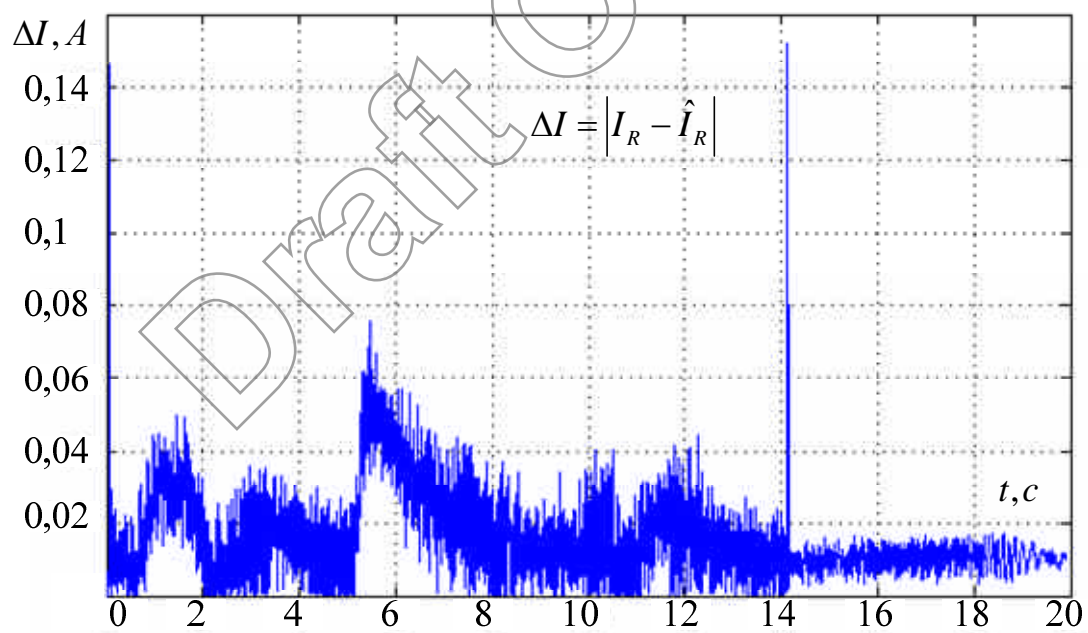


Рис. 4.16. Абсолютная ошибка по току

С применением модифицированных схем обработки ошибки для ГА, где алгоритм сходится не к одному критерию, а по нескольким, повышается точность результатов, а также уменьшаются временные затраты.

4.5. Проверка работоспособности модифицированного наблюдателя скорости для разомкнутой системы ТРН-АД на экспериментальной установке

Для подтверждения работы разработанного метода оценки скорости для электроприводов, выполненных по схеме ТРН-АД, использованы ранее полученные экспериментальные данные. После предварительной обработки данные сохранены и занесены в модель Matlab Simulink в виде массивов. В состав ее входит двухфазная модель асинхронного двигателя, блок отработки невязки по току и блоки, в которые занесены экспериментальные данные. Исследования проводились с шагом дискретизации 0,001 с. Настройка наблюдателя осуществлялась с помощью ранее полученной базы данных в виде ИНС. Были получены следующие данные: $K_{\text{РЕГ}} = 4,2 \text{ Нм/А}$, $T_{\text{РЕГ}} = 16,6 \text{ с}$.

В табл. 4.9 представлены основные показатели для наблюдателя угловой скорости.

Таблица 4.9

α , град	ΔI_{max} , А	$\Delta \omega_{\text{max}}$, рад/с	$\Delta \omega_{\text{ПР}}$, рад/с	$\Delta \omega_{\text{ХХ}}$, рад/с	$\Delta \omega$, о.е.	ΔI , о.е.
α_{min}	0,03	8	2,1	1,8	73,26	120
40	0,044	9,5	4,8	2,1	105,5	153,4
60	0,055	12	9,5	2	401,5	350,4

Максимальная ошибка по скорости $\Delta \omega_{\text{max}}$ у модифицированного наблюдателя наблюдается при работе на низких скоростях и под нагрузкой, которая составляет 8-12 рад/с. При работе на минимальном угле задания

максимальная ошибка по скорости $\Delta\omega_{\max}$ составляет 6-8 рад/с, где просадка по скорости $\Delta\omega_{\text{пр}}$ при увеличении нагрузки составляет 2,5 рад/с.

Максимальная ошибка по скорости $\Delta\omega_{\max}$ не зависит от угла управления и наблюдается в момент переходных процессов, т.е. при пуске или торможении.

Погрешность оценки скорости колеблется от 2% до 8% в зависимости от текущей нагрузки на валу двигателя и угла задания.

При работе на небольших углах управления ошибка по скорости в статике не превышает 3%, что подтверждают переходные процессы на рис 4.17.

Из ранее полученных с помощью ГА данных, а именно, момента нагрузки $M_{c2} = 0,34$ Нм и момента нагрузки холостого хода $M_{c1} = 0,1$ Нм, было установлено, что оценка момента нагрузки наблюдателем осуществляется корректно (рис.4.18).

При увеличении угла управления ошибка оценки скорости увеличивается и чем ниже скорость АД, тем выше ее величина (рис. 4.23). Помимо этого, при работе на низких скоростях наблюдаются небольшие автоколебания в оценке скорости (рис 4.21). Основной причиной этого являются колебания в оценке момента нагрузки (рис. 4.22), вызванные тем, что при работе на низких скоростях неточности двухфазной математической модели от принятых допущений АД проявляются наиболее ярко. Ввиду того, что большую часть времени системы ТРН-АД работают на скоростях близких к номинальным, то это не критично.

Значения интегральных ошибок определялись по следующему выражению:

$$\Delta I = \int_0^{t_1} \frac{|I_R - \hat{I}_R|}{I_R} dt, \quad \Delta\omega = \int_0^{t_1} \frac{|\omega_{\text{ДВ}} - \hat{\omega}|}{\omega_{\text{ДВ}}} dt, \quad (3.24)$$

где I_R, \hat{I}_R – результирующий модуль тока двигателя и его оценка;

$\omega_{\text{ДВ}}, \hat{\omega}$ – угловая скорость двигателя и его оценка.

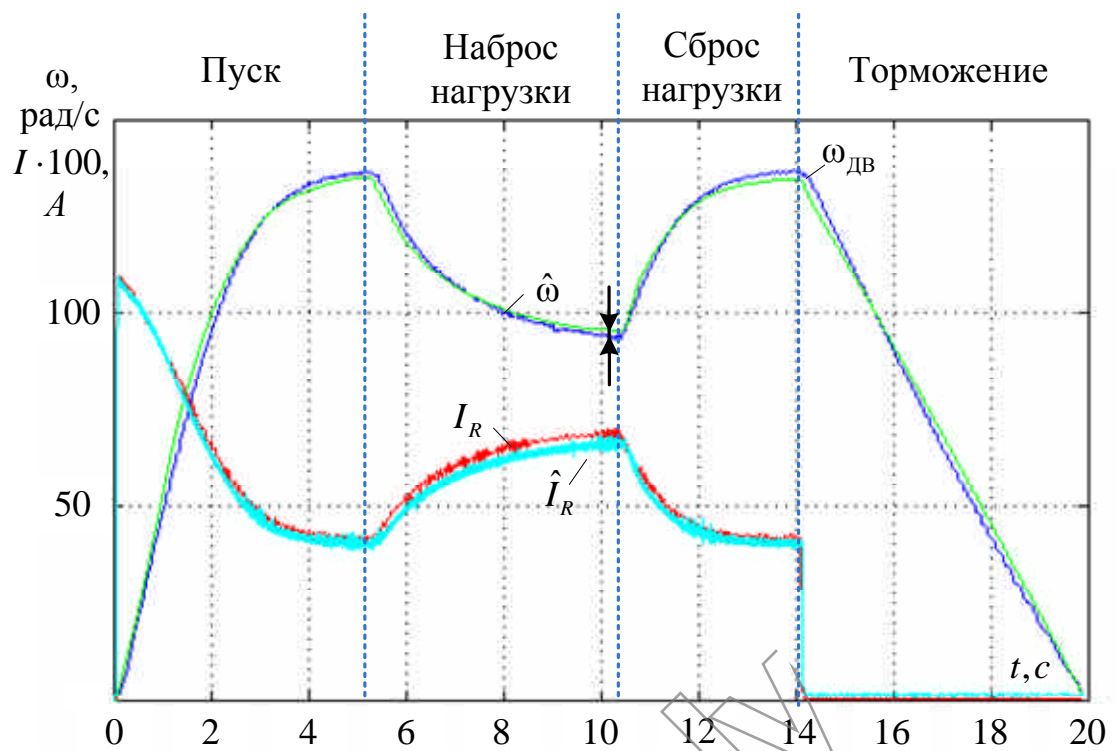


Рис. 4.17. Переходные процессы по скорости и току при α_{\min}

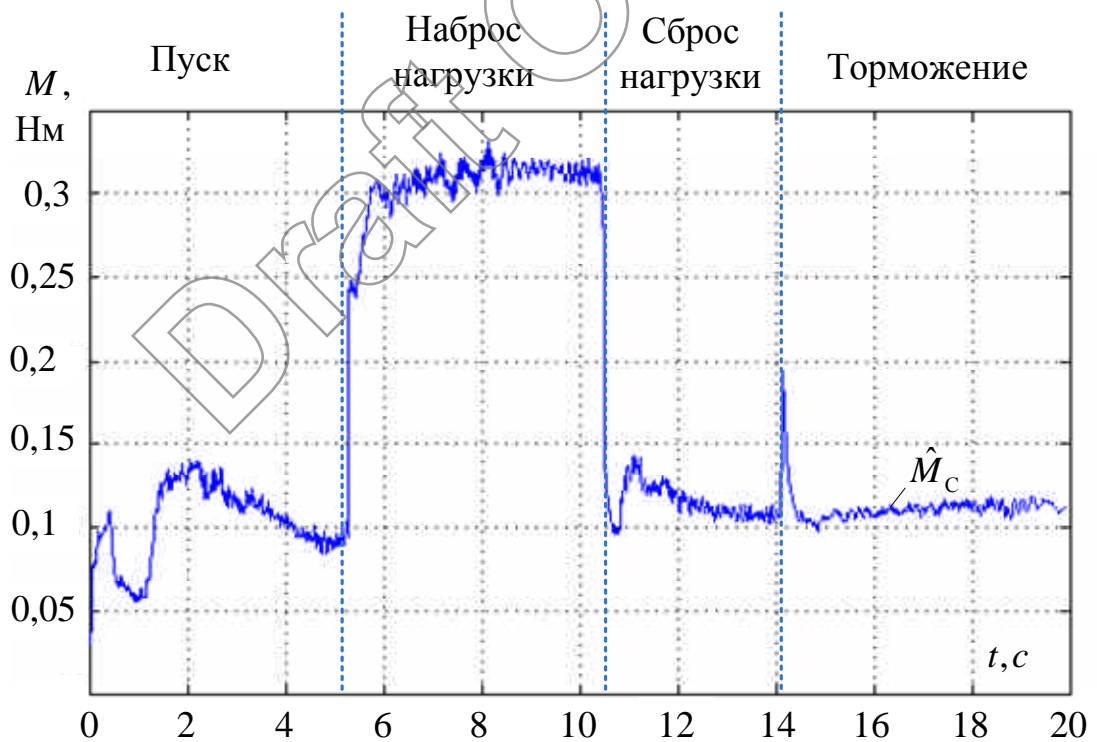


Рис. 4.18. Переходный процесс оценки момента нагрузки α_{\min}

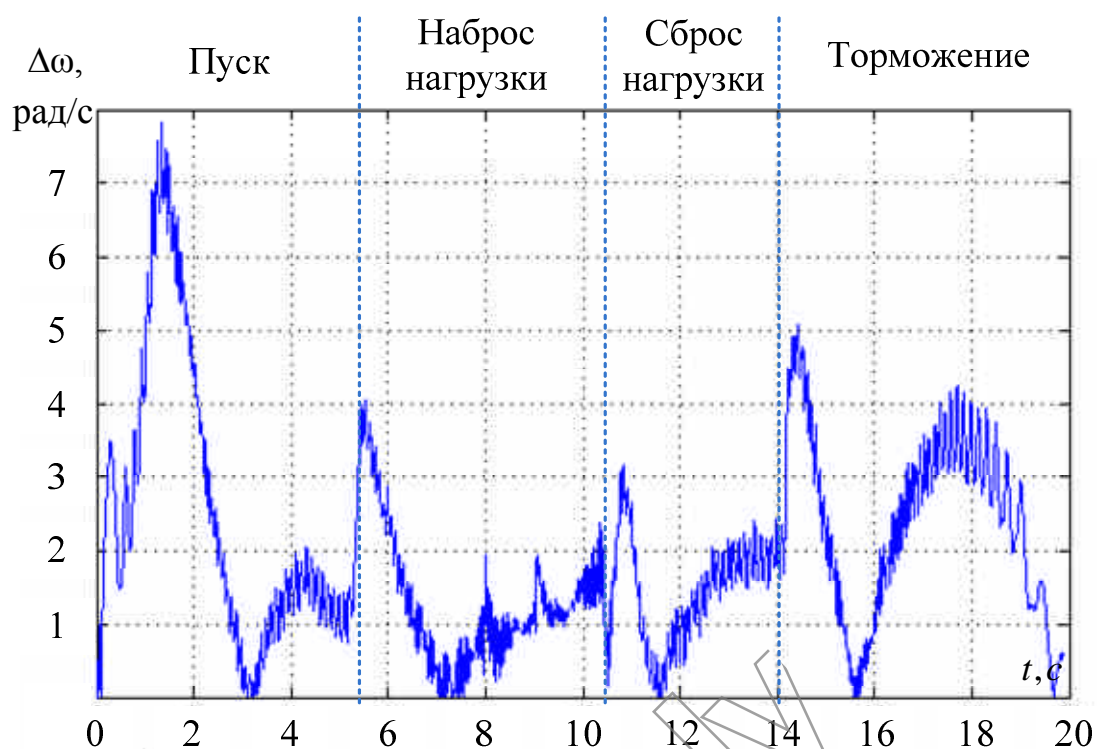


Рис. 4.19. Абсолютная ошибка по скорости при α_{\min}

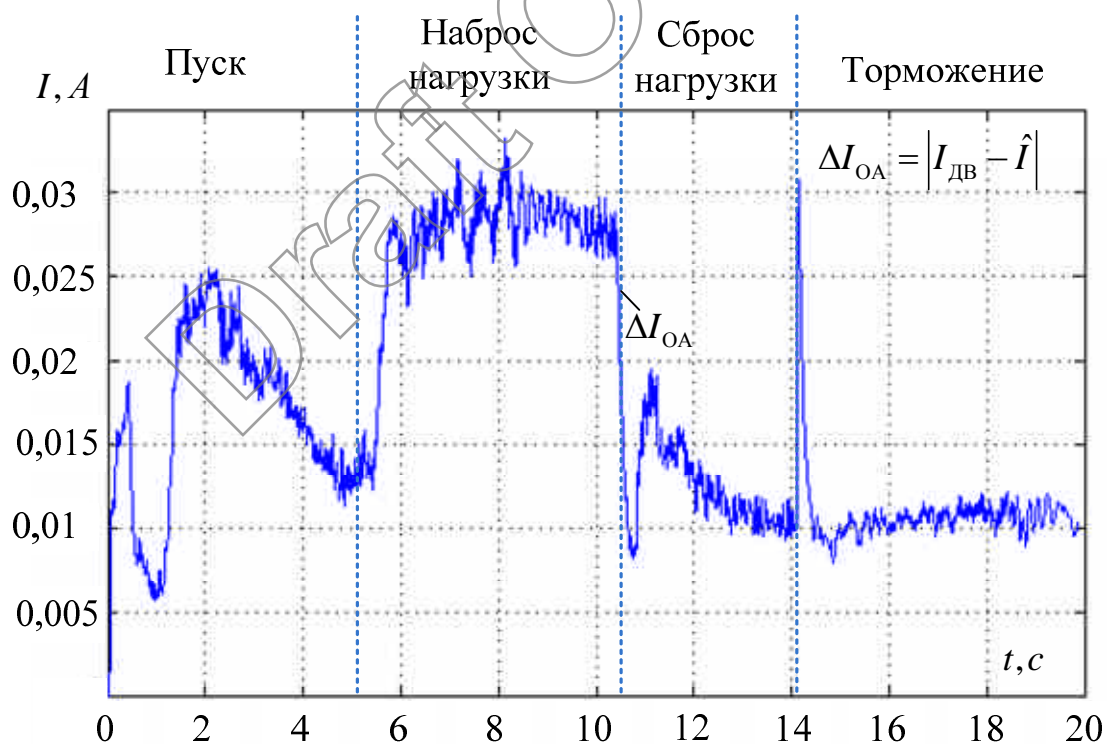


Рис. 4.20. Абсолютная ошибка по току при α_{\min}

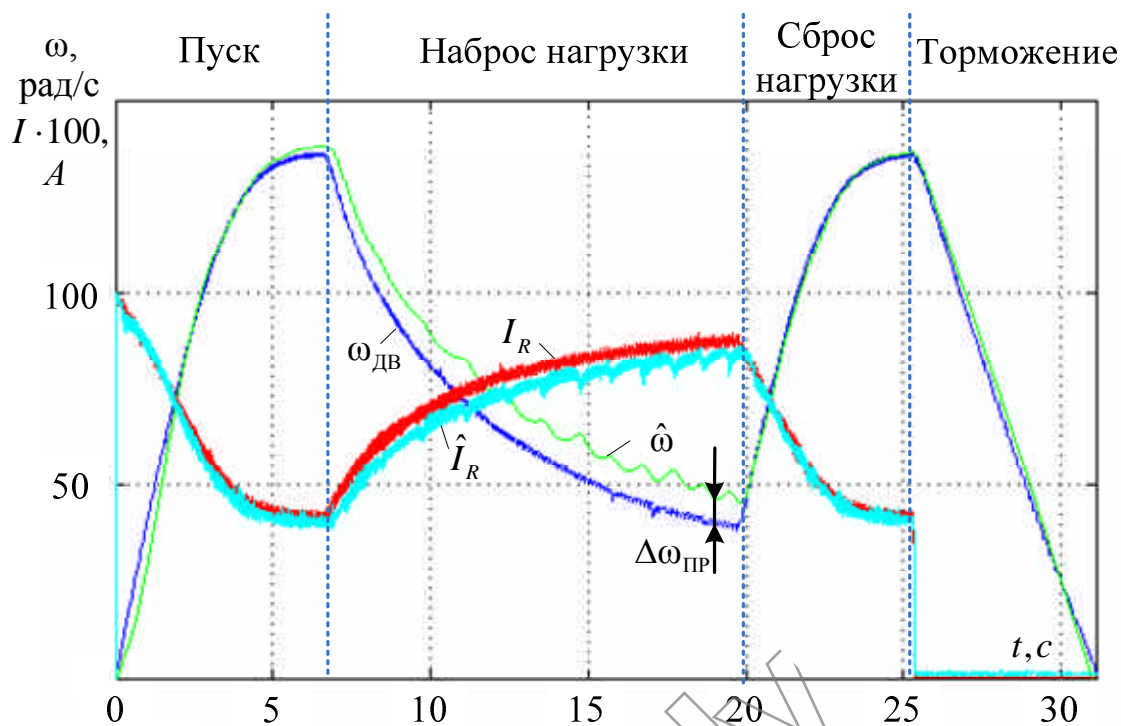


Рис. 4.21. Переходные процессы по скорости и результирующему модулю тока при $\alpha=60^\circ$

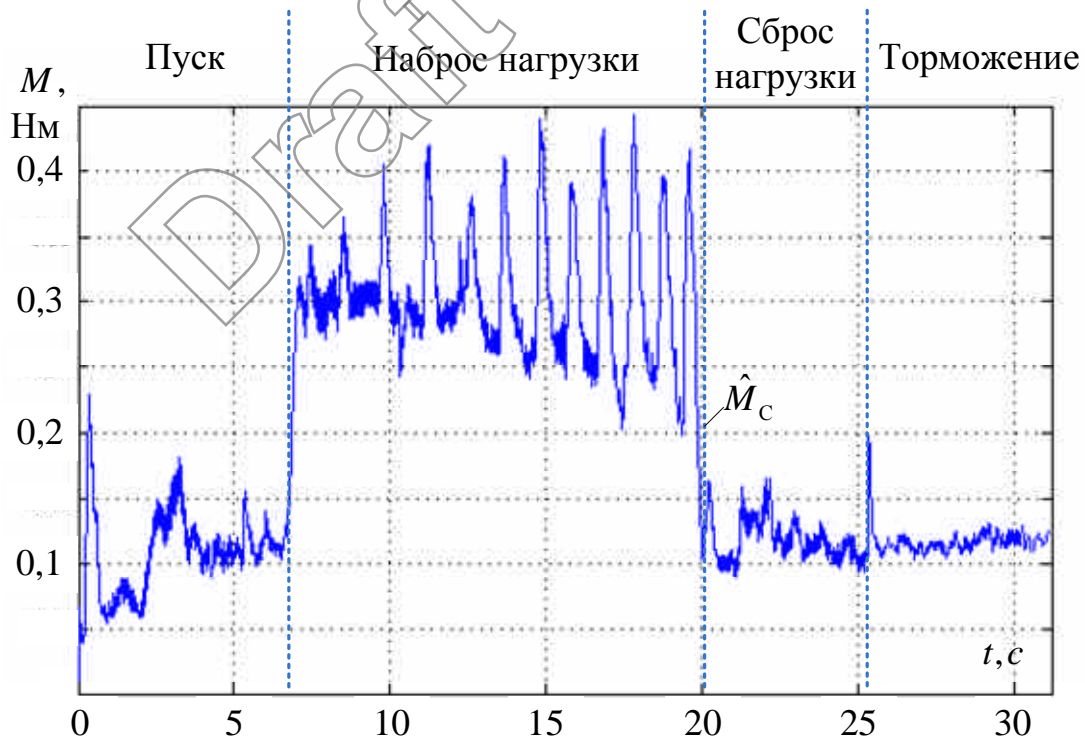


Рис. 4.22. Переходный процесс оценки момента нагрузки при $\alpha=60^\circ$

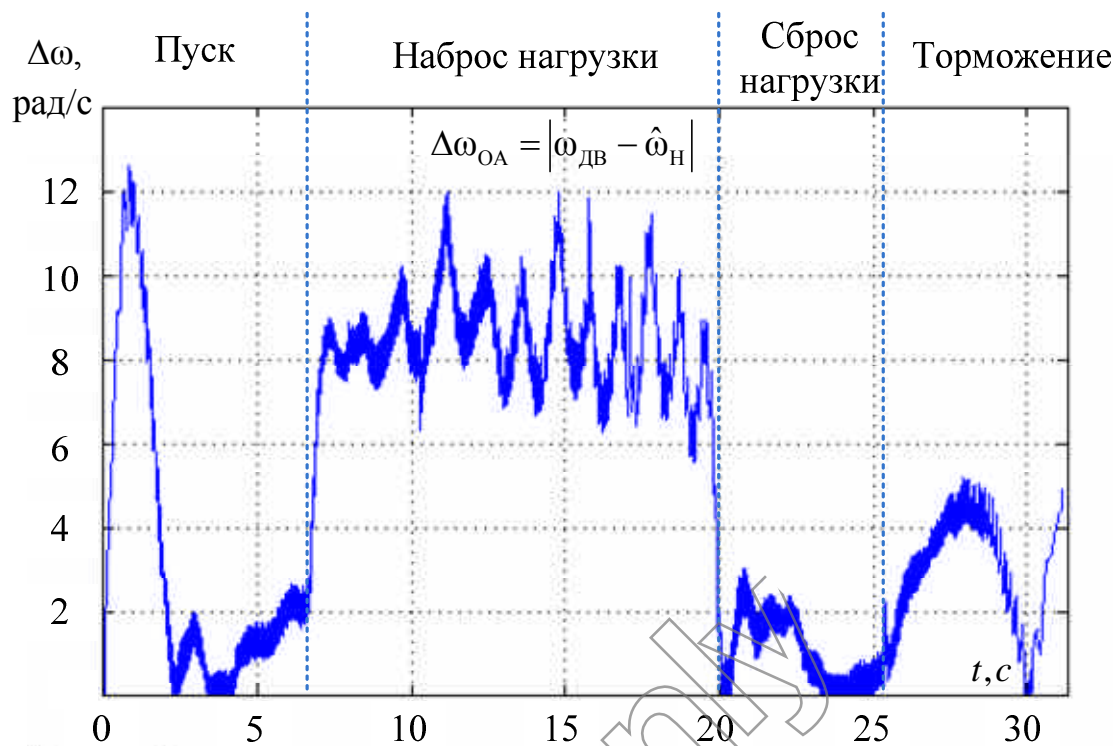


Рис. 4.23. Абсолютная ошибка по скорости при $\alpha=60^\circ$



Рис. 4.24. Абсолютная ошибка по току при $\alpha=60^\circ$

Искаженное напряжение, подаваемое на двухфазную модель асинхронного двигателя, не влияет на работоспособность разработанного наблюдателя угловой скорости электропривода ТРН-АД. Наблюдатель производит оценку скорости с приемлемой точностью, что позволяет повысить качество пуска, обеспечить заданный темп разгона. Повысить эффективность работы наблюдателя можно за счет более лучшей идентификации параметров схемы замещения АД с помощью ГА.

4.6. Выводы по четвертой главе

1. При работе под нагрузкой электропривода ТРН-АД наблюдается наиболее явное искажение напряжений, подаваемых на статорные обмотки электродвигателя.
2. Результаты, полученные экспериментальным способом на основе экспериментальной установки, подтверждают адекватность разработанной имитационной модели электропривода ТРН-АД.
3. Определены параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя экспериментальной установки с помощью генетических алгоритмов. Установлено, что при увеличении скорости сходимости генетических алгоритмов необходимо предварительно обрабатывать входные данные на основе разработанной методики вейвлет фильтрации.
4. При экспериментальном исследовании наблюдателя угловой скорости было выявлено, то при работе на низких скоростях в оценке скорости появляются небольшие автоколебания. Наибольшая погрешность наблюдателя наблюдается в момент пуска и торможения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

В результате исследований и проведенного анализа было установлено, что асинхронные электроприводы занимают лидирующие позиции. Системы с частотным управлением обладают широкими возможностями, но в тоже время являются достаточно дорогими и сложными в обслуживании. Электроприводы ТРН-АД позволяют не только осуществлять плавный пуск, но и регулирование скорости в небольшом диапазоне. При работе на вентиляторной или насосной нагрузке экономически выгодно использовать ТРН-АД, ввиду меньшего энергопотребления.

Разработана математическая модель, которая позволяет учесть несинусоидальные участки напряжения при изменении угла. Для полноценного моделирования используется трехфазная модель асинхронной машины. Алгоритм управления СИФУ в виде программного кода является простым и эффективным решением для моделирования процессов в системе ТРН-АД.

Предложена структура наблюдателя для оценки скорости электропривода, выполненного по схеме ТРН-АД, позволяющая определять оценку скорости с учетом текущей нагрузки на валу двигателя.

Разработано программное обеспечение для исследования и моделирования характеристик электропривода ТРН-АД с интуитивно понятным интерфейсом.

Проведена апробация и исследование разработанного наблюдателя угловой скорости на лабораторной установке ТРН-АД. Несмотря на значительную несинусоидальность статорного напряжения, вызванного работой тиристорного регулятора, модифицированный наблюдатель скорости показал приемлемые результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкрац Ю.В. Структуры и алгоритмы следящее-регулируемого электропривода с заданной динамической точностью. Дисс. ... канд. техн. наук. НСК., 2011. – 188 с.
2. Автоматизированный электропривод промышленных установок: Учеб. Пособие / Под ред. Г.Б. Онищенко. – М, 2001. – 520 с.
3. Альтшуллер М. И. Шамис М. И. Устройство безударного плавного пуска высоковольтных двигателей // Новости электротехники. 2002. – № 4. – С. 42-43.
4. Электропривод: справочник / Кисаримов Р.А. – М.: РадиоСофт, 2012. – 352 с.
5. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: Учеб пособие для студ. образоват. учреждений проф. образования .: М Академия, 2005. – 480 с.
6. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.
7. Каширских В.Г., Переверзев С.С., Сравнительный анализ способов плавного пуска асинхронных электроприводов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. – № 10. – С. 308-311.
8. Пат. № 2235410 РФ МПК Н 02 З 1/26 Способ плавного пуска асинхронного электродвигателя / Е.К. Ещин, И.А. Соколов, В.Л. Иванов, В.Г. Каширских, Заявка № 200310098; Оpubл. 27.08.04
9. Каталог «Электрооборудование Emotron (Швеция) для электродвигателей: управление и защита» // Название сайта: URL:http://www.grantor-piter.ru/uploads/emotron_katal/emotron_catalog.pdf (Дата обращения 15.03.2012).
10. Петров, Л.П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос, и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

11. Андриященко О.А., Бойко А.А., Волянская Я.Б. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки // Электромашиностроение и электрооборудование, 2006. – № 66. – С. 33-34.
12. Saqib, M.A. Soft starter of an induction motor using neural network based feedback estimator // IEEE Power Engineering Conference. – 2007. – V.3, № 3. – P.1-5.
13. Ermis, M. ; Nalcaci, E. ; Ertan, B. ; Rahman, M. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations // Energy Conversion, IEEE Transactions on. – 1999. – V.2. №4. – P. 404-412.
14. Копырин В., Кривовяз В., Силуков А., Ткачук А. Плавный пуск группы высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов // Силовая электроника. – 2008. – № 16. – С. 54-57.
15. Устройства плавного пуска и торможения двигателей электроустановок: Грамотное использование // Название сайты URL:<http://www.yanviktor.ru/chrp/softstarters/upp.pdf> (дата обращения 18.01.2012).
16. Глазырин А.С., Ланграф С.В., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Разработка и исследование нейросетевого регулятора для электропривода с механической нагрузкой типа "пара трения" // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011 – №. 1 (23) – С. 171-177.
17. Петрушин В.С., Якимец А.М., Груша А.В. Влияние высших пространственно-временных гармоник на энергетические и тепловые показатели асинхронных двигателей в установившемся режиме при фазовом управлении // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2009. – №73. – С. 93-96.
18. Сборник тезисов Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «НИРС-2011»: сб. тез. докл. науч.-практ. конф., 28 мая 2011 г. / редкол.: С.В. Абламейко. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2011. – 637 с.

19. Колпаков А. Перспективы развития электропривода // Силовая электроника. 2004. – №1. – С. 46-48.
20. Прайс-лист приводов Siemens ООО «СпецТрейдИмпорт» // Название сайта URL: www.mechprivod.ru (дата обращения: 18.02.2012).
21. Прайс-лист приводов Abb // Название сайта URL: <http://privod.szemo.ru> (дата обращения: 18.02.2012).
22. Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Разработка наблюдателя скорости для системы управления асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения // Фундаментальные исследования. 2012 – №. 9, ч.3 – С. 656–661.
23. Официальный сайт Siemens // Название сайта URL: <http://www.siemens.com> (дата обращения: 18.02.2012).
24. Официальный сайт Schneider-electric // Название сайта URL: <http://www.schneider-electric.com> (дата обращения: 18.02.2012).
25. Кудрявцев А.В., Ладыгин А.Н. Современные преобразователи частоты в электроприводе // Приводная техника. 1998. – №3. – С. 21- 28.
26. Виноградов, А.Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, И.Ю. Колодин, А.Н. Сибирцев // Силовая электроника. 2006. – №3. – С. 50-55.
27. Описание электропривода АСТЭК-02 // Название сайта URL: <http://www.npptec.ru/1062-1-ustroystvoplavnogo.html> (дата обращения 19.02.2012).
28. Техническая документация на электропривода Schneider electric // Название сайта URL: <http://www.schneider-electric.ru> (дата обращения 19.02.2012).
29. Справочник энергетика промышленных предприятий: справочное издание / В.А. Гольстрем, А.С. Иваненко. - 4-е изд., перераб. и доп. - Киев : Техніка, 1977. – 464 с.

30. Загорский А.Е., Захарова З.А., Пар И.Т. Тиристорные устройства для управления низковольтными электрическими двигателями // Промышленная энергетика. 1996. – №8. – С. 16-19.
31. Волков А.В. Анализ способов измерения скорости вращения асинхронных двигателей / Волков А.В., Савостьянов Ю.А., Черемисин В.И. Томск, 1980. С. 56-58.
32. Иванова Т.В. Сравнительный анализ синтезированных алгоритмов управления асинхронным двигателем // Молодежная научно-техническая конференция г. Ульяновск, 2014. – С. 69-83.
33. Пат. №2251204 РФ МПК H02P 5/28 (2006.01) Электропривод переменного тока / Зюзев А.М., Нестеров К.Е. Заявка №20031366222/09; Оpubл. 27.04.2005.
34. Нестеров К.Е. Разработка и исследование системы "Тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель" с вычислителем скорости ротора по ЭДС статора. Дисс. канд. техн. наук. Екатеринбург, 2009. – 141 с.
35. Зюзев А.М. К построению бездатчикового электропривода системы ТПН-АД // Электротехника. – 2005. – №9. – С. 38-41.
36. Зюзев А.М. Способы измерения ЭДС статора двигателя в системе ТПН-АД / Зюзев А.М., Нестеров К.Е. // Научные труды XII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 243-244.
37. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Нестеров К.Е. // Электромашиностроение и электрооборудование. 2006. – № 66. – С. 35-36.
38. Браславский И.Я. Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса. дисс ... д-ра. техн. наук. Екатеринбург, 2004. – 347 с.

39. Козлова Л.Е., Разработка и исследование систем замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД // Современные проблемы науки и образования, 2013 – №. 5 // Название сайта URL: www.science-education.ru/ (дата обращения: 20.06.2014).
40. Barut, M. ,Demir, R. ; Zerdali, E. ; Inan, R. Real-Time Implementation of Bi Input-Extended Kalman Filter-Based Estimator for Speed-Sensorless Control of Induction Motors // Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2012. – №2. – P. 4197-4206.
41. Mora J.L, Torralba A., Franquelo L.G. An adaptive speed estimator for induction motors based on a Kalman filter with low sample time // Power Electronics Specialists Conference, 2005. – №5. – P. 794-798.
42. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия – Телеком. 2003. – 94 с.
43. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: Учеб. Пособие для вузов/В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: Высш. шк. 2002. – 183 с.
44. Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Нейросетевой датчик скорости двигателя постоянного тока // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы отраслевой научно-технической конференции – Северск, 17-21 мая. – 2010: СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 66.
45. Пат. №103260 РФ. МПК H02P 21/00 (2006.01), H02P 27/08 (2006.01). Устройство управления асинхронным двигателем / Л. Е. Козлова, Т. А. Глазырина, А. С. Глазырин, С. В. Ланграф, В. В. Тимошкин, К. С. Афанасьев. Заявка № 2010135993; Опубл. 10.02.2011.
46. Дмитриенко В.Д., Поворознюк О.А. Новые алгоритмы обучения одно- и многомодульных дискретных нейронных сетей АРТ // Вестник НТУ ХПИ –. 2008. – №24. – С. 51-64.

47. Вороновский Г.К., Махотило К.В., Сергеев С.А. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей в энергетике. 1. Моделирование // Проблемы общей энергетике. – 2006 . – №14. – С. 50-61.
48. Ланграф С.В., Глазырин А.С., Глазырина Т.А., Афанасьев К.С., Тимошкин В.В., Козлова Л.Е. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана // Известия Томского политехнического университета. 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 120-123.
49. Ланграф С.В., Глазырин А.С. Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением // Известия вузов. Электромеханика, 2009. – № 6. – С. 61-64.
50. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация параметров и переменных состояния асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана //Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции - Томск, 13-16 октября 2009. - Томск: ТПУ, 2009. – С. 413-415.
51. Афанасьев К.Н., Глазырина Т.А., Глазырин А.С. Исследование робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором на основе фильтра Калмана //Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности: Материалы отраслевой научно-технической конференции – Северск, 17-21 мая 2010. – 2010: СТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 81
52. Болодурина И.П., Решетников В.Н., Таспаева М.Г. Применение и адаптация нейросетевых технологий в задаче идентификации динамических объектов // XII всероссийское совещание по проблемам управления Москва 16-19 июня. – 2014 – С.9078-9084.
53. Сучилин В.И., Волобуев Г.Б. Оценка возможностей повышения точности местоопределения наземного подвижного объекта путем вторичной обработки показаний аппаратуры пользователя систем GPS NAVSTAR и/или

- ГЛОНАСС // Кибернетика и высокие технологии XXI века: сб. докл. VIII Междунар. науч.-технич. конф. Воронеж. 2007. – Т. 2. – С. 1066-1073.
54. Пат. №102160 РФ. МПК H02P 21/13 (2006.01), H02P 27/08 (2006.01). Устройство управления асинхронным двигателем / К. С. Афанасьев, Т. А. Глазырина, А. С. Глазырин, Л. Е. Козлова, В. В. Тимошкин, С. В. Ланграф. Заявка № 2010135746; Оpubл. 10.02.2011.
55. Макаров В. Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Научно-технический журнал: «Вестник Казанского технологического университета». – Казанский государственный технологический университет. 2011. – №6 – С. 79-92.
56. Нгуен Куанг Тхиеу, До Ван Зунг. Адаптивная идентификация параметров тяговых асинхронных электродвигателей в реальном масштабе времени // Сб. научн. тр. 65-ой межд. научн.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров». – М.: МАМИ, 2009. – С 9-5.
57. Глазырин А.С., Тимошкин В.В., Цурпал С.В., Глазырина Т.А. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии // Известия Томского политехнического университета, 2010. – Т. 316 – № 4. – С. 174-177.
58. Каширских В.Г. Функциональное диагностирование и прогнозирование состояния асинхронных электродвигателей горных машин на основе динамической идентификации // Электрические комплексы и системы 2005. – №3. – С. 3-5.
59. Каширских В.Г. Идентификация параметров обмотки статора и цепи намагничивания асинхронного двигателя с помощью расширенного фильтра Калмана / В.Г. Каширских, В.М. Завьялов // Электротехнические комплексы и системы 2001. – №3. – С. 1-7.

60. Каширских В.Г. Оценка активного сопротивления ротора асинхронного электродвигателя с помощью нейронной сети / В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17: Сб. трудов 17-й Международ. науч. конф.: В 10 т. Т. 5 Секция 5 / Под общ. Ред. В.С. Балакирева. – Кострома: изд-во Костромского Гос. технол. ун-та, 2004, – С. 161-163.
61. Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей с учетом значимости параметров // В.Г. Каширских, А.В. Нестеровский / электротехнические комплексы и системы 2005. – № 1 – С.73-74.
62. Хрящев В.В. Нейросетевой подход к решению задачи восстановления амплитуды дискретного сигнала / В.В. Хрящев, Е.Ю. Саутов, Е.А. Соколенко // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: труды конф., 2002. Название сайт URL: matlab.exponenta.ru/conf2002/theses/section4/hryashev/hryashev.php (дата обращения 19.02.2012).
63. Антошук С.Г. Нейросетевая аппроксимация динамических характеристик систем электропривода / С.Г. Антошук, А.А. Николенко, Н.Ю. Хитрук // Електромашинобудування та електрообладнання. – Вип.66. – К.: Техніка, 2006. Название сай URL: nbuv.gov.ua/portal/natural/emeo/ee_66/7-05.pdf (дата обращения 19.02.2012).
64. Баранов П.Р., Дементьев Ю.Н., Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным тормозным устройством // Известия ТПУ, №1, 2006-Томск: Изд-во ТПУ, 2006, С.: 159-163.
65. Однокопылов И.Г. Асинхронный электропривод механизма подъема крана мостового типа с повышенной безопасностью и живучестью. Дисс. ... канд. техн. наук. ТСК., 2008. – 162 с.

66. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода/ Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
- 67.Тиристоры (Технический справочник). Пер. Т 44 с англ., под ред. В.А. Лабунцова, С.Г. Обухова, А.Ф. Свиридова, Изд. 2-е, доп., М., «Энергия», 1971. – 560 с.
- 68.Токовая нагрузка на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в нормальных режимах работы / Научно-технический сборник. – №76. – С. 304-310.
69. Сосков А.Г. Усовершенствование силовые коммутационные полупроводниковые аппараты низкого напряжения: монография/ А.Г. Сосков, харьк. нац. акад. город. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2011. – 156 с.
- 70.Каширских В.Г. Моделирование работы системы «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный электродвигатель» // Вестник КузГТУ. 2006. – №1. – С. 55-58.
- 71.Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. – СПб. : Корона принт, 2001. – 320 с.
- 72.Дьяконов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов СПб. : Питер, 2002. – 448 с.
- 73.Черных И.В. Simulink. Среда создания инженерных приложений Текст. / И.В. Черных. М. : Диалог Мифи, 2003. – 496 с.
74. Ключев В.И. Теория электропривода.: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
75. Мейстель А. М. Комплектные тирнсторные устройства для управления асинхронными электроприводами / А. М. Мейстель, В. А. Найдис, Ю. И. Херсонский.-М.: Энергия, 1971. – 120 с.

76. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
77. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново, 2008. – 298 с.
78. Luenberger D.G. Observers for multivariable systems // IEEE Trans, on Automatic Control. 1966. – № 2. – P. 190-197.
79. Страшинин Е. Э., Основы теории автоматического управления, ч.1 линейные непрерывные системы управления, учебное пособие: Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 217 с.
80. Luenberger D.G. An introduction to observers // IEEE Trans, on Automatic Control. 1971. AC-16. № 6. P. 596-602.
81. Алексеев Ю.В., Рабинович А.А. Краново-металлургические и экскаваторные двигатели постоянного тока: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
82. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. /Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
83. Luenberger D.G. Introduction to dynamic systems. NY: Wiley, 1979. – 446 p.
84. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
85. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатие, 1981. – 375 с.
86. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических объектов. – М.: Наука. 1969. – 317 с.
87. Букатова, И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М.:Наука, 1979. – 231 с.
88. Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. Пер. с англ. Ю. П. Зайченко М. Мир. 1969. – 232 с.

89. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
90. Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L. Tackling real-coded genetic algorithms: operators and tools for the behaviour analysis // Artificial Intelligence Review – 1998. – Vol. 12. – № 4. – P. 265-319.
91. Непрерывные генетические алгоритмы – математический аппарат Название сайта URL: http://www.basegroup.ru/library/optimization/real_coded_ga/, свободный (дата обращения: 03.03.2012).
92. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.
93. Курейчик В.М. Кныш Д.С., Параллельные генетические алгоритмы: обзор и состояние проблемы // Известия РАН. ТиСУ, 2010. – №. 4. – С. 72-82.
94. Пат. №123541 РФ. МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство для определения параметров асинхронного двигателя / А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, Р.Ю. Ткачук, В.И. Полищук. Заявка № 2012132379/28; Оpubл. 27.12.2012.
95. Пат. №2502079 РФ МПК G01R 31/34 (2006.01), Способ определения параметров асинхронного электродвигателя / А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, Р.Ю. Ткачук, Полищук В.И. Заявка №2012132986/28; Оpubл. 27.07.2012.
96. Вороновский Г.К., и др. Генетические алгоритмы, нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Х.: ОСНОВА, 1997. – 112 с.
97. Божич В.И., Лебедев О.Б., Шницер Ю.Л. Разработка генетического алгоритма обучения нейронных сетей // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. 2001 – №1. – С. 21-24.

98. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: Учеб. пособие/ Под ред. Ю.Ю. Трасевича. – Астрахань: Издательский «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
99. Лебедев Б.К. Планирование СБИС методом генетического поиска // Известия ТРТУ. Интеллектуальные САПР. Таганрог, Изд-во ТРТУ, 1999. – №3. – С. 119-126.
100. Пат. №115984 РФ. МПК H02P 23/14 (2006.01). Устройство для определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя / А.С. Глазырин, Р.Ю. Ткачук, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев, Д.В. Гречушников, С.В. Ланграф. Заявка № 2011136412/07; Опубл. 10.05.2012.
101. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С., Полищук В.И., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Козлова Л.Е. Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – №2. – С. 282-285.
102. Тимошкин В.В., Глазырин А.С., Глазырина Т.А. Синтез и настройка нейронных сетей для задач электропривода, аппроксиматор на основе нейронной сети // Современная техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, 12-16 апреля 2010. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 480-482.
103. Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Диагностика обрыва фазы статора асинхронного двигателя с использованием искусственной нейронной сети // IV чтения Ш. Шокина: Материалы IV Международной научно-технической конференции – Павлодар, 14-16 ноября 2010. – Павлодар: ПГУ, 2010. – С. 132-133.
104. Козлова Л. Е. , Тимошкин В. В. , Глазырин А. С. Диагностика обрыва фазы ротора асинхронного двигателя по токам статора с использованием искусственной нейронной сети // Тинчуринские чтения: материалы

докладов VI Международной молодежной научной конференции, Казань, 27-29 Апреля 2011. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2011. – Т. 3 – С. 77-78.

105. Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Управление электромеханическими системами с отрицательным вязким трением // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых – Новосибирск, 3-5 декабря 2010. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 199-200.
106. Руководство пользователя плат 6023E/6024E/6025E // National Instruments Corporation. – 1999. – с. 81-83.
107. Тимошкин В.В. , Глазырина Т.А. , Полищук В.И. , Глазырин А.С. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин // Электричество. 2012 – №. 6 – С. 42–46.
108. Тимошкин В. В. , Глазырин А. С. , Глазырина Т. А. Очистка от шума сигналов в диагностических комплексах и каналах обратных связей электропривода // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 18-22 Апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 1 – С. 544-545.

ПРИЛОЖЕНИЕ

АКТЫ

о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Зам. генерального директора

ОАО «НПО «СПЛАВ»

Иванов Ю.А.

«12» 04 2014 года



АКТ

***о внедрении результатов диссертационной работы Тимошкина В.В.
«Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для
асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД»***

Комиссия в составе Иванова Юрия Анатольевича, Гаевского Валерия Владимировича и Белоусова Алексея Александровича рассмотрев содержание работы Тимошкина В.В., его публикаций, патентов пришла к заключению о том, что результаты диссертационной работы «Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД» используются на ОАО «НПО «СПЛАВ», а именно:

1. Методика идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины на основе генетических алгоритмов.
2. Структура модифицированного наблюдателя угловой скорости для электроприводов ТРН-АД аналогична с небольшим изменением используется в полном соответствии.
3. Разработанный программный комплекс для исследования электропривода ТРН-АД используется частично.

Начальник НИО

Гаевский В.В.

Начальник лаборатории

Белоусов А.А.

Листинг СИФУ ТРН-АД

```
int static counter=0, counter1=0, counter2=0 ;
int static mode=2,model=2, mode2=2 ;

if (Reset[0]==0){counter=0; counter1=0; counter2=0;
                mode=2;    model=2;    mode2=2;}

if (u0[0]>5) mode=0;
if (mode==0)
{
    y0[0]=0;
    counter++;
    if (counter>=alfa[0])mode=1;
}
if (mode==1) {counter=0; y0[0]=1;}

//-----
if (u1[0]>5) model=0;
if (model==0)
{
    y1[0]=0;
    counter1++;
    if (counter1>=alfa[0])model=1;
}
if (model==1) {counter1=0; y1[0]=1;}

//-----
-
if (u2[0]>5) mode2=0;
if (mode2==0)
{
    y2[0]=0;
    counter2++;
    if (counter2>=alfa[0])mode2=1;
}
if (mode2==1) {counter2=0; y2[0]=1;}
```

Листинги файлов используемых при идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с помощью генетических алгоритмов

Листинг файла par.m

```
global Rs;
global Rr;
global Ls1;
global Lr1;
global Lm;
global J;
global Mc1;
global Mc2;

%Параметры двигателя
f=50;
Rs=46.086;
Rr=45.699;
```

```

Ls1=0.86;
Lr1=0.85;
Lm=0.924;
p=4;
J=0.0045;

Ls=1.106;%Ls1+Lm;
Lr=0.929;%Lr1+Lm;

zp=p/2;

n=1410;
P=4000;
Mc1=0.1;
Mc2=0.2;

%Расчет параметров
Kr=Lm/Lr;
Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;
Ar=Rr/Lr;
Wref=2*pi*f;
Km=(3*zp)/2;

st=0.00

```

Листинг файла fga.m

```

tic;
xmin=[0.0001 0.0001 0.0001 0.0001 0.0001 0.0001 0.0001 0.0001];
xmax=[100 100 1.5 1.5 1.5 0.1 1.5 1.5];
options=gaoptimset('PopInitRange',[xmin;
xmax], 'PopulationSize',ones(1,8)*25, 'UseParallel','always', 'MigrationInterval',5
, 'MigrationDirection','both', 'FitnessLimit',0.01, 'HybridFcn',@patternsearch, 'Display','iter');
x=ga(@f1,8,[],[],[],[],xmin,xmax,[],options);

Rs=abs(x(1));
Rr=abs(x(2));
Ls1=abs(x(3));
Lr1=abs(x(4));
Lm=abs(x(5));
J=abs(x(6));
Mc1=abs(x(7));
Mc2=abs(x(8));

Re=Rs+Rr*Kr^2;
Le=Ls-Lm^2/Lr;

Ls=Ls1+Lm;
Lr=Lr1+Lm;

Kr=Lm/Lr;
Ar=Rr/Lr;

toc;
beep;

```

Листинг файла f1.m

```
function y=f1(x)
global Rs;
global Rr;
global Ls1;
global Lr1;
global Lm;
global J;
global Mc1;
global Mc2;

%второстепенные переменные

Rs=abs(x(1));
Rr=abs(x(2));
Ls1=abs(x(3));
Lr1=abs(x(4));
Lm=abs(x(5));
J=abs(x(6));
Mc1=abs(x(7));
Mc2=abs(x(8));

[t,u,yout]=sim('modga_08a.mdl');
y=yout(end,:);
```