

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**На правах рукописи**

**Козлова Людмила Евгеньевна**

**РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ  
СКОРОСТИ РОТОРА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ 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 **А.С. Глазырин**

Томск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Основные обозначения и сокращения.....</b>	<b>11</b>
<b>1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ ТРН АД.....</b>	<b>12</b>
1.1. Современное состояние техники плавного пуска асинхронных двигателей.....	12
1.2. Сравнительный анализ капитальных затрат на автоматизацию производственных механизмов с применением устройств плавного пуска и преобразователей частоты .....	19
1.3. Проблемы построения замкнутых систем управления электроприводов по схеме ТРН – АД.....	24
1.4. Способы косвенной оценки скорости вращения ротора асинхронного двигателя.....	29
1.5. Выводы по первой главе.....	31
<b>2. РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ .....</b>	<b>32</b>
2.1. Модель искусственного нейрона.....	32
2.2. Классификация искусственных нейронных сетей.....	36
2.3. Динамические нейронные сети .....	39
2.4. Особенности создание нейросетевого наблюдателя для оценки состояния динамических объектов .....	47
2.5. Математическая модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат $\alpha\beta$ .....	49
2.6. Создание нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного двигателя .....	53
2.7. Выводы по второй главе.....	63
<b>3. НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПО СХЕМЕ ТРН – АД .....</b>	<b>64</b>
3.1. Имитационная модель разомкнутой системы ТРН – АД .....	64
3.1.1. Модель асинхронного двигателя в естественных осях.....	64
3.1.2. Имитационная модель ТРН.....	72
3.1.3. Имитационная модель электропривода по схеме ТРН-АД.....	77

3.2.	Особенности построения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при питании асинхронного двигателя от тиристорного регулятора напряжения .....	81
3.2.1	Принцип построения архитектуры нейросетевого наблюдателя и выбор алгоритма обучения.....	81
3.2.2	Влияние выбора функции активации нейрона на качество обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ЭП по схеме ТРН – АД.....	90
3.3.	Исследование статики и динамики замкнутого бездатчикового асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости .....	95
3.4.	Выводы по третьей главе.....	100
<b>4.</b>	<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПО СХЕМЕ ТРН – АД.....</b>	<b>102</b>
4.1.	Описание лабораторного оборудования .....	102
4.2.	Разработка прикладного программного обеспечения в среде графического программирования LabVIEW для снятия данных с компьютеризированной экспериментальной установки.....	109
4.3.	Методика проведения и обработки результатов эксперимента .....	111
4.4.	Выводы по четвертой главе.....	121
<b>5.</b>	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>123</b>
<b>6.</b>	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>125</b>
<b>7.</b>	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>137</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время бурно развивается отрасль электротехнической промышленности по разработке и введению в эксплуатацию микропроцессорных устройств плавного пуска (УПП) асинхронных двигателей по схеме «Тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» (ТРН - АД). Существует большое количество производственных механизмов, автоматизацию которых целесообразно проводить на основе устройств плавного пуска: вентиляторы, компрессоры, насосы, воздуходувки и другие. Основной эффект от применения УПП заключается в исключении ударной нагрузки на сеть, уменьшение влияния на соседних потребителей и снижение механических перенапряжений при пуске асинхронных двигателей. Как показал сравнительный анализ, проведенный в диссертации капитальные затраты на автоматизацию с применением устройств плавного пуска значительно меньше, чем с использованием преобразователя частоты (ПЧ).

Применение микропроцессоров в УПП позволяет расширить функционал этих устройств, например, обеспечить плавные пуски, остановки и реверсы асинхронных двигателей (АД) по заданной программе, выполнить микропроцессорные релейные защиты.

Известно, что асинхронный электропривод (ЭП) по схеме ТРН – АД с замкнутым контуром скорости приобретает дополнительно новые свойства в статических и динамических режимах [1]. Однако применение реальных датчиков для измерения угловой скорости ротора сопряжено с рядом практических трудностей, таких как, трудности монтажа датчика и передачи сигнала от датчика к шкафу управления (ШУ), а так же высокая стоимость дополнительного оборудования. Одним из путей решения данной проблемы является использование наблюдателей скорости на основе имеющегося оборудования: микропроцессора, датчиков тока и напряжения статора.

В настоящее время достаточно хорошо проработаны вопросы асинхронных электроприводов (АЭП) по схеме ПЧ – АД с оценкой угловой скорости [2, 3]. В то же время вопросам построения наблюдателей состояния для асинхронных электроприводов по схеме ТРН – АД уделяется не достаточно внимания. Следует выделить лишь работы сотрудников кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета Браславского И. Я., Зюзева А. М., Костылева А. В. [4-7]. Среди основных проблем (задач, требующих решения) при построении наблюдателей угловой скорости ротора в электроприводах по схеме ТРН – АД следует выделить несинусоидальность напряжений и токов статора, а также нелинейную зависимость критического момента от напряжения статора. Решение комплекса вопросов связанных с разработкой основ построения наблюдателей угловой скорости в ЭП по схеме ТРН – АД представляет научный и практический интерес, следовательно представленная диссертационная работа является своевременной и актуальной.

**Объектом исследования** является асинхронный электропривод по схеме ТРН – АД.

**Предметом исследования** является разработка и исследование нейросетевого наблюдателя угловой скорости вращения вала ротора в электроприводе по схеме ТРН – АД.

**Идея работы** заключается в повышении эффективности эксплуатации электропривода по схеме ТРН – АД за счет внедрения наблюдателя угловой скорости ротора.

**Цель работы** заключается в разработке интеллектуальной системы оценивания угловой скорости для АЭП по схеме ТРН – АД на основе искусственной нейронной сети (ИНС).

Для решения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- проанализировать проблемы построения замкнутых систем управления электроприводов по схеме ТРН – АД

- исследовать особенности создания нейросетевого наблюдателя для оценки состояния динамических объектов;
- разработать нейросетевой наблюдатель угловой скорости асинхронного двигателя;
- исследовать особенности построения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при питании асинхронного двигателя от тиристорного регулятора напряжения;
- исследовать статику и динамику замкнутого бездатчикового асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости.
- провести проверку работоспособности разработанного нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД на компьютеризированной экспериментальной установке.

**Методы исследования.** При выполнении исследований применялись методы теории электрических машин, дифференциальных и интегральных исчислений, искусственного интеллекта. Исследования проводились в программных средах Matlab/Simulink, Mathcad и LabVIEW.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана структура нейросетевого наблюдателя угловой скорости АД, представляющая собой комбинированную динамическую искусственную нейронную сеть, на вход которой подаются сигналы с датчиков токов и напряжения с двух фаз статора и их однократные и двукратные задержки, а так же однократно задержанный сигнал обратной связи по оценке угловой скорости с выхода наблюдателя.
2. При создании нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД предложена структура блока предобработки данных с датчиков статорных токов и напряжений, а так же их задержек с преобразованием в

полярную систему координат, что позволило обеспечить работоспособность нейросетевого наблюдателя скорости в условиях несинусоидальности форм токов и напряжений статора и наличия режима бестоковых пауз.

3. Предложен новый подход к улучшению качества настройки нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД, позволяющий уменьшить интегральную погрешность оценивания.

**Практическая значимость диссертации заключается в следующем:**

1. Получено комплексное решение, позволяющее организовать бездатчиковый асинхронный электропривод по схеме ТРН - АД, обеспечивающий плавный пуск механизма в условиях непостоянства момента сопротивления нагрузки или момента инерции.
2. Созданы имитационные модели в программной среде MATLAB Simulink замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД и его элементов, позволившие создать тренировочный набор для обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при типовых режимах работы УПП.
3. Разработано прикладное программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW, позволяющая проверять адекватность работы нейросетевого наблюдателя на основе экспериментальных данных на лабораторном стенде.
4. Разработан ряд вариантов устройств управления асинхронным двигателем с наблюдателями состояния, новизна и приоритетность которых подтверждены патентами на изобретение №2438229 и на полезные модели №103260, №102162, №102161, №102160.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Архитектура нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД;

2. Структура блока преобработки в составе наблюдателя, осуществляющая преобразование сигналов с датчиков статорных токов и напряжений, а так же их задержек в полярную систему координат, что позволяет учесть особенности импульсно-фазового режима работы ТРН в электроприводе по схеме ТРН - АД;
3. Имитационные модели замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД и его элементов, позволившие создать тренировочный набор для обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при типовых режимах работы УПП;

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:** корректным использованием фундаментальных положений теории основ электротехники, математического анализа, теории электрических машин, теории искусственного интеллекта, планированием и проведением натурного эксперимента.

**Реализация результатов работы.** Выполнение ряда задач диссертационной работы осуществлялась в соответствии с грантом III Межвузовского конкурса исследовательских проектов по направлению: традиционная и атомная энергетика, альтернативные технологии производства энергии проект № 02/09-2012 «Создание лабораторного комплекса по разработке современных интеллектуальных средств динамической идентификации, эксплуатационной диагностики внутренних повреждений, отказоустойчивой эксплуатации синхронных генераторов и электрических машин электроприводов собственных нужд тепловых электростанций».

Результаты исследований внедрены на предприятии города Томска ООО "МЕХАТРОНИКА-СОФТ" при создании и разработке перспективных регулируемых электроприводов с тиристорным регулятором напряжения.



Использование материалов диссертационной работы предприятиями и научно-исследовательскими организациями подтверждено актами внедрения о внедрении, представленными в приложении.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи энергии". Томск, 13-16 октября 2009 г.; на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Томск, 12-16 апреля 2010г.; на V Международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения". Казань, 28–29 апреля 2010 г.; на научно-технической конференции "Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности". Северск, 17-21 мая 2010 г.; на научно-технической конференции "IV чтения Ш. Шокина". Павлодар, 14-16 ноября 2010 г.; Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Томск, 18-22 апреля 2011 г.; на VI Международной молодежной научной конференции "Тинчуринские чтения". Казань, 27–29 апреля 2011 г.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований изложены в 22 научных трудах, в том числе: 8 статьях в периодических изданиях по перечню ВАК РФ ("Известия Томского политехнического университета", "Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники", "Фундаментальные исследования", "Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока", "Современные проблемы науки и образования", "Научный вестник НГТУ"), 4 патента на полезную модель РФ, 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о регистрации электронного ресурса, 7 статьях в материалах конференций.

**Личный вклад.** Основные научные результаты и положения, изложенные в диссертации, постановка задач и методология их решения разработаны и получены автором самостоятельно.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, написанных на 144 страницах машинописного текста. Содержит 59 рисунков, 17 таблиц, список использованных источников из 96 наименований и 8 приложений на 20 страницах, в которых изложены материалы, относящиеся к практической реализации.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АД – асинхронный двигатель

АО - алгоритм обучения

АТ - автотрансформатор

АЭП – асинхронный электропривод

ДН – датчик напряжения статора

ДС – Датчик скорости вращения вала двигателя

ДТ – датчик тока статора

ИНС – искусственная нейронная сеть

ЛФ - линейная функция

МК – микропроцессор

НС – наблюдатель скорости

ПЧ – преобразователь частоты

ПФ - пороговая функция

РС – регулятор скорости

РБФ - радиально-базисная активационная функция

СИФУ – система импульсно – фазового управления

СУ – система управления

СФ - сигмоидальная функция

ТРН – АД – тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель

ТРН - тиристорный регулятор напряжения

УПП – устройство плавного пуска

ШУ – шкаф управления

ЭП - электропривод

Traingd - алгоритм градиентного спуска

Traingdm - алгоритм градиентного спуска с возмущением

Trainscg - алгоритм обучения М. Ф. Моллера

Trainlm - Алгоритм обучения Левенберга – Марквардта

# **1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ ТРН – АД**

## **1.1. Современное состояние техники плавного пуска асинхронного двигателя**

В настоящее время наиболее широкое распространение в промышленности получили асинхронные двигатели (АД). Это объясняется тем, что асинхронный электропривод средней мощности является самым массовым в использовании в различных отраслях промышленности. Помимо этого данный тип двигателя является одним из главных потребителей электроэнергии [8].

По мере развития полупроводниковой техники развивалась и система управления асинхронными двигателями, что позволило объединить сопутствующее оборудование (тиристоры, микропроцессорную систему управления, наблюдатели и др.) в один интеллектуальный блок управления под названием устройство плавного пуска (УПП) [9-13]. Данное оборудование увеличивает такие показатели как: экономичность, энергетическая эффективность, управляемость, увеличение срока службы механизмов и электродвигателя, плавный пуск и останов, отсутствие провалов напряжения и др.

Устройство плавного пуска – это тиристорное устройство, главной задачей которого является обеспечение плавного пуска и останова электродвигателя [14]. В настоящее время производством УПП занимаются такие мировые производители, как ABB, Siemens, Emotron AB, Softronic, Telemecanique, Ansaldo и ряд других [15-18].

УПП нашли применение в таких отраслях промышленности где необходим плавный пуск и останов механизма и исключение динамических ударов. К такому оборудованию относятся конвейеры, насосы, вентиляторы, компрессоры, прядильные машины и др.

Современные производители УПП объединяют в одном приборе важные функции, которые делают данный прибор универсальным по сравнению с традиционными УПП и позволяют максимально эффективно управлять технологическим процессом. В число таких функций могут входить [14-19]:

- управление режимом пуска и останова;
- управление рабочим режимом;
- интерфейс между устройством и оператором;
- автоперезапуск для всех сигналов в случае неисправности;
- управлением моментом;
- масштабирование аналогового входа с установкой минимального и максимального значения;
- набор параметров;
- мониторинг нагрузки на валу двигателя;
- универсальные входы – выходы;
- цифровые программируемые входы;
- программируемое реле;
- возможность пуска при одном уровне сигнала и останов – при другом;
- и другие.

В зависимости от наполнения УПП делает ненужными, такие дополнительные устройства как температурное реле, автоматы защиты двигателя, реле контроля фаз [15-18], что также ведет к снижению стоимости оборудования, уменьшает место для его монтажа, уменьшает количество компонентов системы и упрощает сервис [14].

Несмотря на наличие большого разнообразия УПП, можно констатировать, что устройства мощностью от 1 до 400 кВт на напряжение до 660 В строятся по одной и той же схеме силовой части, известной еще с начала 20-го века [19]. Данная схема представляет собой тиристорный регулятор напряжения с импульсно-фазовым управлением, представленный

на рис. 1.1. В зависимости от того какой тип УПП используется (реверсивный или не реверсивный), имеются от 3 до 5 комплектов полупроводниковых управляемых вентилях (тиристоров, симисторов, транзисторов), импульсы управления на которые формирует система управления (СУ) [19, 20]. Изменение угла управления тиристоров приводит к изменению действующего значения напряжения на входе УПП и, как следствие, к изменению угловой скорости вала двигателя.

Классифицировать УПП можно по типу полупроводниковых приборов, на которых выполнена силовая часть:

- **УПП на тиристорах (рис. 1.1. а).** При подаче отпирающего сигнала на управляющий электрод тиристора от системы импульсно фазового управления (СИФУ) формируется угол открытия. Тиристоры  $VS1 \div VS3$  работают на первую полуволну напряжения, а тиристоры  $VS4 \div VS6$  – на вторую [20 – 22];
- **УПП на симисторах или триаках (рис. 1.1. б).** Симистор – полупроводниковый прибор, являющийся разновидностью тиристора. При подаче отпирающего импульса на управляющий электрод полупроводниковый прибор переходит в проводящее состояние и силовой ключ открывается. Особенностью симистора является то, что в открытом состоянии он пропускает ток в обоих направлениях. Закрывание происходит когда ток через основные электроды меняет направление [22];
- **УПП на IGBT – транзисторах (рис. 1.1. в).** Позволяет входным сигналом управлять током в электрической цепи. Транзисторные ключи переменного тока обладают главным достоинством – они могут несколько раз за период коммутировать нагрузку [20, 22].

Классифицировать силовую часть УПП можно по схеме подключения:

- Нереверсивная схема (рис. 1.1);
- Реверсивная схема (рис. 1.2);.

Классифицировать силовую часть УПП можно так же по схеме подключения нагрузки:

- «Звезда» с нулевым проводом и без (рис. 1.3 а);
- «Треугольник» (рис. 1.3 б, в).

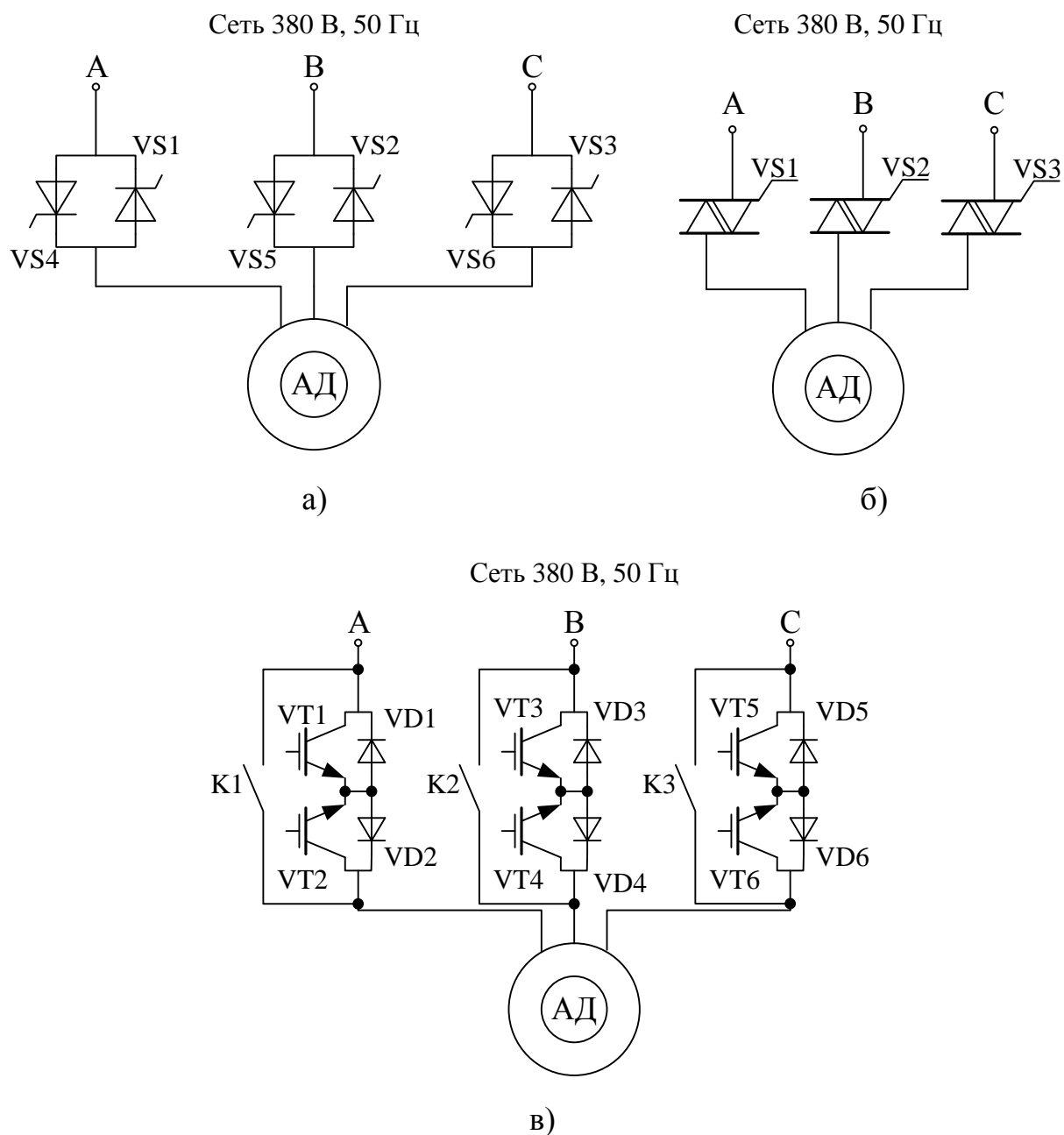


Рис. 1.1 Нереверсивная схема УПП, выполненные на: а) тиристорах; б) симисторах; в) встречно включенных IGBT – транзисторах с общим эмиттером

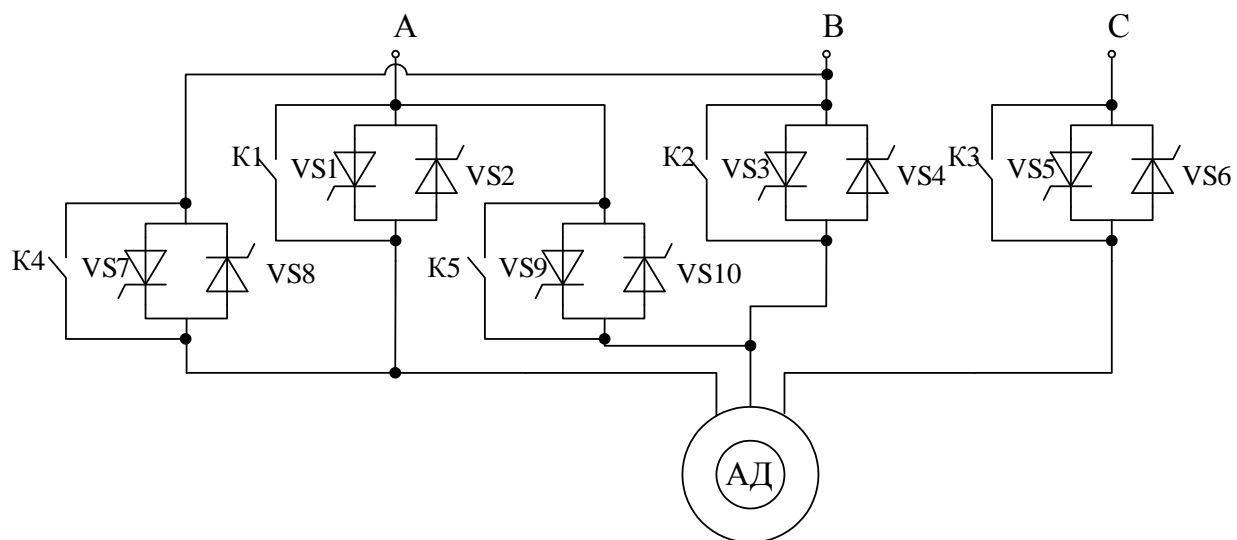
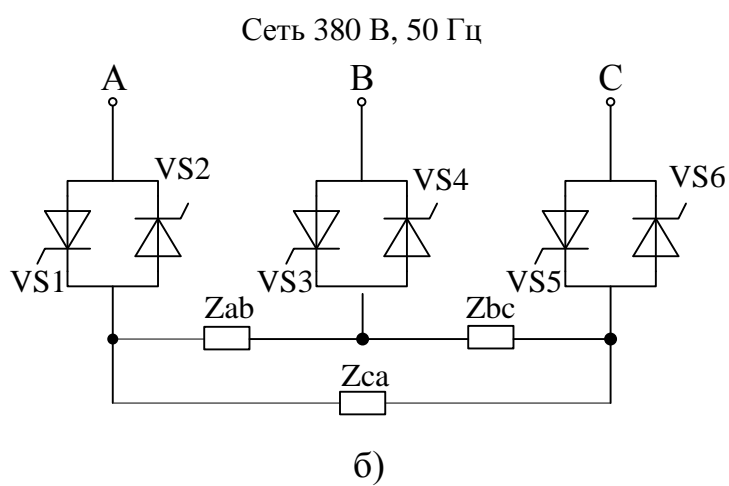
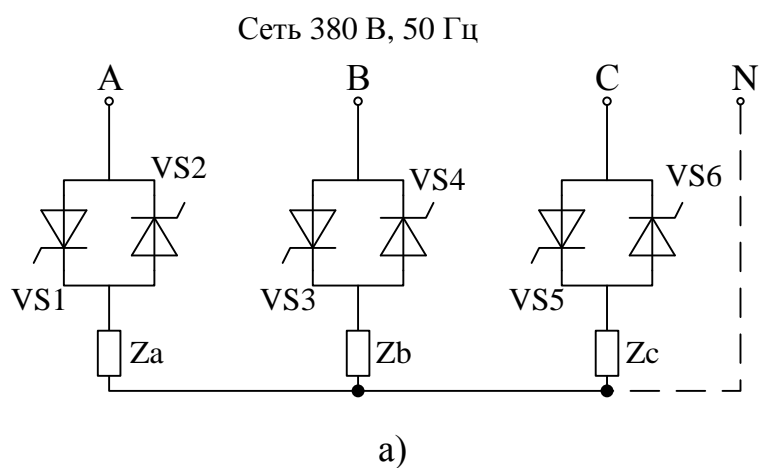


Рис. 1.2 Реверсивная схема УПП, выполненные на тиристорах





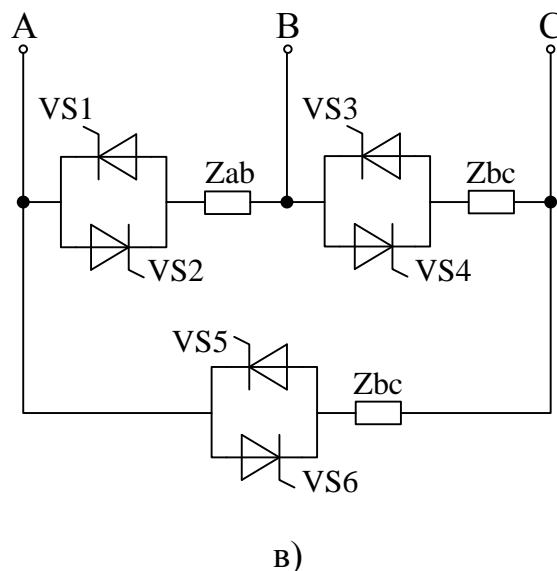


Рис. 1.3 Классификация силовой части УПП по схеме подключения нагрузки: а) – «звезда»; б), в) – «треугольник» на тиристорах

Современные УПП разделяются по методу пуска и останова пускателей:

1. **Управление напряжением.** Обеспечивается плавный пуск, но не имеет обратной связи по току или моменту. Происходит равномерное увеличение, либо уменьшение напряжения. Необходимо задавать время пуска/останова [14, 23, 24].

2. **Управление током.** Изменение напряжение происходит при ограничении тока. В данном случае при достижении током заданного предела нарастание напряжения прекращается. Эта функция актуальна там, где мощность подстанции, генератора или любого другого источника энергии ограничена. Пуск с управлением по току не дает линейного переходного процесса [14, 23].

3. **Управление моментом.** УПП следит за необходимым значением момента, тем самым обеспечивая пуск с минимальным значением тока. Данный способ управления обеспечивает более тщательный контроль пуска (останова) механизма, снижая ток в среднем на 20 % [14, 23]. Система управления замкнутая по моменту дает линейный график разгона.

Основные преимущества использования современных УПП:

•**Экономия электроэнергии.** Как известно, в режиме холостого хода асинхронный электродвигатель потребляет около 40 % тока от номинального, эта электроэнергия выделяется в виде тепла [14]. Постоянно отслеживая нагрузку на валу двигателя, УПП регулирует напряжение на двигателе в зависимости от уровня нагрузки. Тем самым регулируется коэффициент мощности и потребляемую мощность.

•**Уменьшение/отсутствие провалов напряжения.** При пуске асинхронного двигателя пусковые токи могут достигать 5-7 крат от номинального, что ведет к увеличению нагрузки на сеть и, следовательно, к провалам напряжения. Каждый производитель УПП обеспечивает свое снижение пусковых токов. В основном снижение происходит в 3 – 5 раз, что позволяет значительно разгрузить сеть и уменьшить/исключить провалы напряжения. Снижение пусковых токов позволяет использовать коммутационную аппаратуру меньшего номинала [14, 23].

•**Увеличение срока службы электродвигателя.** Пусковые токи приводят к дополнительному нагреву обмоток и, следовательно, к преждевременному старению обмоток [14]. Обеспечивая плавный пуск/останов, двигатель намного реже выходит из строя тем самым уменьшая затраты на ремонт оборудования.

•**Увеличение срока службы механизмов.** Из-за ударных нагрузок, возникающих при прямом пуске двигателя, очень часто выходят из строя вспомогательные механизмы. Например, изнашиваются зубчатые колеса редуктора. УПП управляемые по моменту отслеживают нагрузку на валу двигателя и обеспечивают пуск с минимальным значением тока [14].

•**Быстрый останов.** В современных УПП предусмотрена функция динамического торможения постоянным током. Данная функция позволяет остановить высокоинерционные механизмы за короткий промежуток времени [14].

- **Точное позиционирование механизмов.** УПП непродолжительное время вращает вал двигателя на скорости 14 % от номинальной в прямом направлении и 9 % - в обратном [14].

- **Плавный пуск механизмов с высоким пусковым моментом.** Существуют механизмы, обладающие высоким пусковым моментом, что делает невозможным применение УПП. Для таких случаев предусмотрена функция броска момента, позволяющий получить большой ток в течение 0,1-2 с. при пуске. Далее разгон двигателя продолжается по выбранному ранее режиму [14].

Вышеперечисленные достоинства могут отличаться в зависимости от исполнения и комплектации УПП.

Развитие микропроцессорной техники привело к тому, что появилась возможность реализовать алгоритмы управления двигателем практически любой степени сложности и обеспечить выполнение любых требуемых функций.

## **1.2. Сравнительный анализ капитальных затрат на автоматизацию производственных механизмов с применением устройств плавного пуска и преобразователей частоты**

На сегодняшний день для управления асинхронными электроприводами используются такие системы управления как ПЧ и УПП. Разница между этими системами управления состоит в том, что ПЧ используются для глубокого регулирования механизмов, а УПП – мягкого пуска.

Помимо некоторых достоинств ПЧ имеют ряд недостатков, в число которых входит:

- большая частота коммутации ключей, что приводит к быстрому износу оборудования;
- двойное преобразование энергии;

- необходимость в дополнительном оборудовании, в число которого входят полупроводниковые диоды выпрямителя, фильтры звена постоянного тока, комплекты транзисторных ключей инвертора, датчики потокоцепления, скорости, тока и напряжения, что приводит к значительному удорожанию ЭП.

Существуют механизмы, для которых не требуется глубокое регулирование скорости, а необходим только плавный пуск за счет регулирования напряжения, ограничения тока и момента, уменьшение/избавление от пусковых ударных моментов. В таких случаях целесообразно применять УПП для управления АД. Данная система управления подходит для таких механизмов как центробежные насосы, вентиляторы, конвейеры, подъемники и другие.

Основным и немаловажным достоинством УПП является его значительно меньшая стоимость по сравнению с ПЧ при сопоставимых технических возможностях управления электродвигателем.

В таблицах 1.1, 1.2 представлены стоимость ПЧ и УПП от мощности для фирм ООО «Звезда-Электроника», Emotron, ABB, Siemens. Стоимость цен представлена на 24.06.2014 г [14-19].

Таблица 1.1. Стоимость ПЧ и УПП фирмы ООО «Звезда-Электроника»

№	$P, кВт$	$S_{УПП}, руб.$	$S_{ПЧ}, руб.$	№	$P, кВт$	$S_{УПП}, руб.$	$S_{ПЧ}, руб.$
1	15	26 600	30 400	6	55	52 300	154 700
2	22	31 500	44 500	7	75	65 700	181 800
3	30	34 500	62 700	8	90	81 500	256 900
4	37	39 800	119 800	9	110	94 000	276 400
5	45	47 500	126 600				

Таблица 1.2. Стоимость ПЧ и УПП фирм Emotron, ABB, Siemens

№	$P, \text{кВт}$	Emotron		ABB		Siemens	
		$S_{\text{ПЧ}}, \text{eur.}$	$S_{\text{УПП}}, \text{eur.}$	$S_{\text{ПЧ}}, \text{eur.}$	$S_{\text{УПП}}, \text{eur.}$	$S_{\text{ПЧ}}, \text{eur.}$	$S_{\text{УПП}}, \text{руб.}$
1	11	1329	610	1046	364	1665	9860
2	18,5	1727	713	1501	437	2536	14220
3	30	2372	802	2052	532	3330	21320
4	37	2768	892	2393	647	4266	25210
5	45	3627	959	3032	794	4930	29020
6	75	5436	1416	4575	1864	6400	42040
7	110	7996	1874	6435	2544	9756	58540

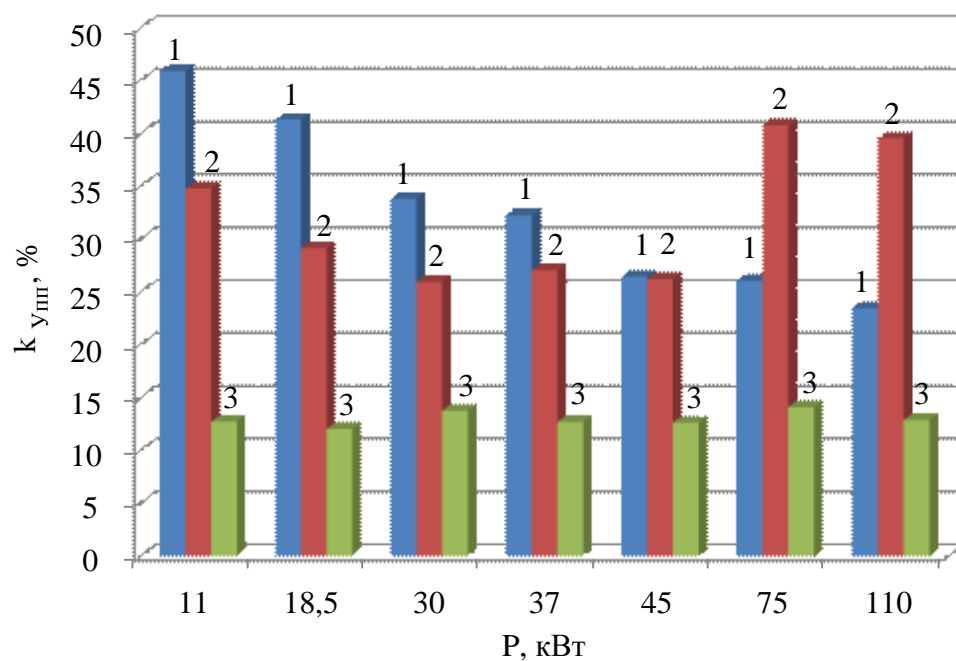
На рис. 1.4 представлены гистограммы отношения  $k_{\text{УПП}}$  стоимости УПП к ПЧ для различных производителей: отечественных и зарубежных [15 – 18, 25].

Коэффициент соотношения стоимости УПП в процентах стоимости ПЧ той же мощности, определяется по формуле:

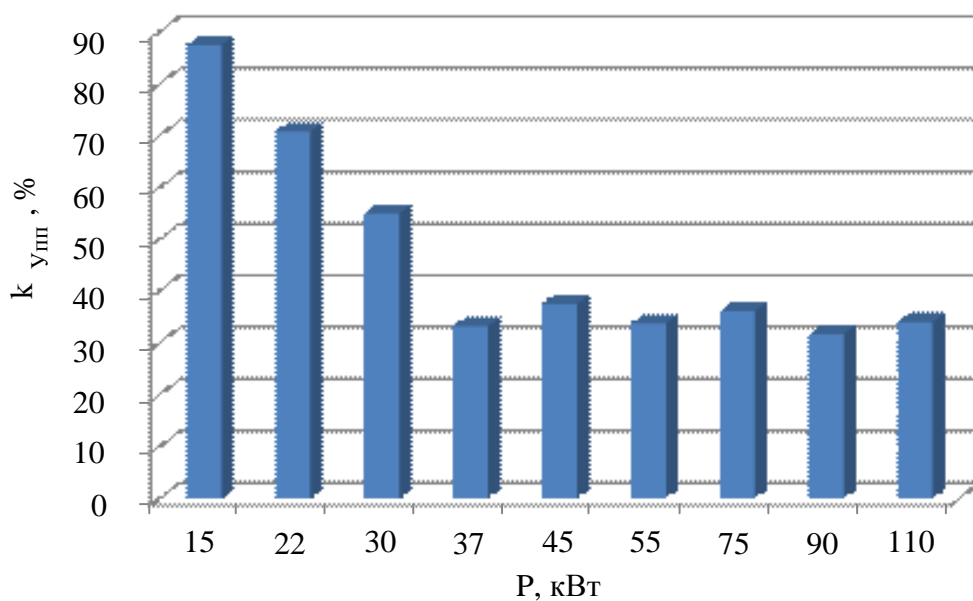
$$k_{\text{УПП}} = \frac{S_{\text{УПП}}}{S_{\text{ПЧ}}} \cdot 100\%,$$

где  $S_{\text{ПЧ}}$  - стоимость ПЧ,  $S_{\text{УПП}}$  - стоимость УПП.

Для нахождения  $k_{\text{УПП}}$  для фирмы Siemens, стоимость УПП и ПЧ заданы в рублях и евро соответственно, использовался курс евро по ЦБ на 24.06.2014 г.



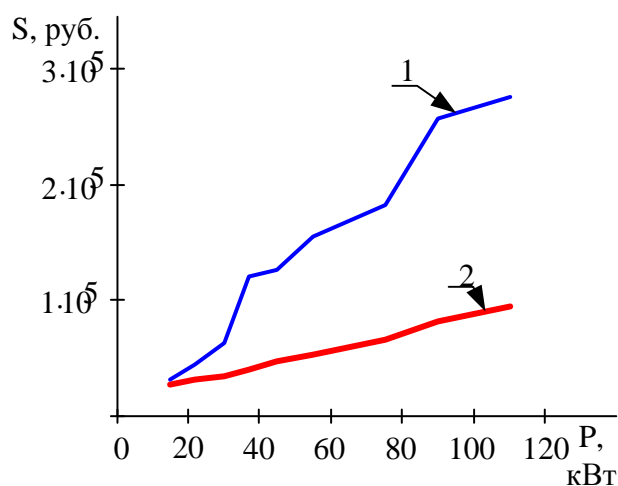
а)



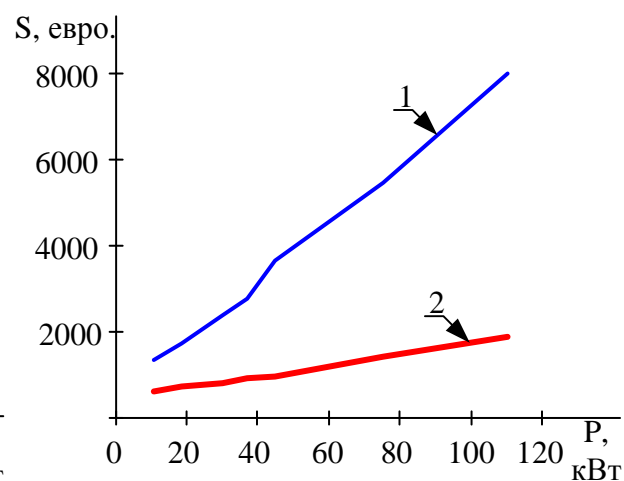
б)

Рис. 1.4 Гистограммы отношения стоимости УПП к стоимости ПЧ в зависимости от мощности для различных производителей: а) 1 – Emotron, 2 – ABB, 3 – Siemens; б) ООО «Звезда-Электроника»

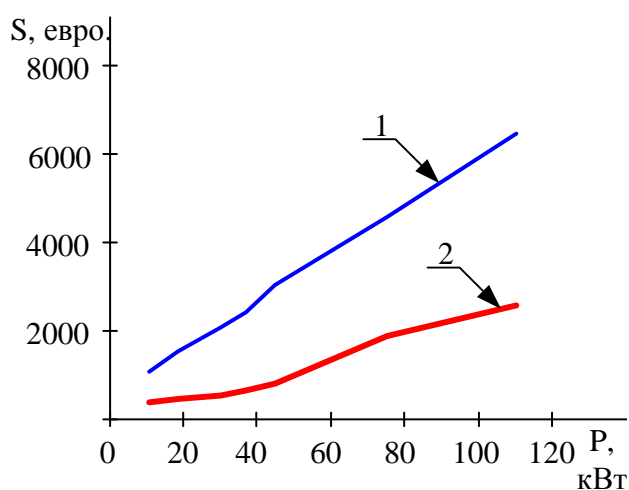
На рис. 1.5 графически представлены отличие стоимости ПЧ от УПП для различных фирм производителей.



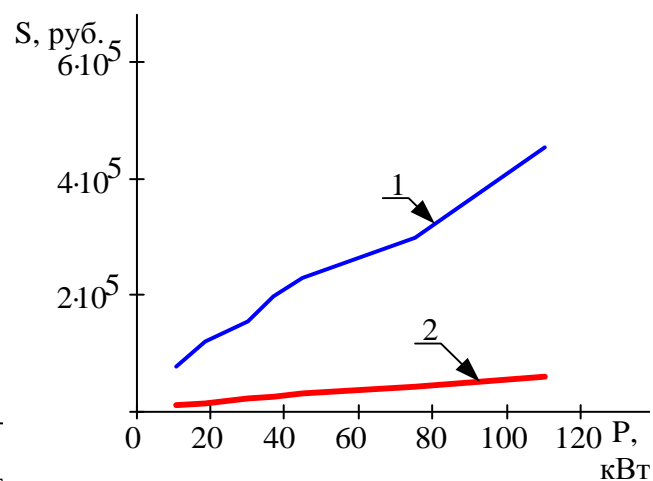
а)



б)



в)



г)

Рис. 1.5 Графическое представление отличия стоимости 1 – ПЧ от 2 – УПП для различных фирм производителей: а) ООО «Звезда-Электроника»; б) Emotron; в) ABB; г) Siemens

Из рис. 1.5 видно, что стоимость ПЧ значительно выше по сравнению с УПП, невзирая на фирму производителя: отечественного или зарубежного. Так для мощности 100 кВт за цену одного ПЧ можно купить до трех УПП. Если для конкретного производственного механизма по техническим требованиям для обеспечения мягкого пуска подходит УПП, то необходимо использовать его вместо ПЧ, вследствие более низкой стоимости.

Одним из основных факторов, влияющих на надежность ЭП является частота коммутации полупроводниковых ключей. Принимая допущение, что полупроводниковые элементы используемые на ПЧ и УПП эквивалентны по мощности и учитывая тот факт, что частота коммутации на один период для ПЧ значительно выше, то можно сделать вывод, что по этому фактору так же следует отдавать предпочтение УПП.

### **1.3. Проблемы построения замкнутых систем управления электроприводов по схеме ТРН – АД**

Существующие УПП обеспечивают плавный пуск двигателя за счет ограничения пускового тока или момента АД, либо регулируя интенсивность нарастания напряжения, тем самым достигается уменьшения ударных нагрузок на механизм. Данные способы регулирования не обеспечивают постоянство разгона при изменении параметров двигателя, изменении момента нагрузки на валу двигателя, момента инерции, что для некоторых механизмов является необходимым требованием. Так для механизмов с вентиляторным характером нагрузки электропривод способен устойчиво работать на низких скоростях, а при незначительном изменении вышеуказанных параметров может привести к значительным изменениям скорости [26].

Для системы управления по схеме ТРН – АД при работе двигателя выше критического скольжения необходимо вводить обратную связь по скорости [26, 27]. А так же во время пуска ЭП с регулированием напряжения могут возникнуть колебания скорости и момента на скоростях, близких к синхронным.

Основной задачей регулирования в замкнутых системах управления является отработка задающего сигнала. За счет отрицательной обратной связи происходит корректировка управляющего сигнала блоком управления, в состав которого входят различные регуляторы.



На сегодняшний день получили широкое распространение такие регуляторы, как:

- Пропорциональный регулятор (П – регулятор);
- Интегральный регулятор (И – регулятор);
- Дифференциальный регулятор (Д – регулятор);
- Пропорционально – интегральный регулятор (ПИ – регулятор);
- Пропорционально – дифференциальный регулятор (ПД – регулятор);
- ПИД – регулятор.

Замкнутые контуры регулирования настраиваются с применением типовых методик:

- Модульный оптимум;
- Симметричный оптимум.

Функциональная схема асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с обратной связью от датчика скорости представлена на рис. 1.6.

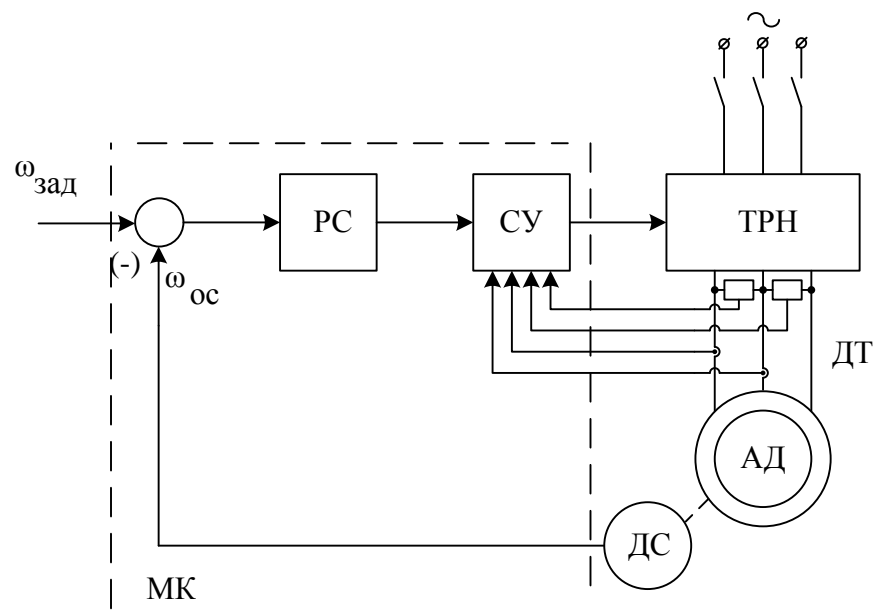


Рис. 1.6 Функциональная схема асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с обратной связью от датчика скорости

Функциональная схема асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с обратной связью по скорости состоит из таких блоков, как: микропроцессор

(МК), регулятор скорости (РС) и система управления (СУ); тиристорный регулятор напряжения (ТРН), асинхронный двигатель (АД), датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН) статора [28]. В данной схеме обратная связь организуется от датчика скорости (ДС). Работа МК заключается в том, чтобы выработать закон управления открытия тириستоров в ТРН согласно заданной скорости  $\omega_{\text{зАД}}$ . Закон управления формируется за счет данных с ДС, ДН, ДТ.

Для оценки работоспособности электропривода по системе ТРН – АД необходимо провести сравнительный анализ статических механических характеристик для замкнутого и разомкнутого асинхронного электропривода.

Согласно [29] уравнение, описывающее статические механические характеристики замкнутого асинхронного ЭП по схеме ТРН-АД с датчиком скорости (ДС) имеет вид:

$$\omega(M) = \omega_0 - \frac{M}{\beta}, \quad (1.1)$$

где  $\omega_0$  - скорость идеального холостого хода,  $\beta$  – модуль жесткости механической характеристики,  $M$  – электромагнитный момент двигателя.

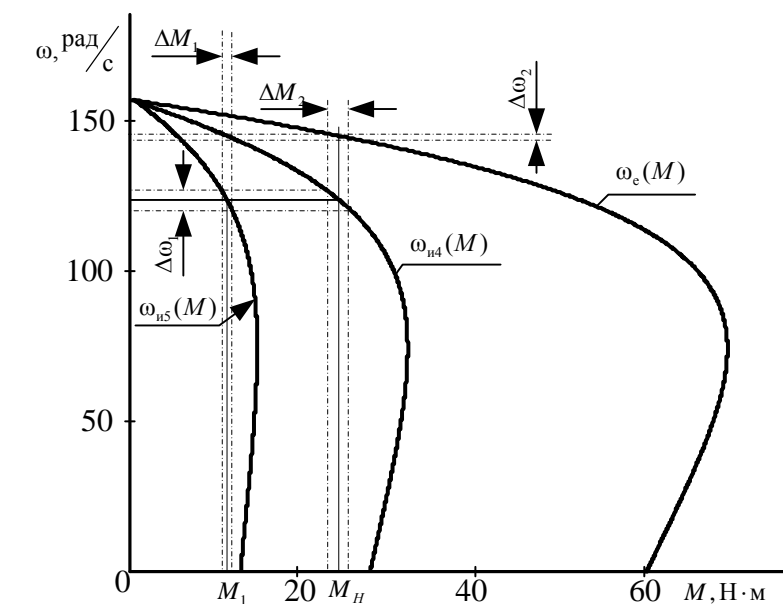
Для поддержания электроприводом скорости при различных значениях момента необходимо проверить жесткость механических характеристик для разомкнутой и замкнутой системы [28]

Жесткость механической характеристики определяется по формуле [29]:

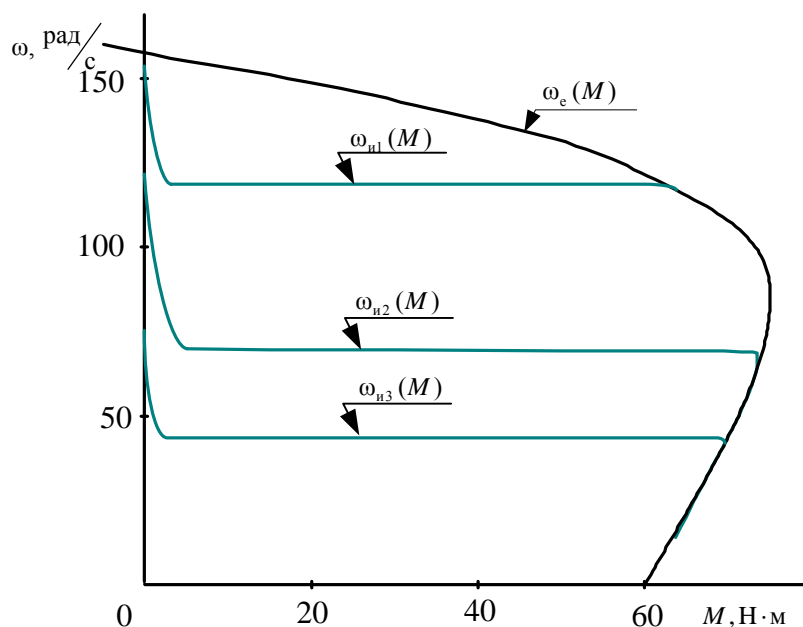
$$\beta = \frac{dM}{d\omega}, [\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}]$$

где  $dM$  - приращение момента,  $d\omega$  - приращение скорости. Чем больше жесткость  $\beta$  характеристики, тем лучше система поддерживает постоянство скорости.

Механические характеристики для разомкнутой и замкнутой системы ТРН – АД представлены на рис. 1.7.



а)



б)

Рис. 1.7 Механическая характеристика а) разомкнутого и б) замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД на основе электродвигателя АИМ А-100L4, мощностью 4 кВт:  $\omega_{нj}(M)$  - искусственные механические характеристики при скорости задания 120 рад/с, 70 рад/с, 40 рад/с, напряжения задания 150 В, 120 В;  $\omega_e(M)$  - естественная механическая характеристика,  $\Delta\omega_j, \Delta M_j$  - приращение скорости и момента для вычисления коэффициента жесткости  $j$ -й характеристики.

Из рис. 1.7 видно, что жесткость механической характеристики выше в замкнутом асинхронном электроприводе по схеме ТРН – АД. Сравнение коэффициента жесткости для замкнутого и разомкнутого АЭП по схеме ТРН – АД для естественной и искусственной характеристики представлена в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Сравнительная таблица коэффициента жесткости для замкнутой и разомкнутой системы электропривода ТРН – АД с двигателем АИМ А-100L4, мощностью 4 кВт

	Замкнутая схема		Разомкнутая схема	
	$\omega_{зад} = 120 \text{ рад/с}$	$\omega_{зад} = 70 \text{ рад/с}$	$U_{зад} = 150 \text{ В}$	$U_{зад} = 120 \text{ В}$
Коэффициент жесткости	37,2	38,57	0,466	0,255

Функциональная схема асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД, замкнутого по сигналу с наблюдателя скорости (НС) представлена на рис. 1.8

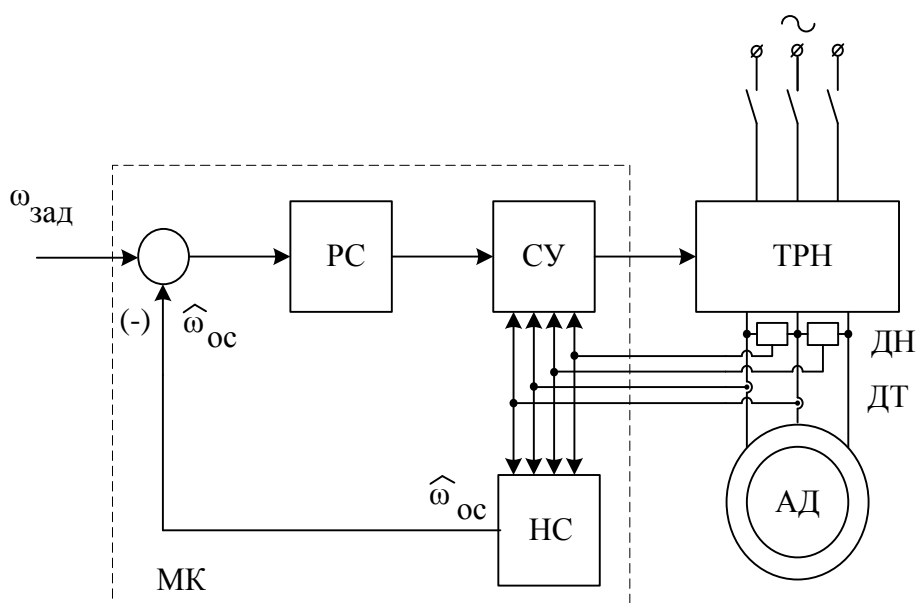


Рис. 1.8 Функциональная схема асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с обратной связью от наблюдателя скорости

Данная функциональная схема отличается от предыдущей тем, что вместо ДС используется НС, использующий данные с ДТ и ДН. Принцип работы аналогичен.

Таким образом, основными проблемами построения замкнутых по скорости систем управления электроприводов по схеме ТРН – АД связаны с выбором регулятора, его настройка и точностью оценивания скорости вращения вала двигателя с помощью наблюдателя угловой скорости ротора.

#### **1.4. Способы косвенной оценки скорости вращения ротора асинхронного двигателя**

Как описывалось ранее, использование УПП с обратной связью по скорости значительно увеличивает жесткость механических характеристик и позволяет поддерживать постоянство разгона электропривода, несмотря на изменение нагрузки на валу двигателя. Использование наблюдателей скорости позволит значительно уменьшить количество отказов оборудования из-за отсутствия ДС, уменьшить его габариты, улучшить управляемость, устойчивость к воздействию шумов, имеются экономические выгоды [26]

На сегодняшний день, благодаря развитию микропроцессорной техники, широкое распространение получили такие методы оценивания:

- Оценка скорости на основе уравнений Люенбергера [30, 31];
- Вычисление скорости на основе фильтра Калмана [26, 31 - 33];
- Вычисление скорости с использованием нейронных сетей [26, 28].

Методы оценивания, основу которых составляют наблюдатели Люенбергера и фильтры Калмана обладают высокой точностью оценивания скорости вращения вала асинхронного двигателя и могут позволить оценить координаты электропривода. Но данные способы вычисления сложны в реализации и настройке, так как основаны на использовании математической модели асинхронного электропривода и чаще всего используются в системе с векторным управлением [26, 30 – 33].

Вычисление скорости с использованием нейронных сетей обладает высокой точностью оценки скорости двигателя [27, 34-37]. Помимо этого ИНС обладает робастностью при изменении параметров двигателя [38 - 50]. С использованием нейронной сети можно дополнительно оценить ряд других переменных двигателя [51]. Достоинством ИНС является так же самообучаемость и возможность использования в качестве нейроконтроллеров при управлении сложными динамическими объектами. Недостаток ИНС – сложность их алгоритмов, но за счет постоянного развития микропроцессорной техники и программного обеспечения данный недостаток является не столь актуальным [4, 7, 26, 28].

## 1.5. Выводы по первой главе

Результаты проведенного анализа состояния теоретических исследований и практических работ по тематике диссертации показали:

1. Развитие микропроцессорной техники привело к тому, что появилась возможность реализовать алгоритмы управления асинхронным двигателем практически любой степени сложности и обеспечить выполнение любых требуемых функций, в частности системой управления АД по схеме ТРН - АД.

2. Для механизмов, требования технической эксплуатации которых предусматривают «мягкий» пуск, применять устройства плавного пуска экономически целесообразно по сравнению с частотными преобразователями той же мощности.

3. Показано, что статические характеристики замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД имеют нелинейный характер и обладают большей жесткостью на рабочем участке по сравнению с аналогичными характеристиками разомкнутого электропривода.

4. Показано, что построить замкнутую систему асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД возможно с применением наблюдателя скорости, на вход которого подаются сигналы с датчиков токов и напряжений статора, а на выходе формируется сигнал обратной связи по оценке угловой скорости ротора асинхронного двигателя  $\hat{\omega}$ .

## 2. РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

### 2.1. Модель искусственного нейрона

Искусственные нейронные сети (ИНС) в настоящее время нашли широкое применение в таких отраслях как автономное управление, робототехника, планирование снабжения, вычислительная техника и многих других. ИНС, имитируя работу головного мозга человека, обладают огромным спектром задач, в который входит прогнозирование, идентификация, аппроксимация, управление [52, 53].

ИНС состоит из сети нейронов, которая в свою очередь имитирует работу головного мозга человека, представляет собой высокоэффективную, комплексную, нелинейную, существенно параллельную систему обработки информации. Работа нейронов происходит таким образом, что реализация воспроизведения образа, его распознавание и управление во много раз быстрее, чем выполнение этих же задач самыми современными компьютерами [54, 55].

Опишем построение модели искусственного нейрона.

Входные сигналы  $X_N$ , поступающие на блоки, масштабируются собственным весовым коэффициентом  $W_N$ . По аналогии с терминологией принятой в нейрофизиологии будем утверждать, что возбудительные синапсы соответствуют положительным значениям весовых коэффициентов  $W_N$ , а тормозные синапсы - отрицательным. После проведения масштабирования с принятыми коэффициентами  $W_N$  входные сигналы искусственного нейрона суммируются на элементе сложения  $S$ , а результат сложения подвергается преобразованию с помощью активационной функции  $F(S)$ . В общем случае для некоторых функций активации полезным оказывается в модель нейрона включать сдвиг  $b$  [56].



На рис. 2.1 изображена структура искусственного нейрона.

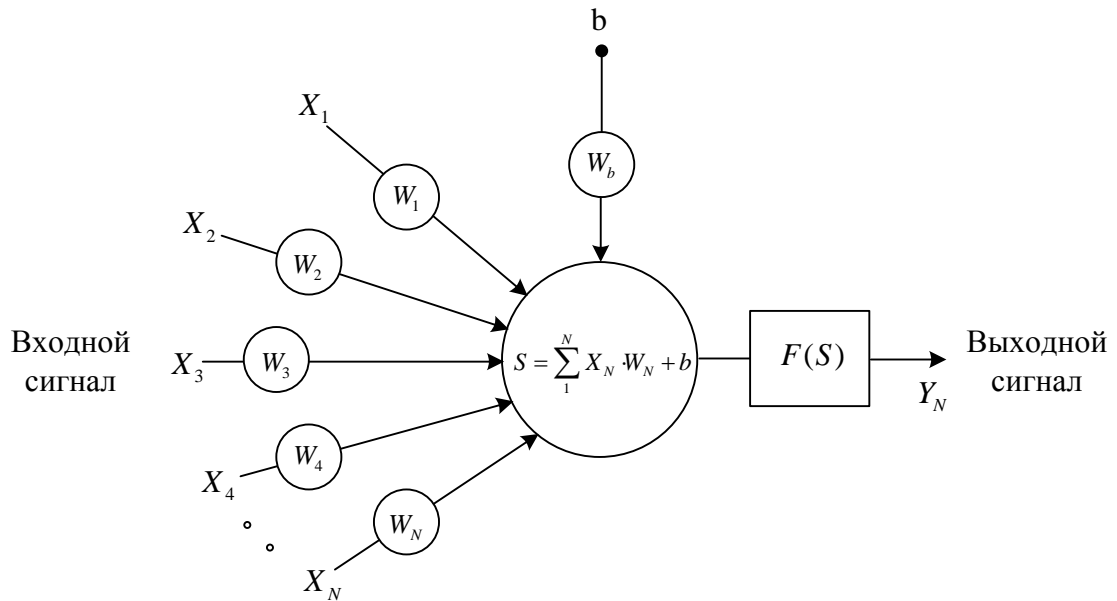


Рис. 2.1 Структура искусственного нейрона

Математическую модель нейрона можно описать следующим образом:

$$S = \sum_{n=1}^N X_n \cdot W_n + b;$$

$$Y = F(S);$$

где  $X_1, X_2, \dots, X_N$  – входные сигналы нейрона;  $W_1, W_2, \dots, W_N$  – синаптические веса нейронов;  $b$  – сдвиг;  $F(S)$  – активационная функция;  $Y$  – выходной сигнал нейрона.

Активационная функция нейрона  $F(S)$  определяет нелинейное преобразование, выполняемое нейроном. На сегодняшний момент известно множество видов активационных функций, но наибольшее распространение получили следующие четыре [56]:

1. Пороговая функция (ПФ). Графическое представление данной функции приведено на рис. 2.2, б. Функция записывается следующим образом:

$$F(S) = \begin{cases} 1, & \text{если } S \geq 0 \\ 0, & \text{если } S < 0 \end{cases}.$$

2. Линейная функция (ЛФ). Графическое представление данной функции приведено на рис. 2.2, а. Функция записывается следующим образом:

$$F(S) = \begin{cases} 1, & \text{если } S \geq a \\ S, & \text{если } a > S > -a. \\ -1, & \text{если } S < -a \end{cases}$$

В диссертации будет представлена линейная функция активации частного типа, когда  $F(S) = S$ . И использоваться в выходном слое ИНС. Данная функция имеет неограниченный линейный участок.

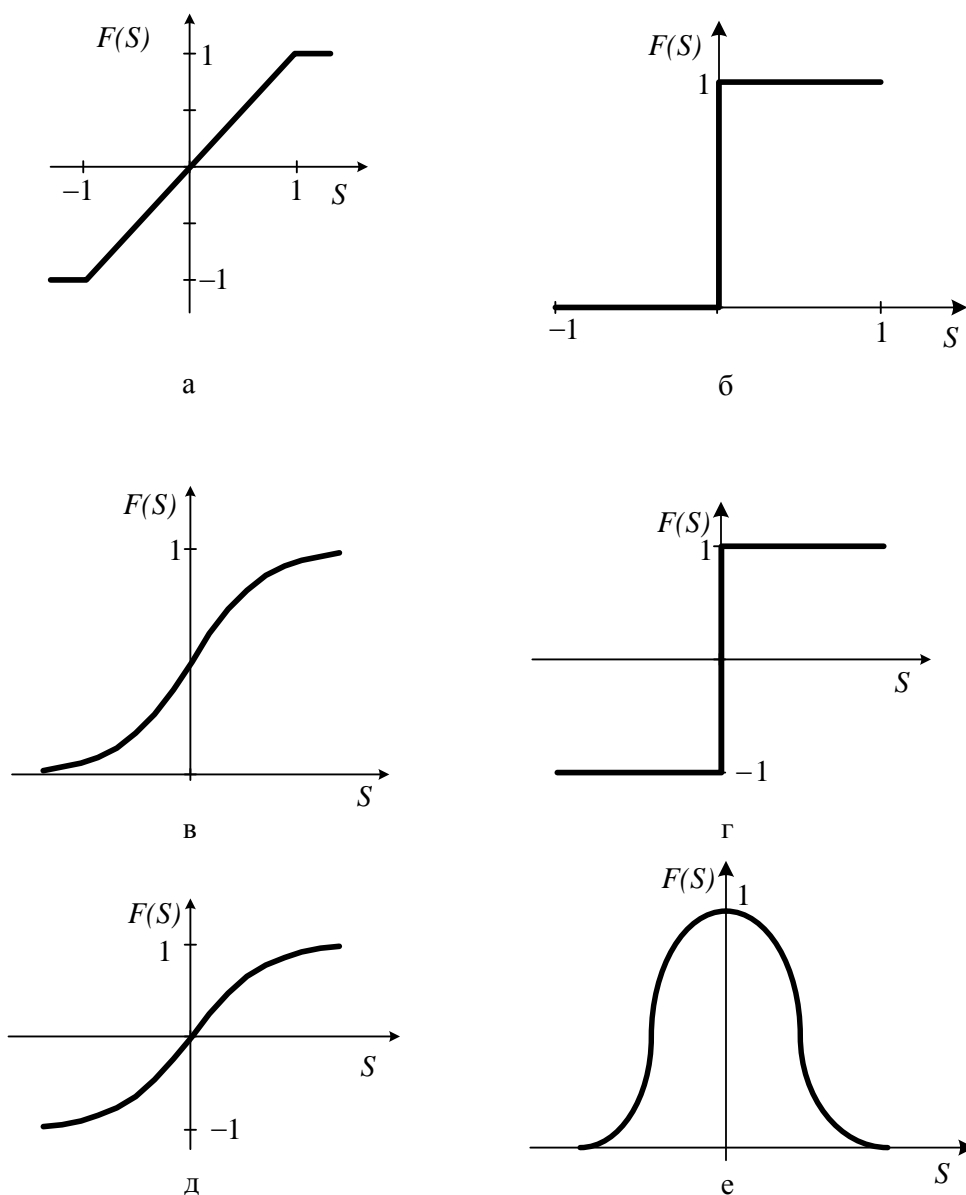


Рис. 2.2 Типы активационной функций.

а) – линейная; б), г) – пороговая; в) – сигмоидальная; д) – тангенциальная; е) – радиально-базисная активационные функции

3. Сигмоидальная функция (СФ). Функция записывается следующим образом:

$$F(S) = \frac{1}{1 + e^{-as}},$$

где  $a$  – параметр, определяющий наклон функции.

Данная активационная функция получила наибольшее распространение. Она аналогична пороговой функции, но везде строго и монотонно возрастающей, непрерывной и дифференцируемой (рис. 2.2, в). Дифференцируемость этой функции является незаменимым качеством для анализа ИНС и некоторых методов их обучения [56].

Аналогом сигмоидальной функции является тангенциальная функция активации, обладающая аналогичными свойствами. Графическое представление данной функции приведено на рис. 2.2, д. Функция записывается следующим образом:

$$F(S) = \frac{e^S - e^{-S}}{e^S + e^{-S}}.$$

Нечетность тангенциальной функции активации позволяет ей решать задачи управления. Данная функция часто используется для создания внутреннего слоя ИНС.

4. Радиально-базисная активационная функция (РБФ). Графическое представление данной функции приведено на рис. 2.2, е.

В РБФ-сетях и в качестве активационной функции использовали функцию Гаусса [58]

$$F(S) = e^{-\frac{S^2}{\sigma^2}}.$$

Аргумент  $S$  рассчитывается по формуле [58]:

$$S = \|z - c\|,$$

где  $z$  – вектор входных сигналов нейрона;  $c$  – вектор координат центра окна активационной функции;  $\sigma$  – ширина окна; норма  $\|\cdot\|$  – евклидово расстояние.

Таким образом активационная функция РБФ в математической форме записывается как  $F(S) = F(\|z - c\|)$ .

## **2.2. Классификация искусственных нейронных сетей**

ИНС – математическая модель представленная в форме программной и/или аппаратной реализации, построенная по подобию биологических нейронных сетей.

Искусственные нейронные сети можно разделить на два больших класса, в зависимости от количества слоев в сети:

- Однослойные ИНС [1, 56];
- Многослойные ИНС [1, 56].

Архитектура однослойной ИНС представлена на рис. 2.3.

Однослойная нейронная сеть состоит из входного слоя и выходного. Входной слой нейронов не преобразует сигнал, а только его ретранслирует. Выходной слой преобразует сигнал и образует реакцию сети, следовательно, нейронная сеть является однослойной, а не двухслойной. Размер нейронной сети формируется количеством нейронов в выходном слое [1, 56].

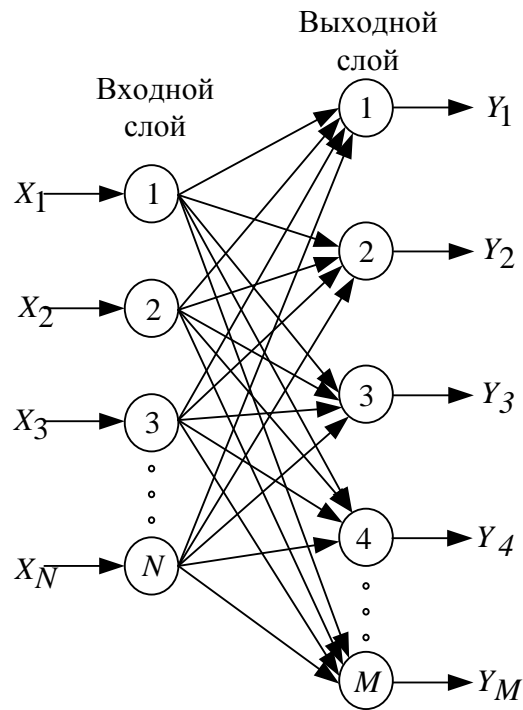


Рис. 2.3. Архитектура однослойной ИНС

Многослойной ИНС называется такая сеть, которая состоит из одного или более скрытых слоев, осуществляющих преобразование информации. Наличие скрытых слоев в сети позволяет производить нелинейные преобразования любой сложности и выделять из входных данных корреляционные взаимосвязи. На рис. 2.4 представлена архитектура многослойной нейронной сети, состоящей из 2 слоев,  $N$  входных нейронов,  $M$  нейронов скрытого слоя,  $Z$  нейронов выходного слоя. Соответственно, данную сеть можно описать как  $N$ - $M$ - $Z$  [1, 56]. Например нейронная сеть 13–35–1 имеет 13 нейронов во входном слое, 35 – в скрытом, 1 – в выходном.

Маркировка синаптических весов в многослойных нейронных сетях представляется следующим образом:  $W_{j,k}$ , где  $j$  – номер нейрона, который формирует синаптический вес,  $k$  – номер нейрона, в который он передается.

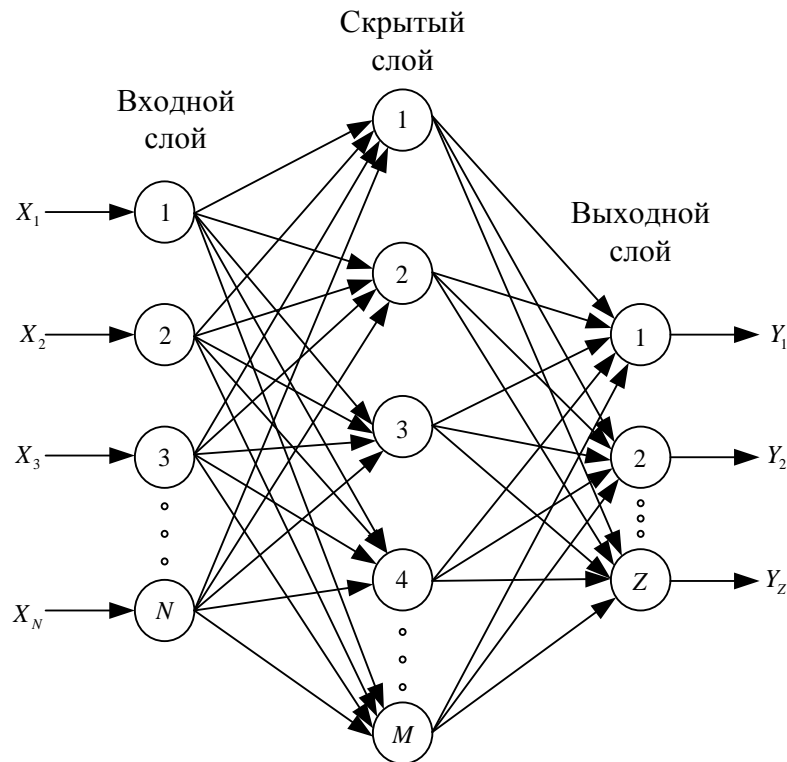


Рис. 2.4. Архитектура многослойной нейронной сети

На рис. 2.4. изображена полностью связанная ИНС, так как каждый нейрон одного слоя связан со всеми нейронами второго слоя. На сегодняшний день известны также частично связанные ИНС, в которых нейроны одного слоя связаны только с определенными нейронами второго слоя [56].

Не существует ограничений на выбор активационной функции нейронов в слое ИНС, однако, практика показывает, что чаще всего выбирают нейроны одного и того же типа в слое ИНС. Нейроны выходного слоя – имеют линейную функцию активации.

Многослойные ИНС широко используются в таких задачах как распознавание образов, аппроксимация, классификация и управление.

Количество нейронов во входном и выходном слое четко определяется спецификой решаемой задачи.

Согласно [58] количество нейронов в скрытом слое характеризует общее количество связей, которое для достижения наилучшего обучения ИНС должно быть минимально. Разделяют два способа настройки числа нейронов

в скрытом слое в процессе обучения: алгоритмы редукции (алгоритмы сокращения) и алгоритмы наращивания (конструктивные алгоритмы) [53, 59].

При создании нейронной сети с помощью алгоритма редукции выбирается избыточная архитектура сети, которая в процессе обучения исключает наименее значимые нейроны и веса. Данный алгоритм имеет ряд недостатков: 1) не существует определенной методики выбора предельного количества нейронов в скрытом слое; 2) из-за избыточного количества нейронов в слое обучение ИНС идет медленно.

Совершенно противоположный способ настройки сети имеет алгоритм наращивания. Для создания ИНС выбирается минимальное количества нейронов в скрытом слое, далее это число увеличивается в процессе развития нейронной сети. Данный способ создания сети является долговременным, но именно этот метод получил наибольшее распространение [53, 58, 59].

Излишне мощная ИНС, т.е. имеющая избыточное количество нейронов в скрытом слое, более склонна к переобучению, чем нейронная сеть с меньшим количеством нейронов в скрытом слое.

### **2.3. Динамические нейронные сети**

Динамическими нейронными сетями называются сети, содержащие в себе задержки по входу и/или выходу, благодаря которым ИНС может обрабатывать данные сложных динамических объектов.

К числу динамических нейронных сетей можно отнести:

- Динамическая ИНС с задержками по входу [60];
- Сети Джордана [61];
- Сети Элмана [62];
- Комбинированные динамические ИНС [56, 63].

На рис. 2.5 представлена архитектура ИНС задержками по входу. Данная сеть является многослойной с элементами задержки на один такт

входных векторов. Динамическая сеть, организованная по такому принципу, увеличивает количество нейронов во входном слое [60].

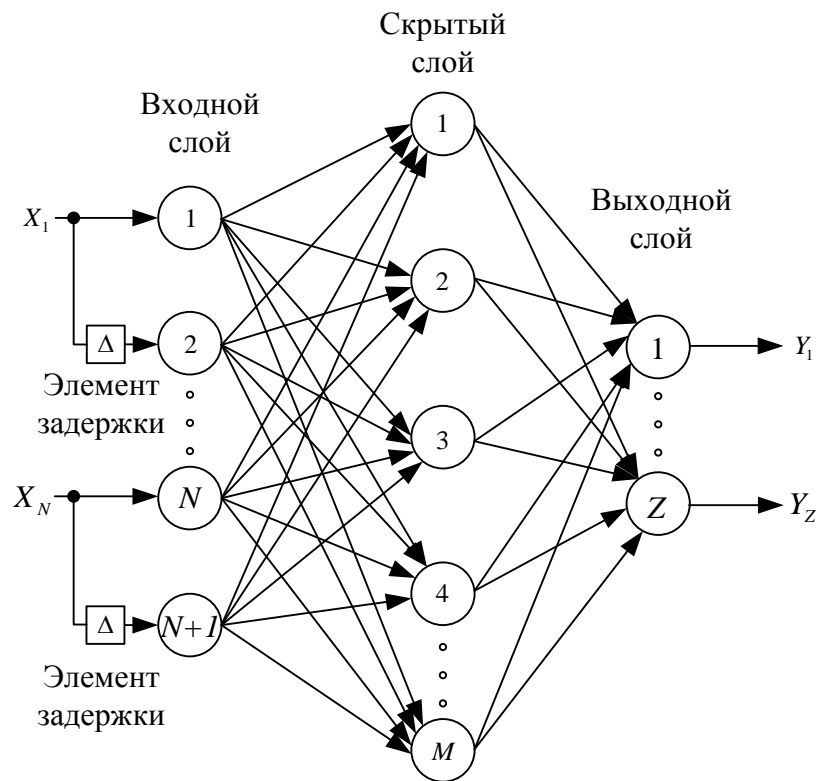


Рис. 2.5. Архитектура динамической ИНС с задержками по входу

На рис. 2.6 представлена архитектура сети Джордана. Сеть Джордана представляет собой многослойную нейронную сеть, входной слой которой состоит из входного вектора данных и выходного вектора с задержками на один или несколько тактов [61].



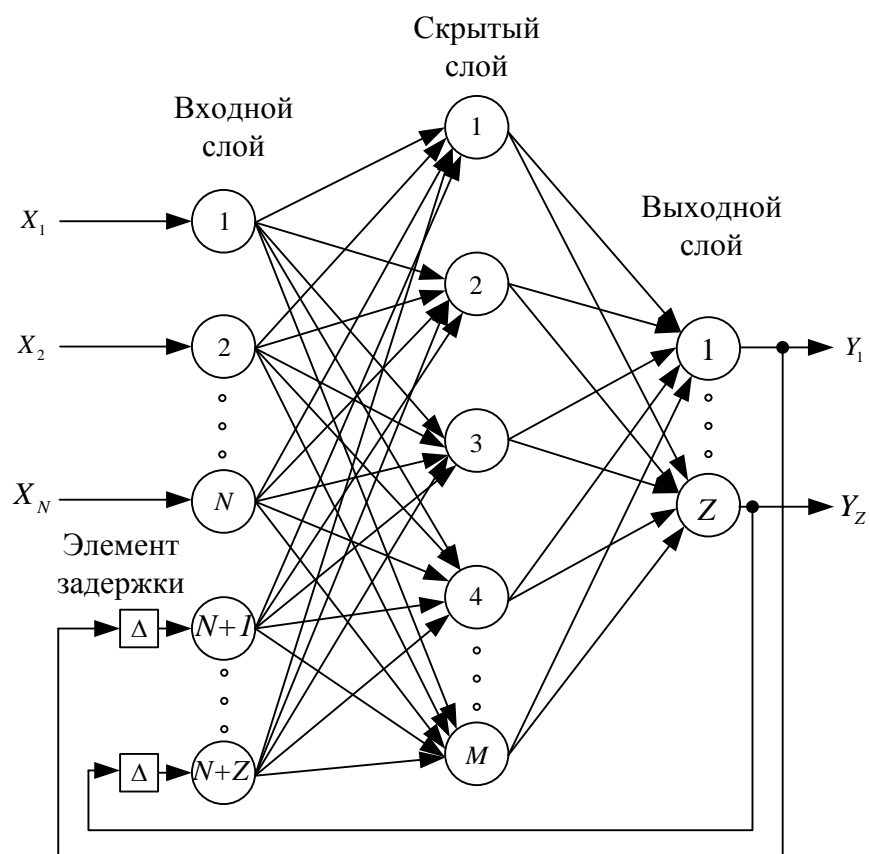


Рис. 2.6. Архитектура ИНС Джордана

На рис. 2.7 представлена архитектура сети Элмана, принцип работы которого аналогичен с сетью Джордана, за исключением того, что обратная связь организуется нейронами скрытого слоя [62].

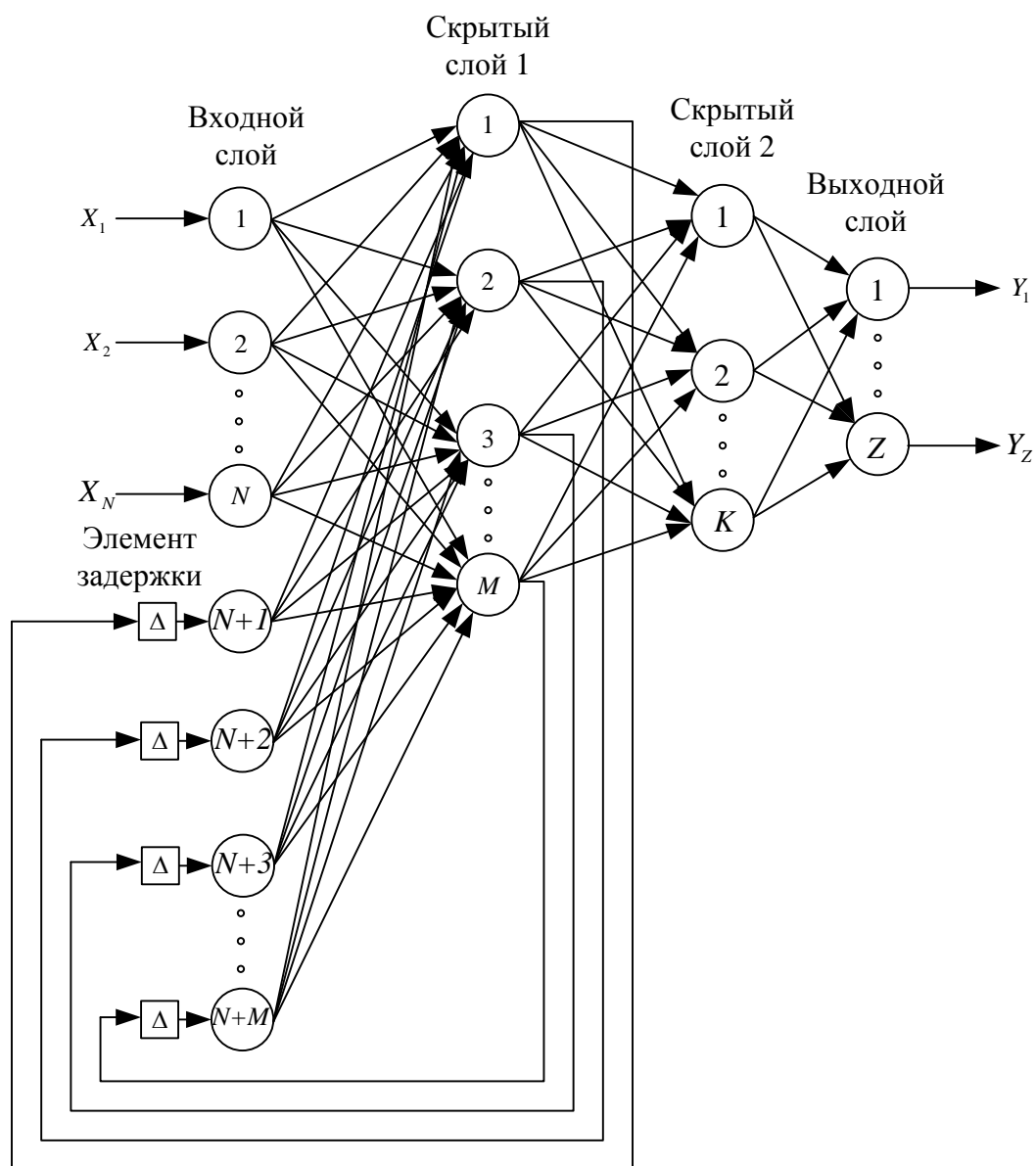


Рис. 2.7. Архитектура ИНС Элмана

На рис. 2.8 представлена архитектура комбинированной ИНС. Нейронная сеть, созданная по такому принципу, обладает задержками, как по входу, так и по выходу. Данная сеть значительно сложнее предыдущих, но гораздо лучше подходит для оценки параметров и переменных состояния сложных нелинейных динамических объектов, таких как асинхронный электродвигатель [56, 63].

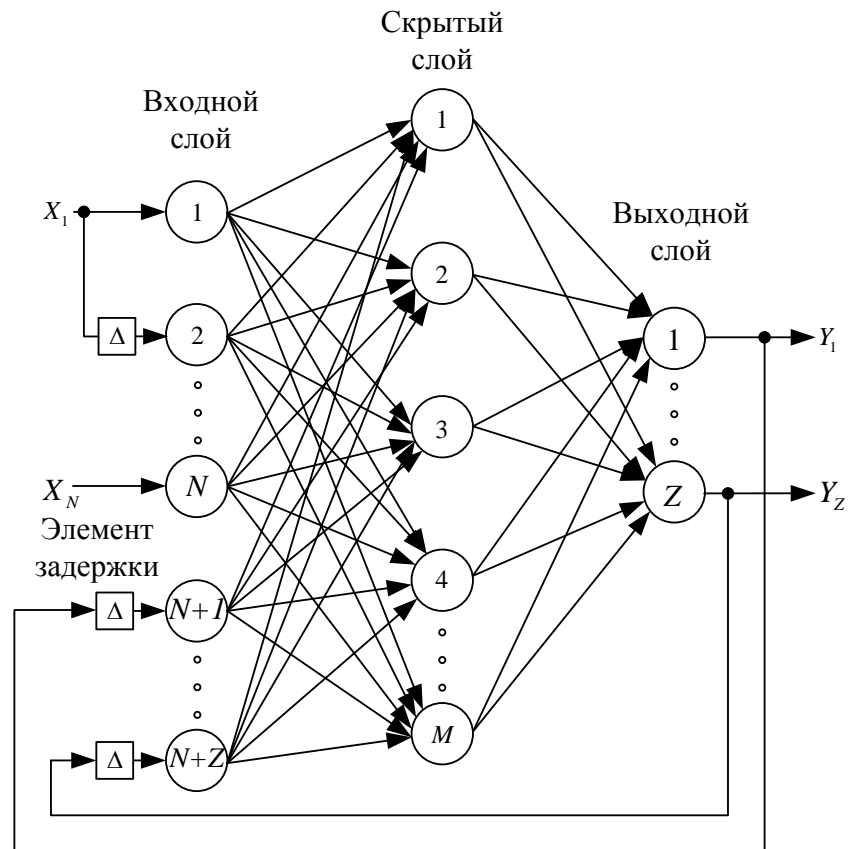


Рис. 2.8. Архитектура комбинированной динамической ИНС

Динамические нейронные сети, благодаря элементам задержки, способны запоминать предысторию наблюдаемого процесса и прогнозировать его развитие.

В таблице 2.1 представлены достоинства и недостатки 4-х типов динамических нейронных сетей

Таблица 2.1. Достоинства и недостатки 4-х типов динамических нейронных сетей

№	Название динамической ИНС	Достоинства	Недостатки
1	Динамические ИНС с задержками по входу	1. Способны запоминать предысторию наблюдаемого процесса и прогнозировать его развитие; 2. Проста в создании.	1. Необходимость согласования частоты дискретизации с временем задержки.
2	Сети Джордана	1. Способны запоминать предысторию наблюдаемого процесса и прогнозировать его развитие; 2. Высокая способность к обобщению; 3. Проста в создании.	1. Необходимость согласования частоты дискретизации с временем задержки; 2. Повышенная продолжительность обучения ИНС; 3. Необходима достаточно высокая способность к аппроксимации при использовании обратной связи с элементами задержки.

Продолжение таблицы 2.1.

№	Название динамической ИНС	Достоинства	Недостатки
3	Сети Элмана	<p>1. Способны запоминать предысторию наблюдаемого процесса и прогнозировать его развитие;</p> <p>2. Высокая способность к обобщению.</p>	<p>1. Необходимость согласования частоты дискретизации с временем задержки;</p> <p>2. Повышенная продолжительность обучения ИНС;</p> <p>3. В процессе обучения склонна к преждевременной сходимости к локальному минимуму целевой функции;</p> <p>4. Избыточное количество внутренних связей;</p> <p>5. Необходима достаточно высокая способность к аппроксимации при использовании обратной связи с элементами задержки.</p>

Продолжение таблицы 2.1.

№	Название динамической ИНС	Достоинства	Недостатки
4	Комбинированные динамические ИНС	<p>1. Способны запоминать предысторию наблюдаемого процесса и прогнозировать его развитие;</p> <p>2. Высокая способность к обобщению;</p> <p>3. Наиболее подходит для идентификации параметров и переменных состояния сложных нелинейных многосвязных динамических объектов.</p>	<p>1. Необходимость согласования частоты дискретизации с временем задержки;</p> <p>2. Наибольшая по сравнению с другими вариантами динамических ИНС продолжительность обучения;</p> <p>3. Необходима достаточно высокая способность к аппроксимации при использовании обратной связи с элементами задержки.</p>

Для оценки параметров и переменных состояния асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД, который является сложным нелинейным динамическим объектом, лучше всего подходят комбинированные динамические нейронные сети, так как, имея недостатки, перечисленные в таблице 2.1, обладают довольно весомыми достоинствами. Первый тип динамических ИНС не подходит, так как не обладает достаточными обобщающими свойствами и не является нечувствительным к изменению параметров динамического объекта за счет отсутствия задержанных обратных связей. Второй тип ИНС (сеть Джордана) отклонен из-за того, что ИНС не обладает чувствительностью к изменению формы входных сигналов,

что является актуальным при импульсно-фазовом регулировании переменного напряжения в электроприводах по схеме ТРН – АД. Самым большим недостатком ИНС третьего типа (сети Элмана) является склонность к преждевременной сходимости к локальному минимуму целевой функции.

Комбинированные динамические ИНС представляется наиболее предпочтительным для решения задач оценивания угловой скорости вращения вала асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД, в связи с тем, что такие ИНС обладают высокой способностью к обобщению и наиболее подходят к идентификации параметров и переменных состояния сложных нелинейных многосвязных динамических объектов.

#### **2.4. Особенности создания нейросетевого наблюдателя для оценки состояния динамических объектов**

Немаловажным фактором при обучении ИНС является тренировочная выборка. Слишком большой тренировочный набор может привести к длительному процессу обучения и преждевременной сходимости к локальному минимуму целевой функции.

В [56] указан процесс прореживания выборки за счет удаления одинаковых и/или близких друг к другу данных. Суть данного процесса уменьшения объема тренировочного набора состоит в том, чтобы удалить данные, не удовлетворяющие следующему условию [56]:

$$\|z_i - z_j\| \geq \varepsilon_{\min}; j = \overline{1, N}; i \neq j,$$

где  $z$  – входные данные тренировочного набора,  $N$  – количество данных в тренировочном наборе,  $\varepsilon_{\min}$  – радиус сжатия, показывающий минимально допустимое расстояние между двумя тренировочными наборами ИНС, обусловленное погрешностью измерительных приборов.

Данный способ сжатия не гарантирует постоянство частоты дискретизации, что может являться препятствием при обучении динамических нейронных сетей с равномерными задержками по входу и

выходу. Избежать этого недостатка позволяет альтернативный метод на основе расчета евклидова расстояния между векторами, входящими в тренировочный набор ИНС [64, 65]. Расчет евклидова расстояния является наиболее распространенной процедурой в кластерном анализе, потому что оно характеризует геометрическое расстояние между двумя точками и в случае двухмерной системы координат может быть вычислено с использованием классической теоремы Пифагора [64, 65].

Формула евклидова расстояния между векторами, входящими в тренировочный набор ИНС, в общем случае имеет вид [65]:

$$l_{ij} = \sqrt{(z_{i1} - z_{j1})^2 + (z_{i2} - z_{j2})^2 + \dots + (z_{iN} - z_{jN})^2},$$

где  $l_{ij}$  – евклидово расстояние между векторами  $Z_i$  и  $Z_j$  тренировочного набора ИНС;  $z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iN}$  – компоненты вектора  $Z_i$   $i$ -го столбца массива тренировочного набора;  $z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jN}$  – компоненты вектора  $Z_j$   $j$ -го столбца массива тренировочного набора.

Евклидово расстояние целесообразно использовать в случае, когда вектора  $Z_i$ ,  $Z_j$  и все их компоненты однородны по своему физическому смыслу [64], следовательно, перед началом процедура прореживания необходимо произвести нормирование данных, входящих в тренировочный набор.

В случае, когда компоненты  $z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iN}$  и  $z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jN}$  векторов  $Z_i$ ,  $Z_j$  тренировочного набора не однородны, то следует определять евклидово расстояние между однородными компонентами векторов  $l_{ij}^k, k = \overline{1, m}$ , где  $m$  – количество групп однородных по физическому смыслу компонентов векторов тренировочного набора, причем  $m \leq N$ . Тогда евклидово расстояние между векторами рассчитывается в виде:

$$l_{ij} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^m l_{ij}^k$$

Условие сжатия в этом случае следующее:



$$\varepsilon_{\min} \leq l_{ij} \leq \varepsilon_{\max},$$

где  $\varepsilon_{\max}$  – радиус сжатия, показывающий максимальное допустимое расстояние между двумя тренировочными наборами, обусловленное постоянными времени объекта наблюдения, в данном случае асинхронного электродвигателя.

Процедура сжатия тренировочного набора обязательна в случае излишне большого объема экспериментальных данных. Размер тренировочного набора при обучении динамических ИНС не может быть слишком мал, так как нейронная сеть должна найти корреляционные связи между переменными состояниями во всех динамических режимах наблюдаемого объекта. Размер тренировочного набора не должен быть слишком велик, так как это значительно затягивает продолжительность обучения ИНС. На практике после отработки процедуры сжатия данных реальный размер тренировочного набора динамической ИНС не является избыточным, с одной стороны, и обеспечивает нахождение всех корреляционных связей, с другой стороны.

## **2.5. Математическая модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат $\alpha\beta$**

Для описания математической модели асинхронного двигателя в двухфазной системе координат  $\alpha\beta$ , необходимо использовать дифференциальные уравнения обобщенной двухфазной машины переменного тока, которые были получены исходя из следующих допущений: не учитываются потери в стали и насыщения магнитной цепи, воздушный зазор равномерный, питание происходит от системы симметричных синусоидальных напряжений.

Уравнения напряжения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат имеет вид [66]:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{1\alpha\beta}, \\ 0 &= R_2' \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + p \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta} - j \cdot \omega_{\text{эл.р}} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta},\end{aligned}$$

где  $R_2'$  – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора,  $R_1$  – сопротивление обмотки статора,  $\omega_{\text{эл.р}}$  – электрическая частота вращения ротора.

Вектора потокоцеплений в любой системе координат имеют вид [66]:

$$\begin{aligned}\vec{\Psi}_1 &= L_1 \cdot \vec{I}_1 + L_m \cdot \vec{I}_2, \\ \vec{\Psi}_2 &= L_2 \cdot \vec{I}_2 + L_m \cdot \vec{I}_1,\end{aligned}$$

где  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн;  $L_2 = L_{2\sigma}' + L_m$  – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн;  $L_{1\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн;  $L_{2\sigma}'$  – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн;  $L_m$  – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре двигателя, Гн.

Система уравнений напряжений асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат может быть представлена в векторной форме [66]:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{1\alpha\beta} &= R_1 \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + L_1 \cdot p \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} + L_m \cdot p \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta}; \\ 0 &= R_2' \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_2 \cdot p \cdot \vec{I}_{2\alpha\beta} + L_m \cdot p \cdot \vec{I}_{1\alpha\beta} - j \cdot \omega_{\text{эл.р}} \cdot \vec{\Psi}_{2\alpha\beta}.\end{aligned}$$

Для упрощения системы уравнения в векторной форме необходимо перейти к их проекциям на соответствующие оси ортогональной системы координат [66]:

$$\begin{aligned}
U_{1\alpha} &= R_1 \cdot i_{1\alpha} + L_1 \cdot p \cdot i_{1\alpha} + L_m \cdot p \cdot i_{2\alpha}; \\
U_{1\beta} &= R_1 \cdot i_{1\beta} + L_1 \cdot p \cdot i_{1\beta} + L_m \cdot p \cdot i_{2\beta}; \\
0 &= R_2' \cdot i_{2\alpha} + L_2 \cdot p \cdot i_{2\alpha} + L_m \cdot p \cdot i_{1\alpha} + \omega_{\text{эл.р}} \cdot \Psi_{2\beta}; \\
0 &= R_2' \cdot i_{2\beta} + L_2 \cdot p \cdot i_{2\beta} + L_m \cdot p \cdot i_{1\beta} - \omega_{\text{эл.р}} \cdot \Psi_{2\alpha}.
\end{aligned}$$

На рис. 2.9 представлена схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ . Данная схема может быть использована для исследования установившегося и переходных режимов для различной частоты и величины питающего напряжения, скорости вращения вала двигателя.

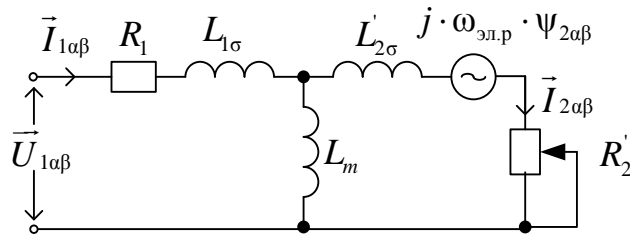


Рис. 2.9 Схема замещения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$ .

Уравнение описывающее электромагнитный момент двигателя имеет вид [66]:

$$M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}),$$

где  $z_p$  - число пар полюсов электродвигателя,  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  - проекции векторов тока на соответствующие оси ортогональной системы координат.

Система уравнений, описывающая работы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат  $\alpha\beta$  имеет вид [66]:

$$\begin{aligned}
\frac{di_{1\alpha}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}, \\
\frac{di_{1\beta}}{dt} &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta} - \frac{R_3}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\beta} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}, \\
\frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} &= -\frac{R_2'}{L_2} \cdot \psi_{2\alpha} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta}, \\
\frac{d\psi_{2\beta}}{dt} &= -\frac{R_2'}{L_2} \cdot \psi_{2\beta} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha}, \\
M_{\text{эм}} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}), \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c),
\end{aligned}$$

где  $U_{1\alpha}$  – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\alpha$  ортогональной системы координат  $\alpha\beta$ , В;  $U_{1\beta}$  – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\beta$  ортогональной системы координат  $\alpha\beta$ , В;  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  – составляющие тока статора в системе координат  $\alpha\beta$ , А;  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\psi_{2\beta}$  – составляющие потокосцепления ротора в системе координат  $\alpha\beta$ , Вб;  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя, Н·м;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$  – коэффициент рассеяния;  $J$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>.

В операторной форме система уравнений имеет вид [66]:

$$U_{1\alpha} = R_9 \cdot (T_9 \cdot p + 1) \cdot i_{1\alpha} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta},$$

$$U_{1\beta} = R_9 \cdot (T_9 \cdot p + 1) \cdot i_{1\beta} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha},$$

$$0 = (T_9 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_m \cdot i_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\beta},$$

$$0 = (T_9 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_m \cdot i_{1\beta} + \frac{L_2}{R_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \psi_{2\alpha},$$

$$M_{эм} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot i_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot i_{1\alpha}),$$

$$\omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{эм} - M_c),$$

$$\text{где } R_9 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}; \quad T_9 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_9}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'}.$$

## 2.6. Создание нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного двигателя

Создание нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора произведена для асинхронного двигателя включенного через автотрансформатор (АТ), представленного на рисунке 2.10. При данном включении двигателя появляется возможность регулирования питающего напряжения. Вначале замыкается рубильник Р1, затем Р2 [67, 68]. Данный способ регулирования позволяет ограничить пусковые токи.

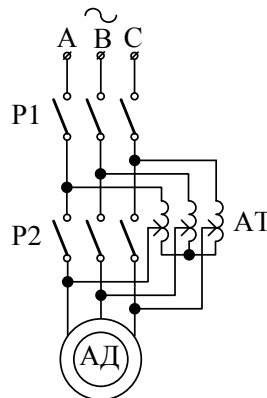


Рис. 2.10. Схема пуска асинхронного двигателя через автотрансформатор

Для создания нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного двигателя необходимо решить ряд таких задач как: выбор архитектуры ИНС, выбор количества нейронов во входном и выходном слоях, выбор функции активации и матрицы векторов данных тренировочного набора, которые будут использованы, а так же определение их размера.

Как указывалось в п. 2.3, наиболее предпочтительным вариантом для решения задачи оценивания угловой скорости такого сложного нелинейного динамического объекта, как асинхронный двигатель, являются комбинированные динамические ИНС, на входной слой которых поступают задержки как по входу, так и по выходу.

В качестве выборки данных для обучения нейросетевого наблюдателя следует использовать три фазных тока и напряжения статора асинхронного двигателя. В случае симметричной электрической машины фазные токи и напряжения имеют сдвиги по фазе, отличающиеся на  $120^0$ , следовательно, для полноты нахождения корреляционных связей между входными и выходными данными достаточно только сигналов с датчиков тока и напряжения двух фаз. Помимо данных с датчиков на вход нейросетевого наблюдателя подаются их задержки, а так же обратная связь с самого наблюдателя, т. е. оценка угловой скорости вращения вала двигателя. Период дискретизации для обучающей выборки составил 100 мкс.

Так как данные для обучения нейросетевого наблюдателя в последствии использовались для реального асинхронного двигателя, при этом частота дискретизации составляла 10 кГц, то и по результатам математического моделирования тренировочный набор так же необходимо было проредить. Способ прореживания описан в п. 2.5 данной диссертационной работы.

На рис. 2.11 представлена схема подготовки входных данных для нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электродвигателя.

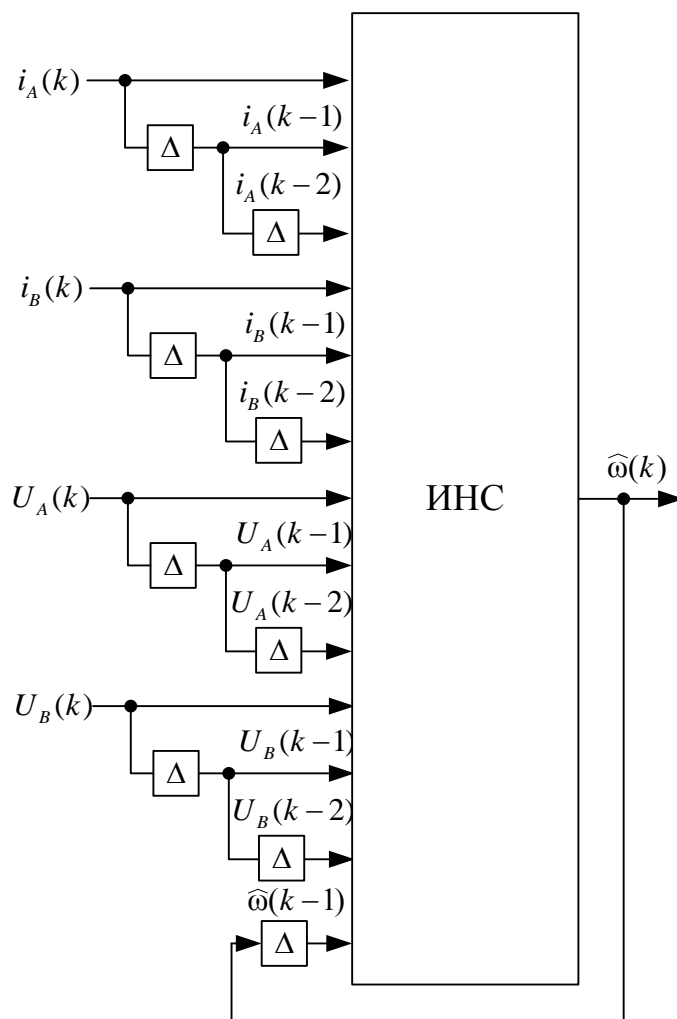


Рис. 2.11. Схема подготовки входных данных для нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электродвигателя

На рис. 2.12 представлена структура ИНС, предназначенная для определения оценки угловой скорости асинхронного двигателя.

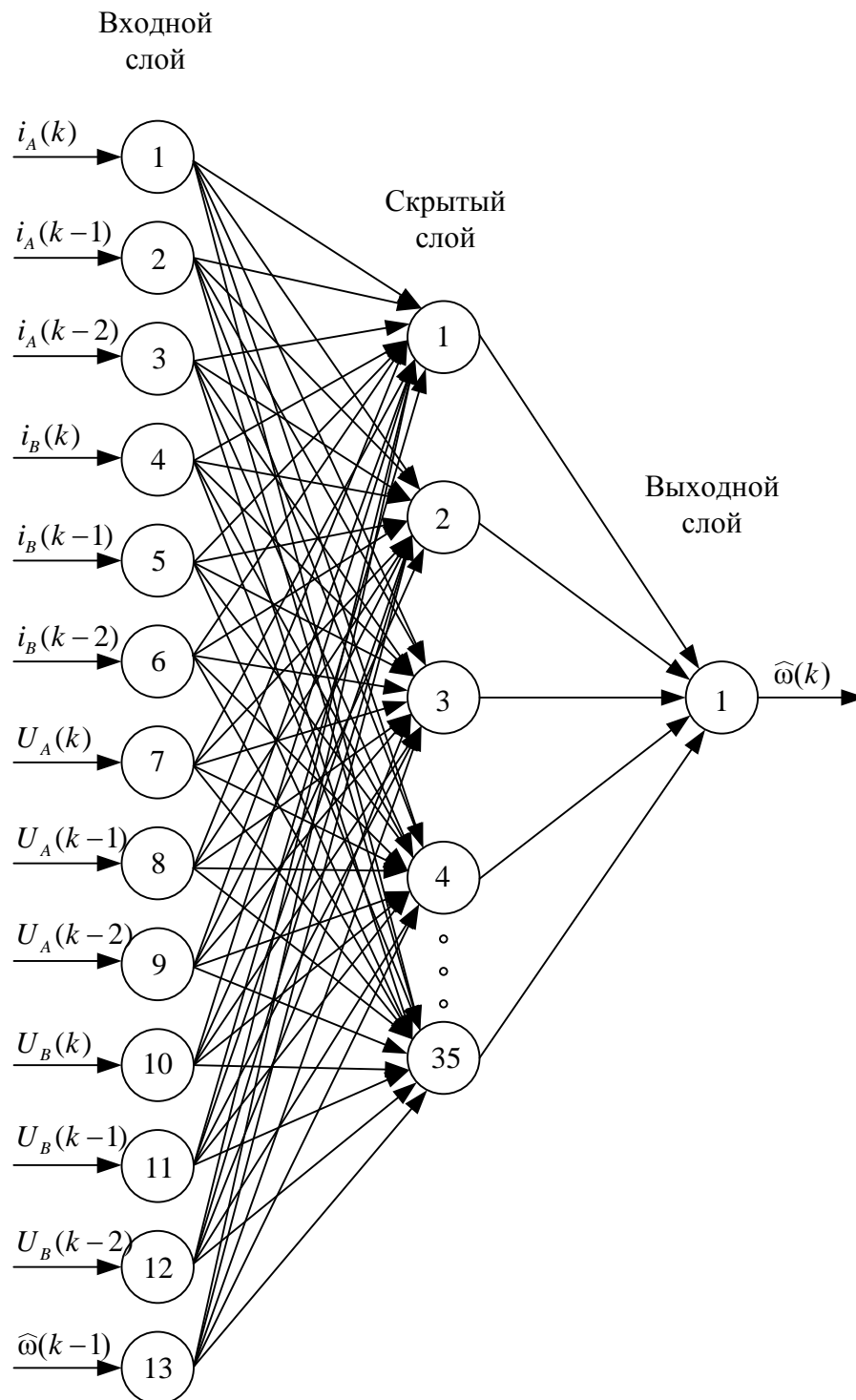


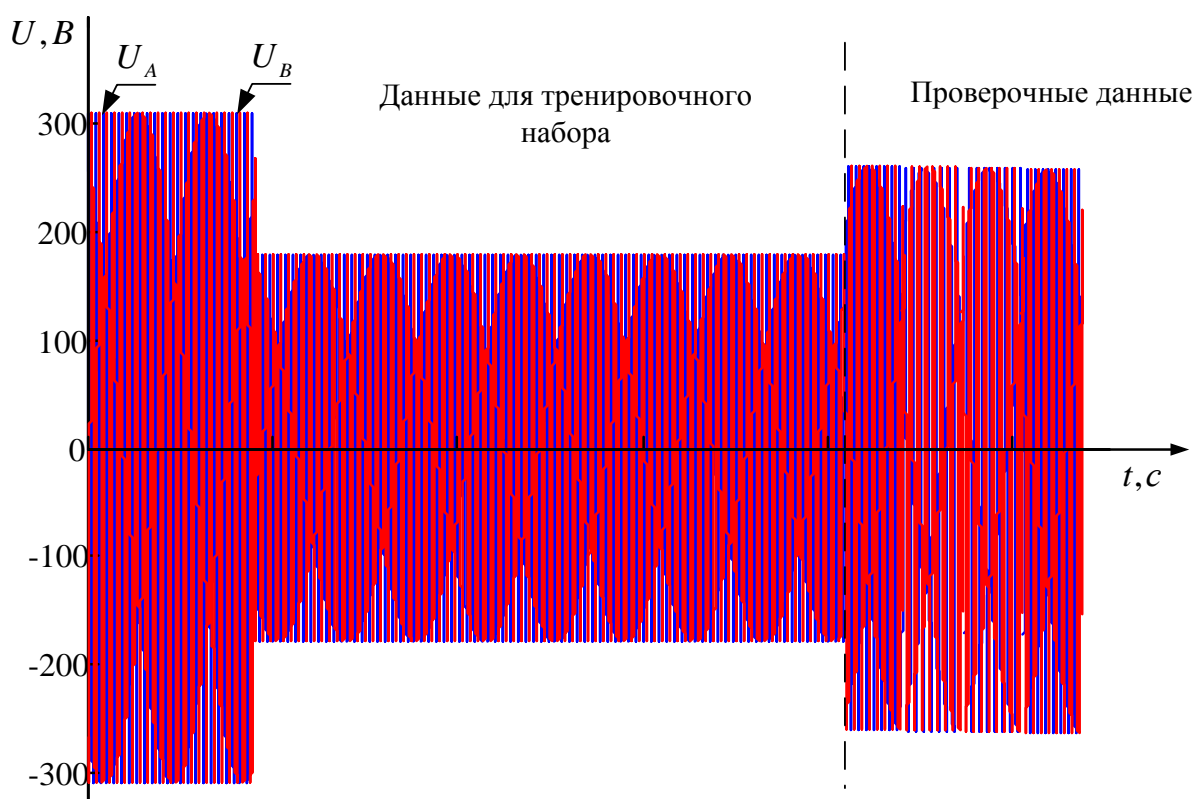
Рис. 2.12. Структура ИНС для оценки угловой скорости ротора асинхронного двигателя

Создание ИНС для оценки угловой скорости ротора асинхронного двигателя проводилось на математической модели двигателя типа АИМ А-100L4 с техническими характеристиками: номинальная мощность – 4 кВт; коэффициент мощности – 0,83; номинальный ток при 380 В – 8,71 А;

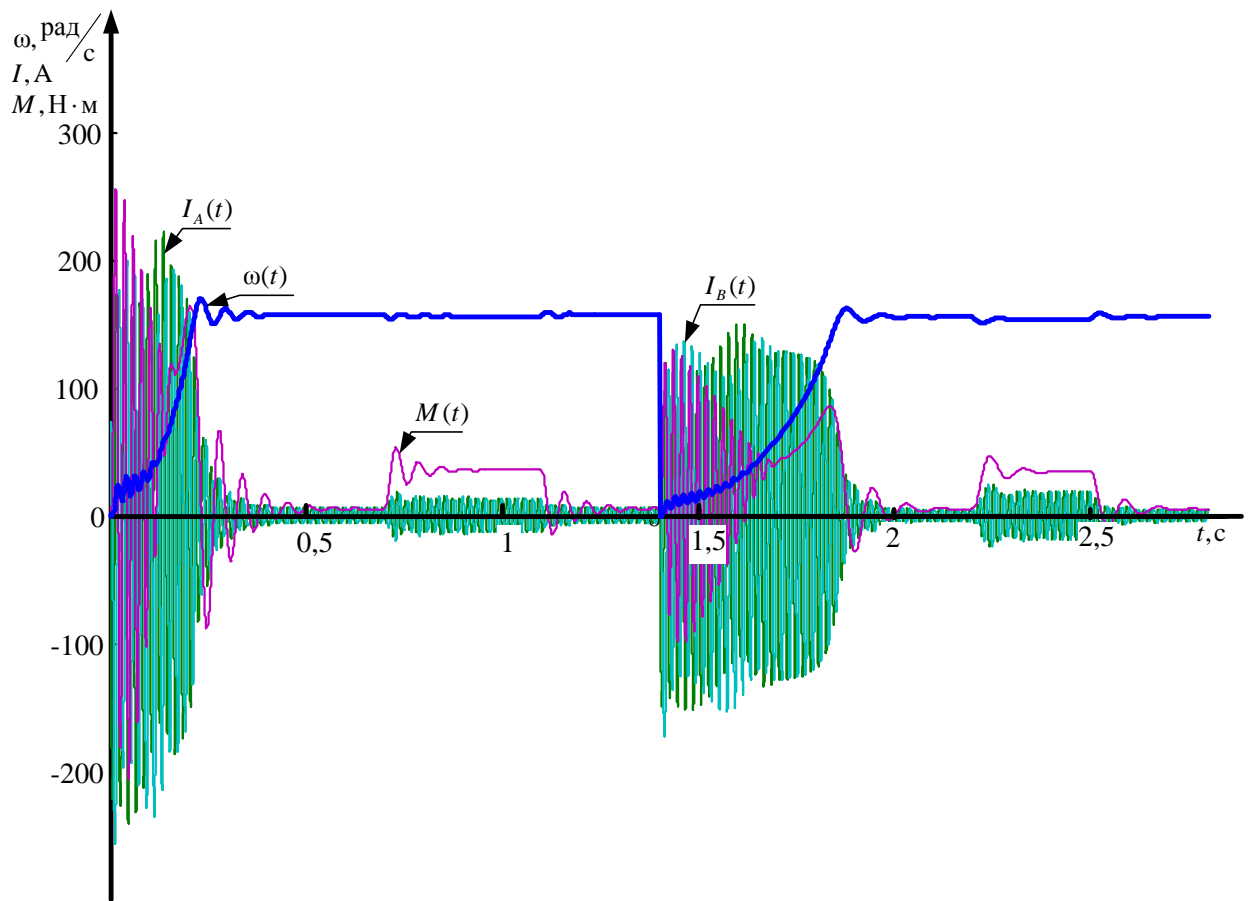


кратность пускового тока – 5,5; синхронная частота вращения – 1500 об/мин [69].

На рис. 2.13 приведены осциллограммы напряжений и токов фаз А, В; выходного сигнала датчика угловой скорости ротора асинхронного двигателя, необходимых для создания тренировочного набора, заранее зашумленного, для напряжений 310 В и 220 В, а так же данные для проверки работоспособности нейросетевого наблюдателя при 260 В. Моделирование работы асинхронного двигателя проводилось в программе Matlab 7.9.0 (R2009b), затем на полученные сигналы накладывался шум с помощью блока моделирования шумов.



а)



б)

Рис. 2.13. Осциллограммы токов и выходного сигнала датчика частоты вращения: а) напряжения, б) фаз А, В, необходимых для обучения ИНС; а так же момент на валу двигателя

Блок моделирования шумов предназначен для приближения данных, полученных при моделировании к данным, снятым с реального объекта. Блок моделирования шумов представлен на рис. 2.14.

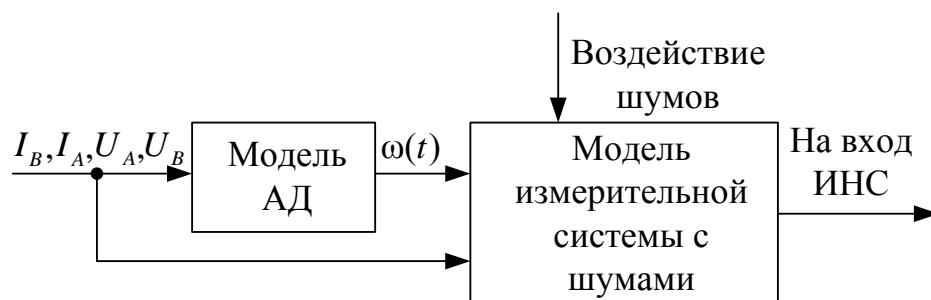


Рис. 2.14. Блок-схема моделирования шумов

На основе тренировочного набора, графики которого представлены на рис. 2.13, была составлена нейронная сеть размерностью 13–35–1, выполняющая функции оценки скорости вращения вала асинхронного двигателя. 13 нейронов входного слоя обладают линейной функцией активации, 35 нейронов скрытого слоя – тангенциальной функцией, 1 нейрон выходного – линейной. В качестве датчиков тока и напряжения могут быть использованы любые промышленные датчики, соответствующие по амплитуде и частоте измеряемого сигнала, а их временные задержки и программное описание ИНС могут быть исполнены, например, на базе микроконтроллера типа TMS320F2812 фирмы Texas Instruments.

После выбора архитектуры ИНС и тренировочного набора наступает процесс обучения в программной среде MATLAB, в основу которого входит подбор коэффициентов синаптических весов за счет циклической настройки так, чтобы отличия между сигналом датчика угловой скорости ротора и реакцией ИНС на соответствующие входные данные были минимальны. Синаптические веса нейронов скрытого и выходного слоев обученной ИНС представлены в таблице 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2. Синоптические веса скрытого слоя

№	$W_{1,k}$	$W_{2,k}$	$W_{3,k}$	$W_{4,k}$	$W_{5,k}$	$W_{6,k}$	$W_{7,k}$
1	-0,47197	-0,4808	-0,50115	0,02408	0,01978	0,05233	0,0526
2	0,23597	0,29357	0,31254	-0,16013	-0,13613	-0,10623	-0,07014
3	0,04685	0,01482	0,02567	0,04812	0,04611	0,05377	0,73349
4	-0,18407	-0,16621	-0,13932	-1,44495	-1,36059	-1,31331	-0,04098
5	-0,38773	-0,40286	-0,42547	-0,00315	0,00215	-0,04433	0,03776
6	-0,04637	0,00104	0,04324	0,0494	0,01559	-0,05026	0,00135
7	0,47079	0,45816	0,43772	0,16806	0,14533	0,1051	0,62305
8	-0,17844	-0,00424	0,181	-0,32858	0,01041	0,32824	-0,00478

<b>9</b>	-0,00806	-0,00367	-0,00242	-0,22328	-0,01031	0,22162	-0,00117
<b>10</b>	0,19417	0,20387	0,20923	-0,34606	-0,30489	-0,26224	-0,06563
<b>11</b>	-0,21632	-0,12368	-0,04159	-0,32509	-0,49468	-0,6438	-0,06131
<b>12</b>	-0,25968	-0,01957	0,01327	-0,08811	-0,03627	0,07695	-0,00219
<b>13</b>	0,1038	0,00059	-0,09342	0,17911	0,02239	-0,18299	-0,00326
<b>14</b>	0,32072	-0,01368	-0,31503	-0,23134	0,01466	0,24105	0,0003
<b>15</b>	-0,00195	-0,00322	-0,03048	0,1325	0,00959	-0,11463	0,00597
<b>16</b>	-0,16566	-0,00761	0,11665	-0,04228	-0,02226	0,03956	-0,00459
<b>17</b>	-0,03243	0,01981	0,02752	-0,10313	-0,00079	0,14781	-0,00205
<b>18</b>	0,43227	0,4144	0,36135	0,02028	-0,03291	-0,11402	-0,07568
<b>19</b>	0,0523	-0,00917	-0,03368	-0,0294	0,01213	0,09022	0,00087
<b>20</b>	-0,039	0,02266	0,06796	-0,00618	-0,08318	-0,05441	-0,01295
<b>21</b>	0,051297	-0,00312	-0,09696	0,059	-0,0125	-0,0628	-0,00044
<b>22</b>	0,00102	0,09959	0,08365	0,79057	0,10455	0,10818	-0,26829
<b>23</b>	-0,17892	-0,00167	0,18499	-0,04015	0,01841	0,05327	0,00288
<b>24</b>	-0,69146	-0,71312	-0,71216	-0,13713	-0,19537	-0,25536	0,05666
<b>25</b>	0,02907	-0,01312	-0,08648	0,03813	-0,02683	-0,07823	-0,001
<b>26</b>	-0,07656	0,02858	0,08872	-0,03966	0,00595	0,05623	-0,00087

Продолжение таблицы 2.2.

<b>27</b>	-0,08397	0,0101	0,11149	-0,0878	0,01692	0,08977	0,00128
<b>28</b>	-0,37815	-0,38198	-0,39446	-0,41825	-0,4424	-0,45112	-0,04803
<b>29</b>	0,1227	0,00783	-0,11015	-0,19839	-0,00064	0,21358	-0,00012
<b>30</b>	-0,10762	0,02044	0,10023	0,20774	0,01732	-0,19119	0,00185
<b>31</b>	-0,74993	-0,76507	-0,75444	-0,91422	-0,85148	-0,83078	-0,04911
<b>32</b>	-1,2986	-1,28003	-1,26345	1,04236	1,02288	1,00259	0,17116
<b>33</b>	0,04544	-0,03454	-0,09441	-0,06199	-0,01878	-0,00755	-0,00112
<b>34</b>	0,22027	-0,00336	-0,20632	0,46238	-0,02634	-0,44672	0,00322
<b>35</b>	0,24292	0,00922	-0,24186	-0,2282	-0,011	0,2277	0,00242

Таблица 2.3. Синоптические веса выходного слоя

№	$W_{k,1}$	№	$W_{k,1}$	№	$W_{k,1}$	№	$W_{k,1}$	$B_1$
1	0,00165	11	0,000432	21	5,082669	31	-0,00195	16.00709
2	0,000256	12	2,61388	22	-0,00073	32	0,003198	
3	0,001185	13	-7,72934	23	3,089596	33	-4,4008	
4	-0,0006	14	-5,03111	24	0,00633	34	-10,4012	
5	-0,00789	15	-2,42249	25	6,736004	35	5,289247	
6	4,28257	16	4,392617	26	-10,7183			
7	0,001543	17	2,9208	27	5,388719			
8	-9,75859	18	-0,00341	28	8,197817			
9	2,39266	19	2,813431	29	5,972154			
10	0,002977	20	-4,6713	30	2,854601			

Погрешность работы ИНС проверялась за счет интегральной погрешности оценивания [28]:

$$I_{\omega} = \frac{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} |\omega(t) - \hat{\omega}(t)| dt}{\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} |\omega(t)| dt} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

где  $t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$  – начальное и конечное время интегрирования,  $\omega(t)$  – угловая скорость вращения вала асинхронного двигателя,  $\hat{\omega}(t)$  – оценка угловой скорости вращения вала асинхронного двигателя.

Проверка работоспособности и погрешность работы ИНС представлена на рис. 2.13. Режимы *A*, *B*, *C* соответствуют пуску, набросу и сбросу нагрузки соответственно.

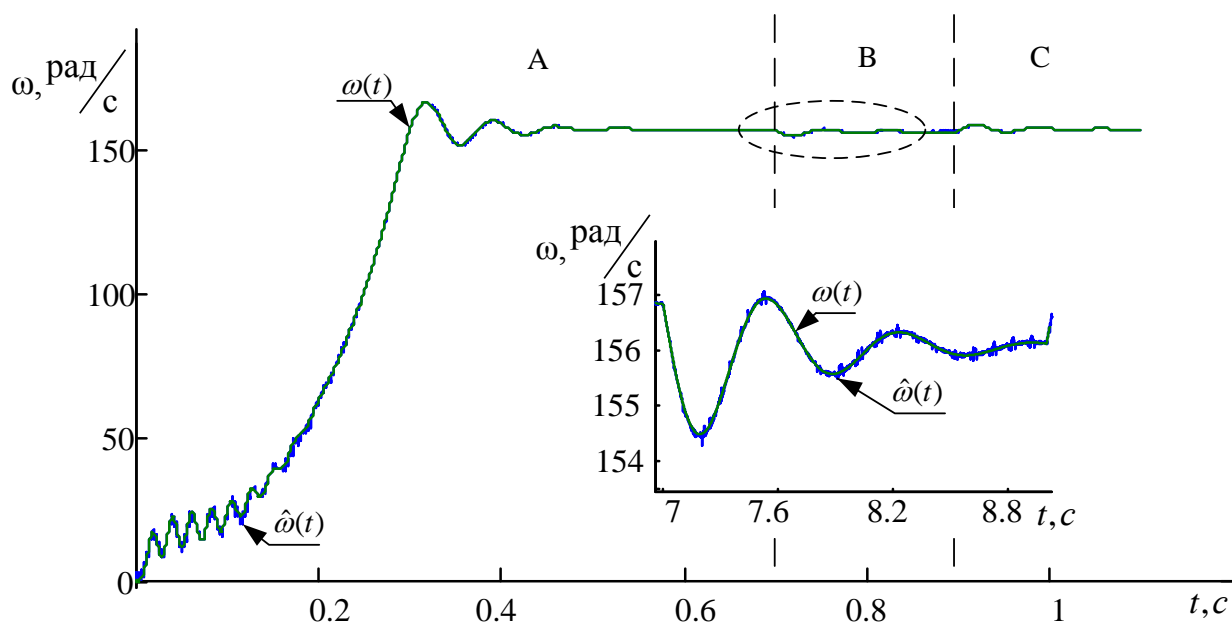


Рис. 2.13. Проверка работоспособности ИНС

Сравнить интегральную погрешность оценивания можно по таблице 2.4 при различных технологических режимах работы электропривода.

Таблица 2.4. Интегральная погрешность оценивания

Режим работы	Интервал времени интегрирования		$I_{\omega}, \%$
	$t_{\text{нач}}, c$	$t_{\text{кон}}, c$	
<i>A</i>	0	0,7	4,73
<i>B</i>	0,7	0,9	3,46
<i>C</i>	0,9	1,1	3,21

Из проведенного сравнительного анализа (рис. 2.13, таблица 2.4) видно, что ИНС успешно. Проверка работоспособности искусственной сети проводилась на проверочной выборке, не включающей в себя тренировочный набор и, следуя из интегральной погрешности оценивания, можно сделать вывод, что отсутствует эффект переобучения ИНС.

## **2.7. Выводы по второй главе**

Результаты проведенного анализа состояния теоретических исследований и практических работ по тематике диссертации показали:

1. Произведена классификация, сравнительный анализ структур нейронных сетей, пригодных для построения наблюдателей сложных нелинейных многосвязных динамических объектов, таких как АД;

2. В результате проведенных исследований даны рекомендации по составлению тренировочного набора и структуры подготовки входных данных с целью минимизировать объем выборки на основе методики, описанной в разделе 2.4, а также для исключения негативного эффекта, возникающего при переобучении ИНС;

3. Разработана и апробирована путем математического моделирования структура нейросетевого наблюдателя угловой скорости АД, разработанного в практических пределах изменения статорного напряжения и нагрузки на валу двигателя.

### **3. НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА В ЭЛЕКТРОПРиводе ПО СХЕМЕ ТРН - АД**

Для создания нейросетевого наблюдателя скорости при прямом пуске асинхронного электропривода достаточно было использовать модель асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат  $\alpha - \beta$ , но при работе двигателя совместно с тиристорным регулятором напряжения нарушается одно из необходимых условий использования такой математической модели – принцип гармонической формы сигналов тока и напряжения. Известен ряд успешных применений математической модели асинхронного двигателя в естественной системе координат [70 - 72]. Как было представлено в главе 2 настройка нейронной сети проводилась в программной среде MATLAB, следовательно для разработки нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН - АД имитационную модель электродвигателя и силового преобразователя так же необходимо выполнить в программной среде MATLAB Simulink [73].

#### **3.1. Имитационная модель разомкнутой системы ТРН – АД**

##### **3.1.1. Модель асинхронного двигателя в естественных осях**

Уравнения, описывающие работу АД в трехфазной естественной системе координат представлены в ряде уже известных работ [70 - 72], поэтому в данной диссертационной работе представлены лишь необходимые итоговые выражения.

Система дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями для фазных обмоток статора и ротора, записанных по второму закону Кирхгофа:



$$\begin{aligned}
U_A &= R_s \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\
U_B &= R_s \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\
U_C &= R_s \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \\
U_a &= R_r \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\
U_b &= R_r \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\
U_c &= R_r \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt},
\end{aligned}$$

где А, В, С – индексы соответствующей фазы обмотки статора; а, b, с – индексы соответствующей фазы обмотки ротора,  $R_s$  – сопротивление статора,  $R_r$  – сопротивление ротора, приведенного к сопротивлению статора,  $i_A, i_B, \dots, i_b, i_c$  – токи фаз статора и ротора,  $\psi_A, \psi_B, \dots, \psi_b, \psi_c$  – потокосцепление фаз статора и ротора,  $U_A, U_B, \dots, U_b, U_c$  – напряжение фаз статора и ротора.

Уравнение, описывающее процессы, проходящие в АД в трехфазной системе координат [71]:

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_1]^{-1} \left\{ [U] - \left( [R] + [L_2] \frac{\omega}{\sqrt{3}} [i] \right) \right\} \quad (3.1)$$

где:

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

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

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

$k_1 = 3L_m/2$ ,  $k_2 = (L_r + L_m/2)$ ,  $L_m$  – индуктивность намагничивания,  $L_r$  – индуктивность ротора,  $L_s$  – индуктивность статора.

Электромагнитный момент в трехфазной системе координат:

$$M = z_p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m \left[ (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \right]$$

где  $z_p$  – число пар полюсов.

Уравнение движения описывается уравнением:

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

Реализация математической модели АД осуществлялась в программной среде визуально ориентированного имитационного моделирования сложных электротехнических объектов Matlab Simulink [73].

На рис. 3.1. представлена имитационная модель АД Matlab Simulink в естественных осях, являющаяся частным случаем  $m$ -фазной модели, предложенной в работе [72]. В данной модели блоки 1 и 2 формируют входные напряжения на статоре ( $U_A, U_B, U_C$ ) и роторе ( $U_a, U_b, U_c$ ) и подают их на блок 3, который связывает системы статорных и роторных координат. В блоке 4 происходит формирование вектора напряжения ротора. Объединение вектора напряжений статора и вектора напряжений ротора производится в блоке 5. В блоке 6 формируется матрица сопротивлений фаз статора и ротора согласно (3.1), данные которого подаются на блок 7, определяющей матрицу падения напряжений на активных сопротивлениях [72], имеющий следующий вид

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \cdot R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{sn} \cdot R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{r1} \cdot R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{rn} \cdot R_r \end{bmatrix}.$$

В блоке 8 происходит определение матрицы напряжений с учетом падения напряжения на активных сопротивлениях. Блок 9 вычисляет потокосцепление в фазах за счет интегрирования напряжения в каждой фазе.

Блоки с 10 по 12 - матрицы индуктивности статора, ротора и их взаимоиנדуктивностей соответственно.

Блок 13 формирует угол сдвига фаз ротора.

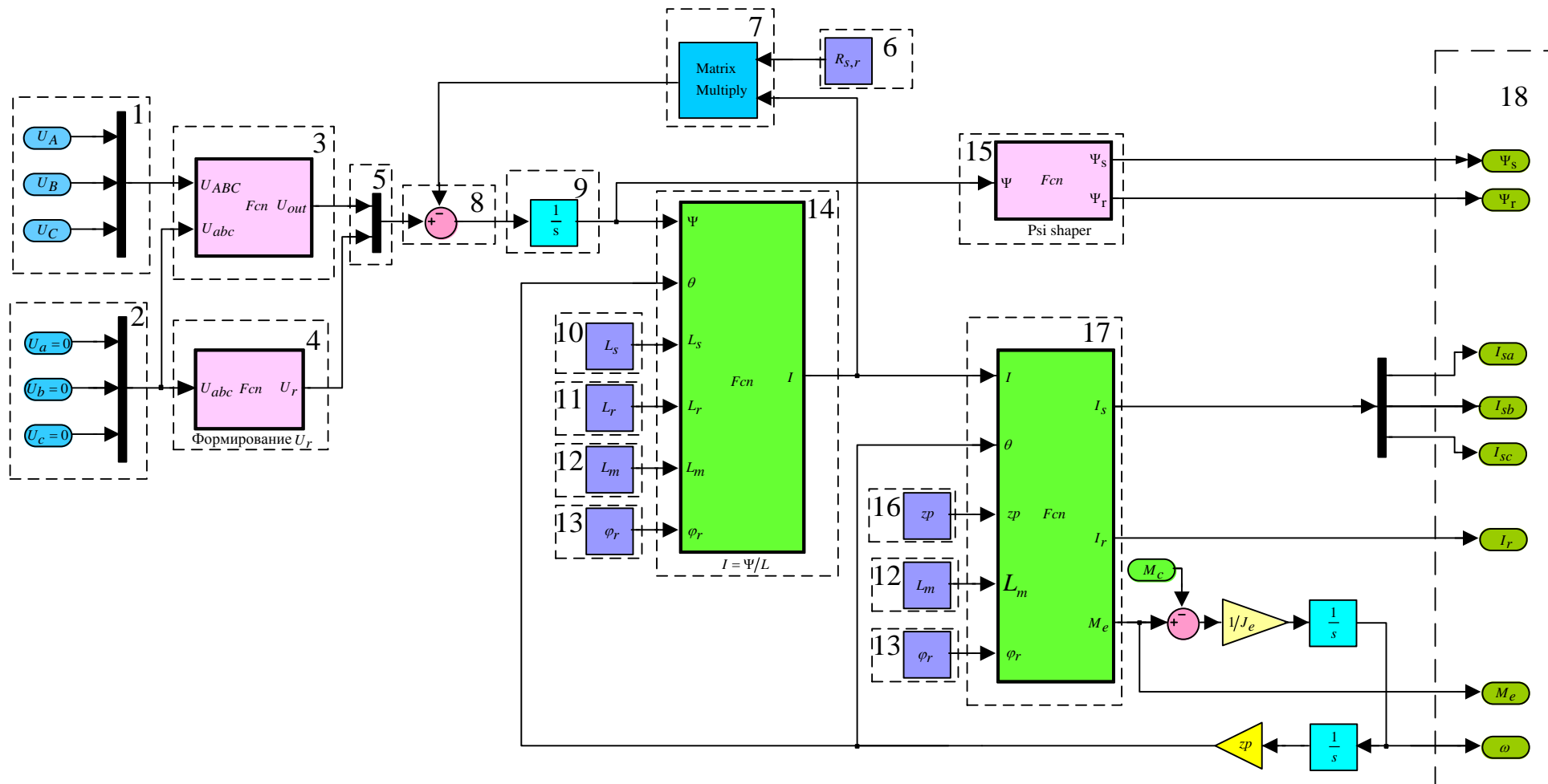


Рис. 3.1. Имитационная модель АД Matlab Simulink в естественных координатах

Блок 14 определяет вектор тока за счет использования данных с блоков 9, 10, 11, 12, 13 и электрический угол поворота вала двигателя  $\theta_e$ , определяемый по формуле  $\theta_e = \int \omega_e dt = zp \cdot \int \omega dt$ :

$$[I] = [L]^{-1} \cdot [\Psi],$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_{rs}] \\ [L_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix}.$$

Блок 15 определяет потокосцепления статора и ротора.

Блок 16 характеризует число пар полюсов асинхронного двигателя.

Блок 17 определяет величину электромагнитного момента, развиваемого на валу двигателя, разделяет ток, протекающий в статорной и роторной обмотках за счет входных данных подаваемых с блоков 12, 13, 14, 16 и электрического угла поворота вала двигателя  $\theta_e$ .

Блок 20 характеризует выходы: потокосцепления статора и ротора, тока статора для каждой фазы, ток ротора, электромагнитный момент и скорость вращения вала двигателя.

Скорость вращения вала двигателя находилась согласно уравнению:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{z_p \cdot (M - M_c)}{J},$$

где  $M$  – электромагнитный момент,  $M_c$  – момент на валу двигателя,  $z_p$  – число пар полюсов,  $J$  – момент инерции.

На рис. 3.2 и 3.3 представлены временные характеристики по току и динамические механические характеристики асинхронного двигателя, собранного в программной среде Matlab Simulink в естественных координатах.

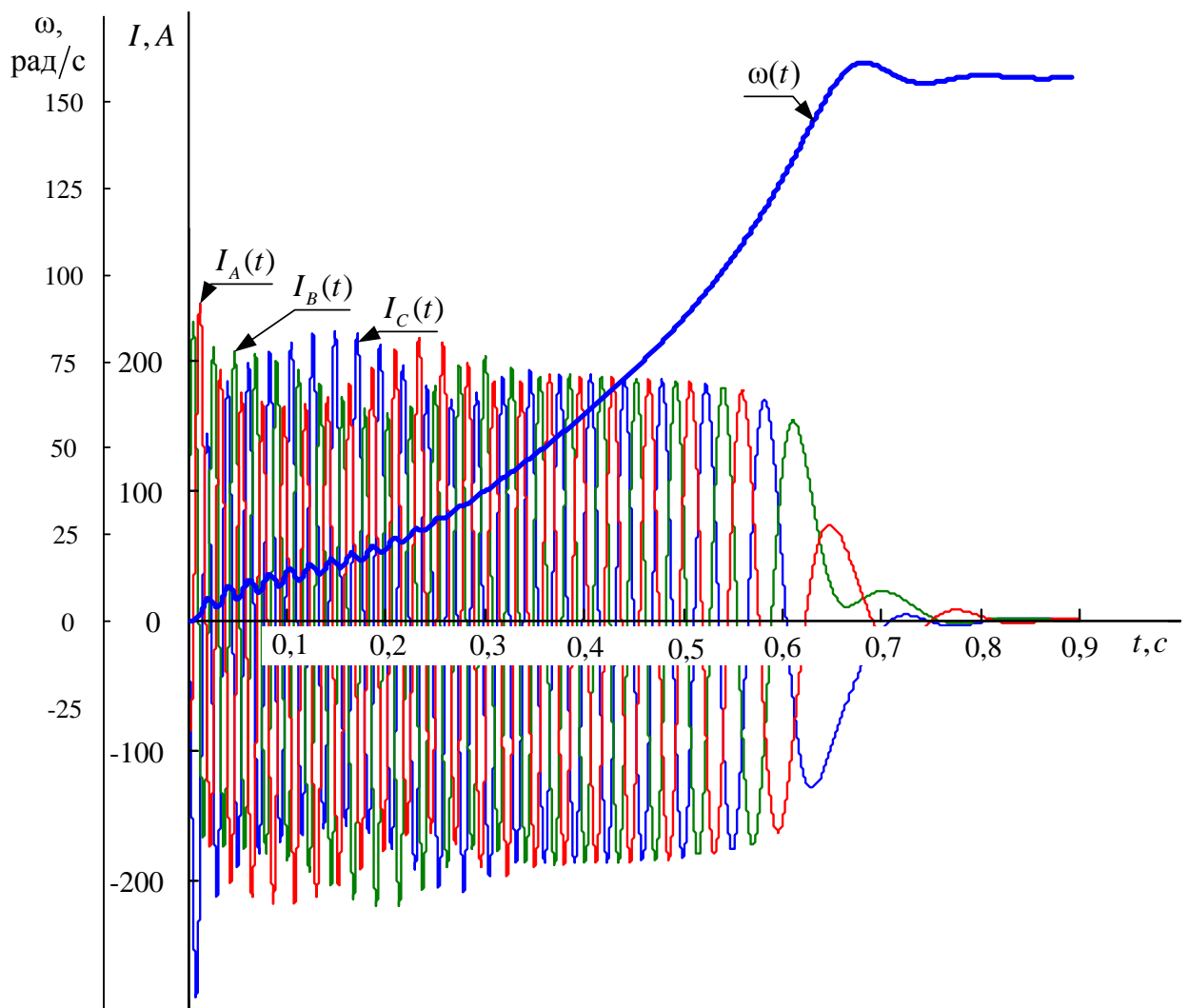


Рис. 3.2 Временные характеристики по току двигателя в трехфазной системе координат при прямом пуске

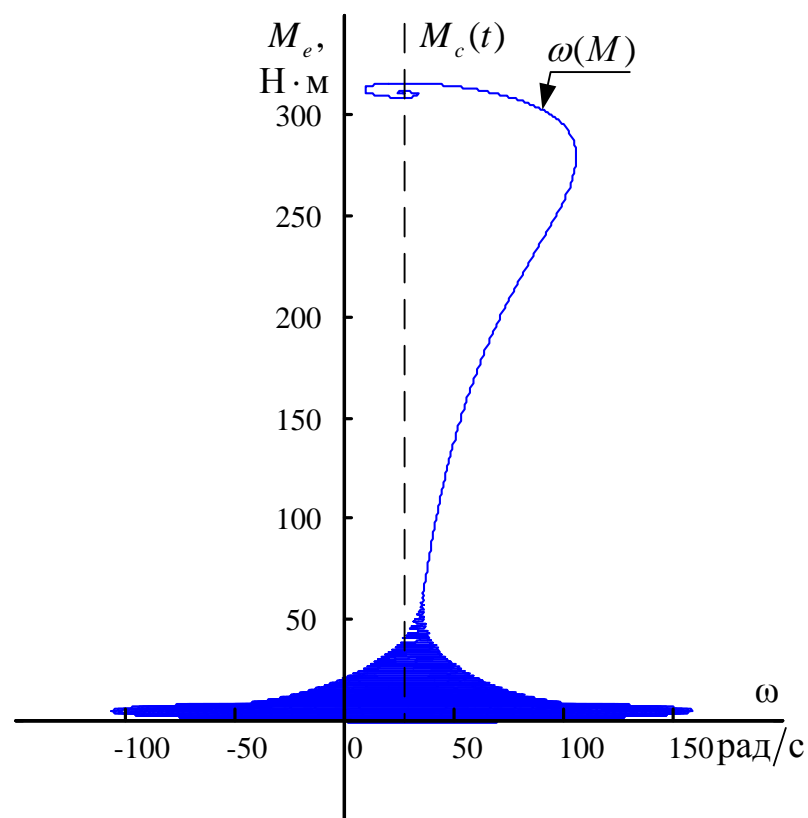


Рис. 3.3 Динамические механические характеристики двигателя в трехфазной системе координат при прямом пуске

Из рисунков 3.2 и 3.3 видно, что собранная трехфазная модель асинхронного двигателя в программной среде Matlab Simulink позволяет анализировать динамические режимы переменных состояния электродвигателя.

Прямой пуск асинхронного двигателя характеризуется большими колебаниями электромагнитного момента и большими пусковыми токами. Такое большое изменение по току и моменту может отрицательно сказаться на некоторых типах электроприводов. Применение УПП позволяет исключить перечисленные недостатки.

### 3.1.2 Имитационная модель тиристорного регулятора напряжения

Особенностью работы асинхронного двигателя является наличие магнитных связей между обмотками статора и ротора, что приводит при вращении вала асинхронного двигателя к возникновению электродвижущей силы в статорной обмотке, зависящей от угловой скорости вращения ротора. Электродвижущая сила обмотки статора в свою очередь влияет на процесс коммутации тиристоров в тиристорном регуляторе напряжения (ТРН) [74, 75].

При разработке имитационной модели электропривода по схеме ТРН - АД одной из важных составных частей является создание модели тиристорного регулятора напряжения, осуществляющего импульсно-фазовое регулирование статорного напряжения АД. ТРН выполняются на основе силовых полупроводниковых ключах, к числу которых относятся тиристоры, либо симисторы. Схемы соединения полупроводниковых ключей в схему описаны ранее. ТРН позволяет изменять среднее значение тока в цепи и напряжение на нагрузке.

Для моделирования работы полупроводниковых ключей в программной среде Matlab Simulink имеется соответствующая библиотека элементов. Согласно документации [76], представляемой разработчиком Matlab, Detailed Thyristor моделируется как сопротивление, индуктивность и источник постоянного напряжения, соединенных последовательно с ключом. Ключ управляется логическим сигналом, имеющим зависимость от трех составляющих: тока и напряжения на катоде-аноде, а так же от сигнала, подаваемого на затвор.

На рис. 3.4 и 3.5 представлена блок схема и имитационная модель ТРН, реализованной в программной среде Matlab Simulink.



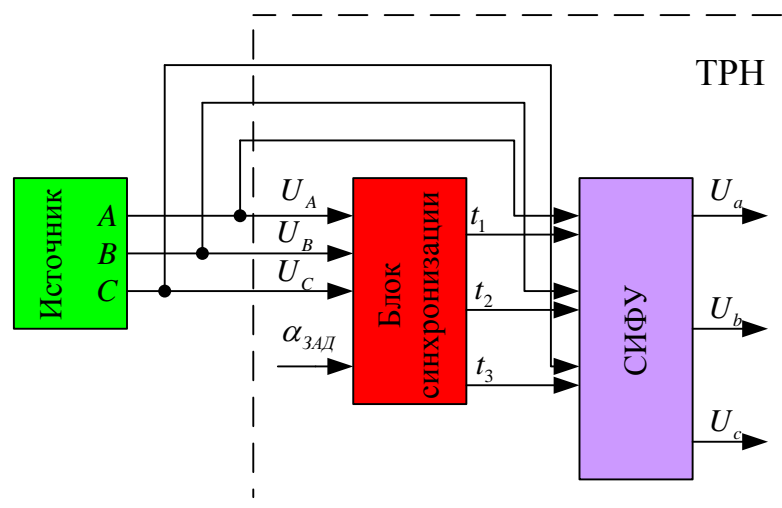


Рис. 3.4. Блок схема тиристорного регулятора напряжения

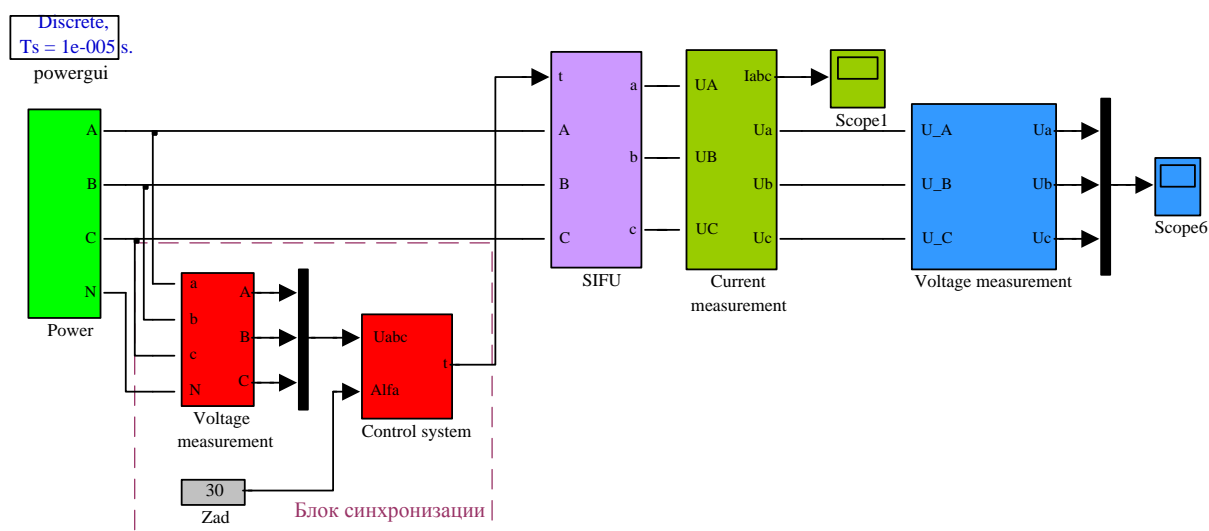


Рис. 3.5. Имитационная модель тиристорного регулятора напряжения

Принцип работы имитационной модели ТРН состоит в том, чтобы на блок синхронизации по напряжению подавался сигнал с генератора трехфазного напряжения  $U_A, U_B, U_C$  и угол задания открытия силовых полупроводниковых приборов. Блок синхронизации формирует сигнал управления полупроводниковыми ключами. Система импульсно-фазового управления формирует напряжение, подаваемое на двигатель [74].

При работе ТРН на чисто активную нагрузку форма тока совпадает с формой напряжения, приложенной к цепи, см. рис. 3.6. Длительность импульса тока характеризуется электрическим углом  $\lambda$  проводимости и углом открытия  $\alpha$  силового полупроводникового прибора, сумма которых

равняется полупериоду  $\pi$  питающего напряжения. На рисунке представлено семейство характеристик для одной фазы  $U_A$ : напряжение  $U_a$  и ток  $I_a$  на нагрузке; сигнал на разрешение подачи управляющих импульсов  $U_y$ , углы открытия  $\alpha$  и проводимости  $\lambda$  полупроводниковыми ключами [75].

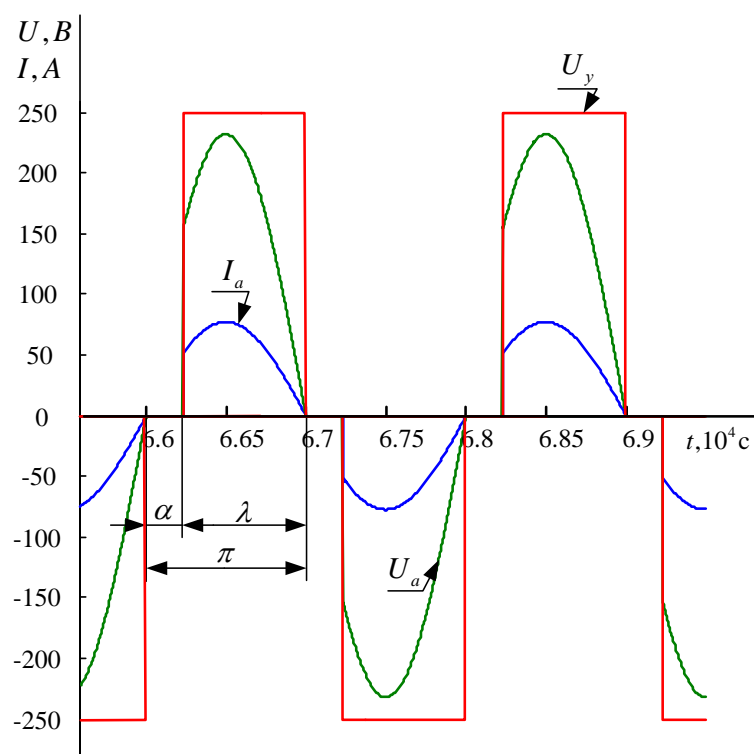


Рис. 3.6. Ток и напряжение в цепи с активной нагрузкой, управляемых от тиристорного регулятора напряжения

Из рис. 3.6 видно, что напряжение фазы  $U_A$  подаваемое на СИФУ изменяет свою форму за счет сигнала управления  $U_y$  на силовые полупроводниковые ключи. Закрывание силового ключа происходит в момент перехода напряжения через точку естественной коммутации.

При работе ТРН на активно-индуктивную нагрузку возникает ЭДС самоиндукции, влияющая на процесс нарастания и спадания тока в нагрузке [74]. Форма тока и напряжения на нагрузке представлены на рисунке 3.7. В таком случае угол закрывания  $\beta$  равен сумме углов проводимости  $\lambda$  и открытия  $\alpha$ .

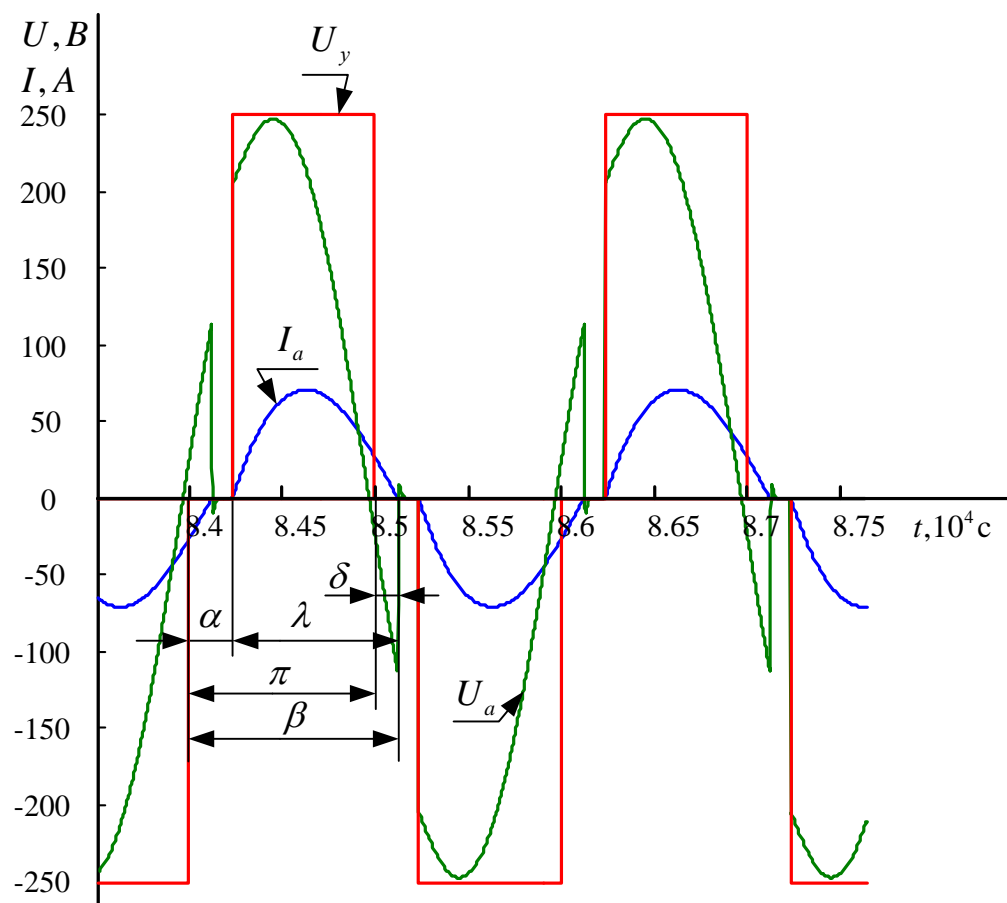


Рис. 3.7. Ток и напряжение в цепи с активно-индуктивной нагрузкой, управляемых от тиристорного регулятора напряжения

Из рисунка 3.7 видно, что в цепи с активно-индуктивной нагрузкой момент спада тока нагрузки до нуля запаздывает на угол  $\delta$  от момента смены знака приложенного напряжения.

При работе ТРН на трехфазную активно-индуктивную нагрузку с нулевым проводом временные характеристики тока и напряжения представлены на рис. 3.8.

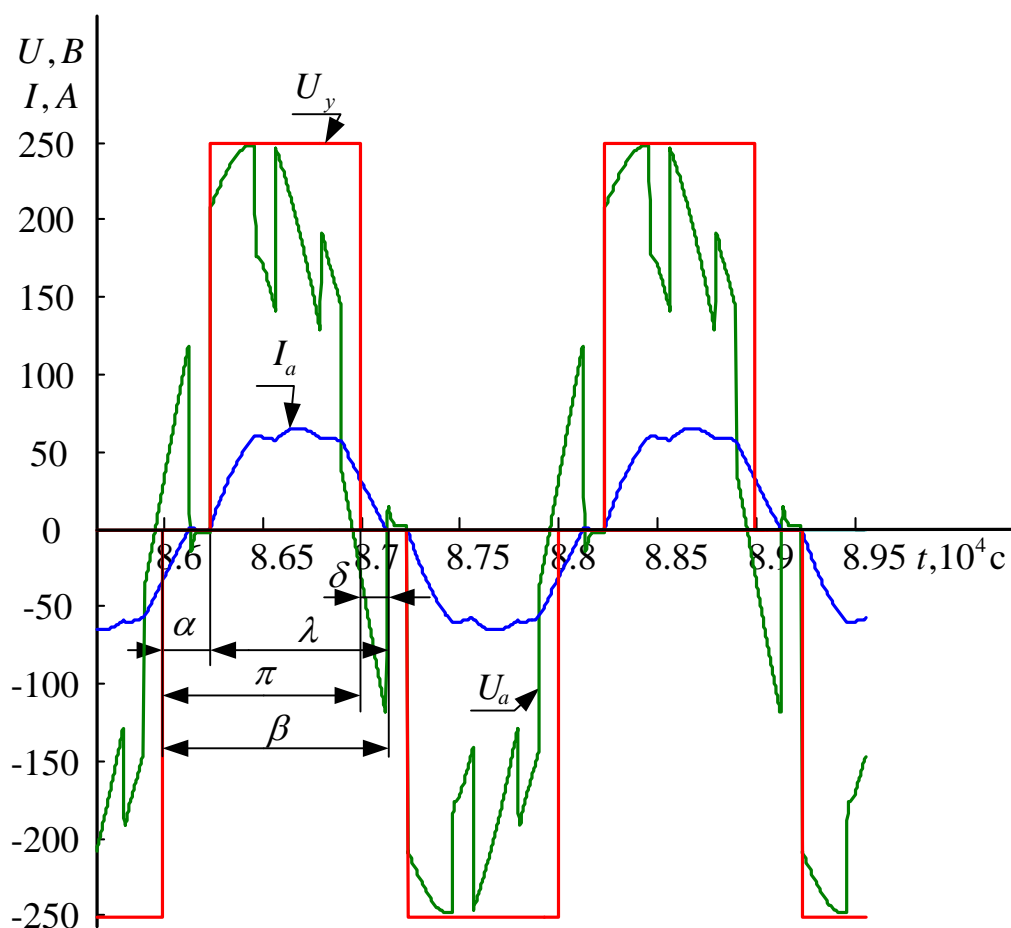


Рис. 3.8. Ток и напряжение в цепи с симметричной активно-индуктивной нагрузкой, управляемых ТРН

Так как симметричная активно-индуктивная нагрузкой соединена звездой с нулевым проводом, то ток и напряжение одной фазы не зависят от тока и напряжения другой. На рис. 3.8 можно заметить наличие бестоковых пауз, оказывающих существенное влияние на характеристики ТРН [74].

Представленные на рис. 3.6 - 3.8 временные характеристики токов и напряжений, полученные на основе имитационной модели рис. 3.5, имеют характерные особенности, обусловленные импульсно-фазовым способом регулирования переменного напряжения в цепях с активно-индуктивной нагрузкой, что позволит усовершенствовать процесс обучения и эксплуатации разрабатываемого нейросетевого наблюдателя угловой скорости.

### 3.1.3 Имитационная модель замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД

В данном разделе ставилась задача создания имитационной модели замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД и проверки работоспособности замкнутого контура скорости по отработке управляющих и возмущающих воздействий.

Была создана имитационная модель электропривода в программной среде Matlab Simulink на основе моделей ТРН и трехфазного асинхронного электродвигателя, описанных ранее в диссертации, с реактивной нагрузкой на валу двигателя. Имитационная модель трехфазного асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД с реактивной нагрузкой представлена на рис. 3.9.

Пропорционально-интегральный регулятор скорости (ПИ - РС) для замкнутого трехфазного асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД выбирается согласно методике, представленной в [77].

Проверка работоспособности электропривода по схеме ТРН – АД проводилась в технологических режимах работы:

- пуск электропривода при разных заданиях на скорость;
- наброс и сброс нагрузки.

Полный цикл работы электропривода представлен на рис. 3.10, 3.11, в которой области: *A* – пуск электропривода на скорость  $\omega_{\text{зад}} = 150 \text{ рад/с}$ , *B*, *E* – наброс нагрузки  $M_c = 27 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; *C*, *F* – сброс нагрузки, *D* – пуск электропривода на максимальную рабочую скорость.

Динамическая ошибка при набросе нагрузки  $M_c = 27 \text{ Н} \cdot \text{м}$  в заданном диапазоне регулирования скоростей составляет [79]:

- При скорости задания  $75 \text{ рад/с}$ :

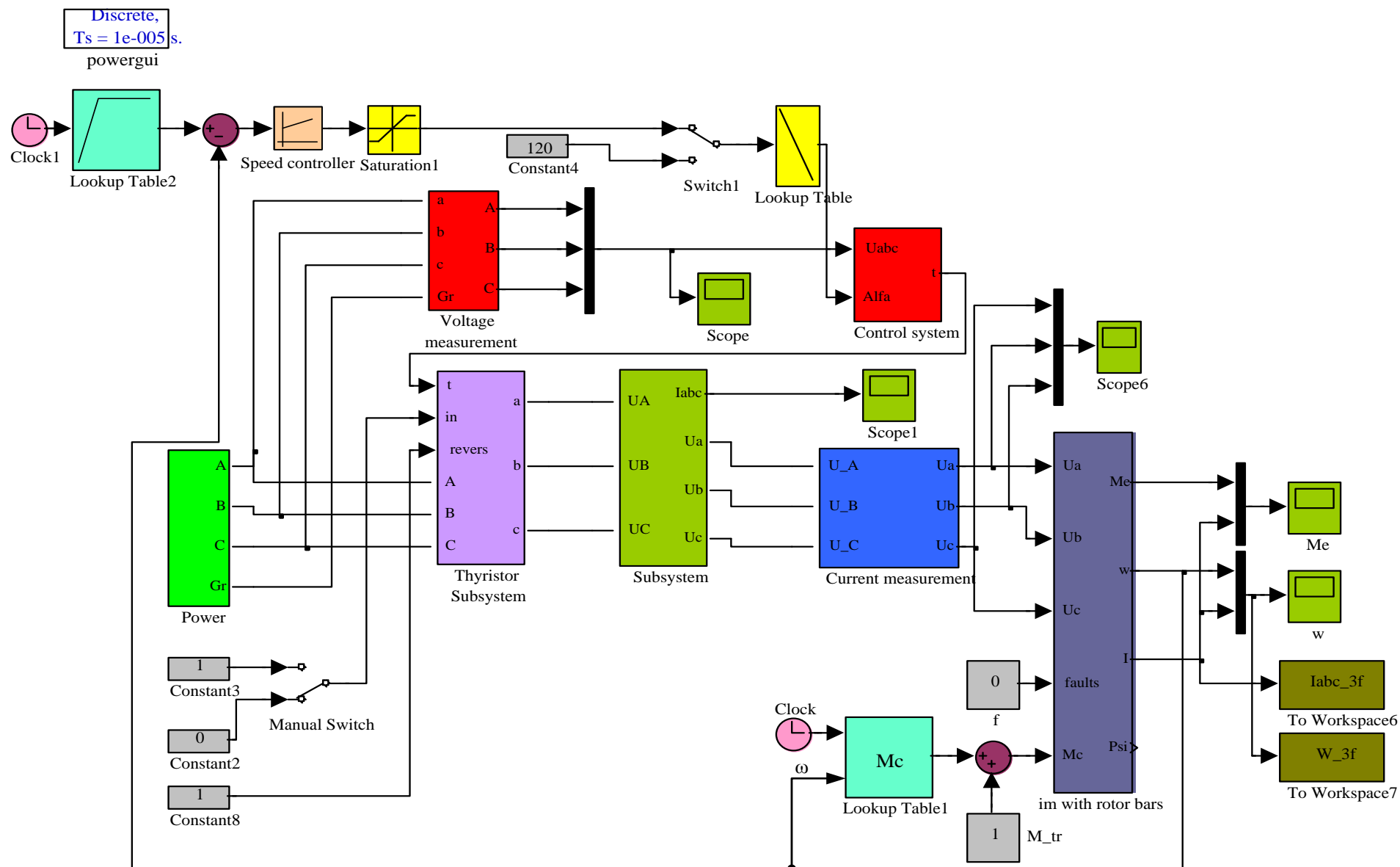


Рис. 3.9. Имитационная модель замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД

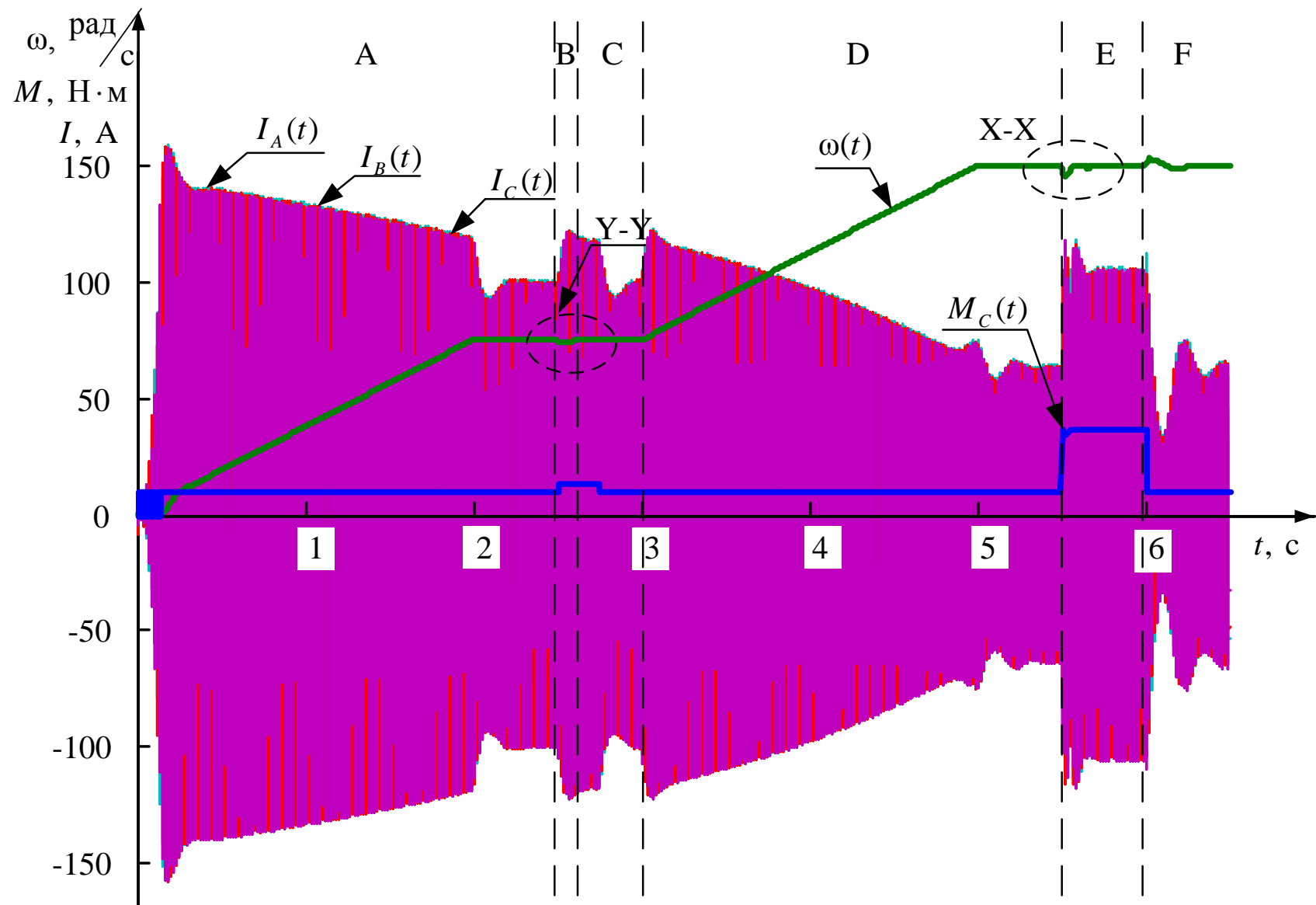


Рис. 3.10. Графики переходных процессов по скорости, току электропривода по схеме ТРН - АД

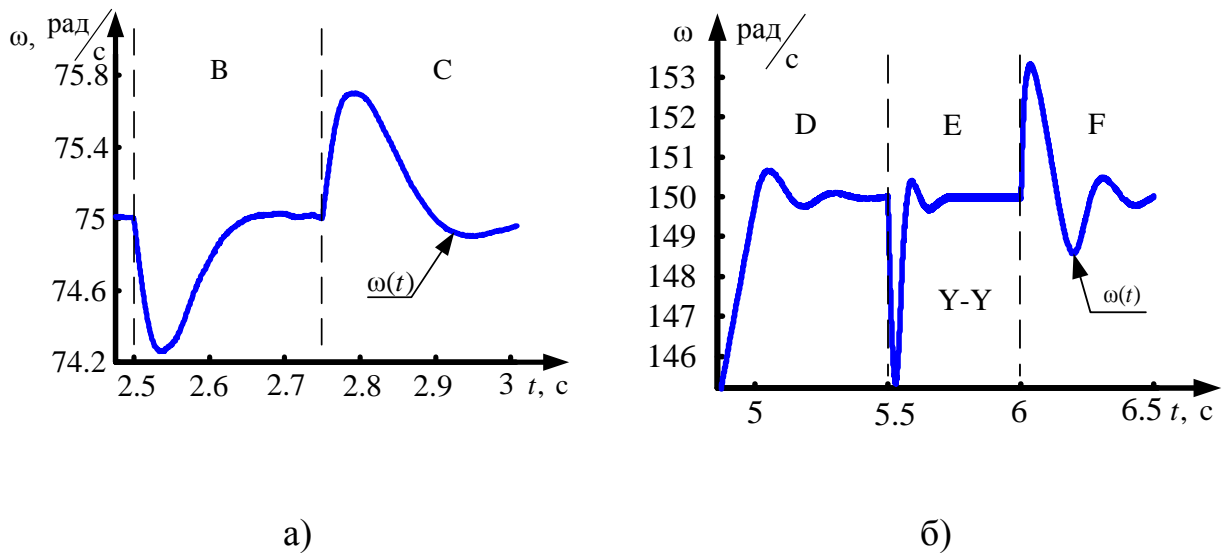


Рис. 3.11. Графики переходных процессов по скорости по схеме ТРН - АД:

а) при скорости задания 75 рад/с; б) при скорости задания 157 рад/с

$$\Delta\omega_{75} = \frac{\omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{эп}}}{\omega_{\text{зад}}} \cdot 100\% = 10\%.$$

- При скорости задания 157 рад/с:

$$\Delta\omega_{150} = \frac{\omega_{\text{зад}} - \omega_{\text{эп}}}{\omega_{\text{зад}}} \cdot 100\% = 1,6\%.$$

По результатам имитационного моделирования, представленным в данном разделе, можно сделать вывод о том, что замкнутый контур регулирования скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД с датчиком угловой скорости в цепи обратной связи и ПИ - РС способен отрабатывать управляющее воздействие от задатчика интенсивности и возмущающее воздействие от момента сопротивления нагрузки.



### **3.2. Особенности построения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при питании асинхронного двигателя от тиристорного регулятора напряжения**

#### **3.2.1. Принцип построения архитектуры нейросетевого наблюдателя и выбор алгоритма обучения**

Как показано в главе 2 нейронная сеть обладает высоким уровнем обобщающих свойств, которые ей присущи за счет нахождения скрытых корреляционных связей между входными и выходным сигналами в процессе обучения [80]. Процесс обучения нейронной сети состоит в подборе в ходе итерационного процесса весовых коэффициентов, что с точки зрения вычислительной математики относится к классу задач оптимизации.

Наиболее перспективными из известных методов оптимизации являются: алгоритм градиентного спуска, алгоритм Левенберга – Марквардта, алгоритм градиентного спуска с возмущением, алгоритм обучения (АО) М. Ф. Моллера [80–84].

Основной задачей обучения нейронной сети является минимизация целевой функции  $f(x)$ . Решением данной задачи является построение последовательности точек, обладающих свойством  $f(x^{k+1}) < f(x^k), k = 0, 1, \dots$  [80].

В общем виде последовательность точек для  $(k+1)$  - го шага итерации

$$x^{k+1} = x^k - \Delta x,$$

где  $x$  - вектор параметров.

При обучении нейронной сети **алгоритм градиентного спуска** используется для определения весов и смещений, тем самым уменьшая функционал ошибки (2.1). Точки последовательности определяются по правилу

$$\Delta x = t_k g ,$$

в которой  $t_k$  предварительно задается;  $g = \nabla f(x^k)$  – градиент функции, вычисленный в точке  $x^k$ . Шаг  $t_k$  остается неизменным в том случае, если функция убывающая, что определяется путем проверки условия  $f(x^{k+1}) - f(x^k) < 0$ . Считается, что локальный минимум найден в точке  $x^k$ , в которой  $\|g\| < \varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_1$  – заданное малое положительное число [81, 83].

При решении задач оптимизации предпочтительно найти глобальный минимум, который является наилучшим из возможных решений. Зачастую координаты глобального и локального минимумов целевой функции могут значительно различаться, а решение полученное "простым" методом, таким как метод градиентного спуска может преждевременно сходиться.

**Алгоритм градиентного спуска с возмущением** способен преодолевать локальные минимумы ошибки. Для приращения вектора настраиваемых параметров данный алгоритм образует следующее соотношение:

$$\Delta x^k = m_c \Delta x^{k-1} + (1 - m_c) l_r g^k,$$

где  $\Delta x^k$  – приращение вектора весов;  $m_c$  – параметр возмущения;  $l_r$  – параметр скорости обучения;  $g^k$  – вектор градиента функционала ошибки на  $k$ -ой итерации [80, 83].

В том случае, если  $m_c = 0$ , то изменение вектора настраиваемых параметров определяется только градиентом, если  $m_c = 1$ , то текущее приращение равняется предшествующему по величине и направлению.

Алгоритм обучения **Левенберга – Марквардта** [80, 81, 84] можно считать модифицированным методом Гаусса – Ньютона следующего вида:

$$\Delta x = (J^T J + \mu I)^{-1} g \quad (3.1)$$

В том случае, если  $\mu = 0$ , уравнение (3.1) принимает вид метода Гаусса – Ньютона [81]:

$$\Delta x = (J^T J)^{-1} g, \quad (3.2)$$

градиент рассчитывается по формуле  $g = J^T e$ .

В (3.1, 3.2)  $J = \frac{\partial e}{\partial x}$  – матрица Якоби производных функционала ошибки

по настраиваемым параметрам,  $e$  – вектор ошибки,  $\mu$  – коэффициент,  $I$  – единичная матрица. Данная матрица может быть вычислена стандартным методом обратного распространения ошибки [81].

В случае, если коэффициент  $\mu$  достаточно большой, получаем метод наискорейшего градиентного спуска [83], а если  $\mu$  мало, то алгоритм становится методом Гаусса – Ньютона [81]. Параметр  $\mu$  уменьшают в том случае, если функционал ошибки уменьшается и увеличивают, если увеличивается. Это обеспечивает уменьшение ошибки после каждой итерации алгоритма [81].

**Алгоритм обучения М.Ф. Моллера (Scaled Conjugate Gradient)**, предложенный Моллером [80], объединяет метод сопряженных градиентов с квазиньютоновскими методами, и в частном случае – подход, реализованный в алгоритме Левенберга – Марквардта [82].

Нейросетевой наблюдатель создавался для оценки угловой скорости вращения вала асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД. Особенностью создания такого наблюдателя является предобработка данных, так как входными данными для обработки являются токи и напряжения статора. При таком способе управления, особенностью которого является наличие бестоковых пауз, что значительно усложнит и затруднит процесс обучения нейросетевого наблюдателя.

В качестве предварительной обработки данных выступает преобразование токов, напряжений и их задержек в полярную систему координат:

$$\begin{aligned}
I_M(t) &= \sqrt{I_A(t)^2 + I_B(t)^2 + I_C(t)^2}; \\
U_M(t) &= \sqrt{U_A(t)^2 + U_B(t)^2 + U_C(t)^2}; \\
I_M(t - \Delta t) &= \sqrt{I_A(t - \Delta t)^2 + I_B(t - \Delta t)^2 + I_C(t - \Delta t)^2}; \\
U_M(t - \Delta t) &= \sqrt{U_A(t - \Delta t)^2 + U_B(t - \Delta t)^2 + U_C(t - \Delta t)^2}; \\
I_M(t - 2\Delta t) &= \sqrt{I_A(t - 2\Delta t)^2 + I_B(t - 2\Delta t)^2 + I_C(t - 2\Delta t)^2}; \\
U_M(t - 2\Delta t) &= \sqrt{U_A(t - 2\Delta t)^2 + U_B(t - 2\Delta t)^2 + U_C(t - 2\Delta t)^2}; \\
I_M(t - 3\Delta t) &= \sqrt{I_A(t - 3\Delta t)^2 + I_B(t - 3\Delta t)^2 + I_C(t - 3\Delta t)^2}; \\
U_M(t - 3\Delta t) &= \sqrt{U_A(t - 3\Delta t)^2 + U_B(t - 3\Delta t)^2 + U_C(t - 3\Delta t)^2}.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

На рис. 3.12 представлен вектор тока  $I(t)$  и его задержка  $I(t - \Delta t)$  в полярной системе координат, а на рис. 3.13 – принцип преобразования данных для обучения нейросетевого наблюдателя согласно уравнениям (3.3).

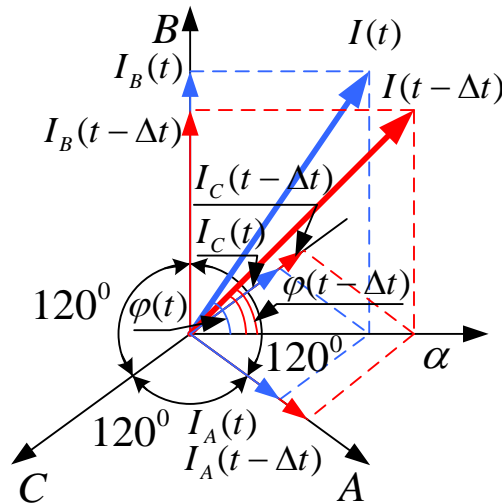


Рис. 3.12. Вектор тока и его задержка в полярной системе координат

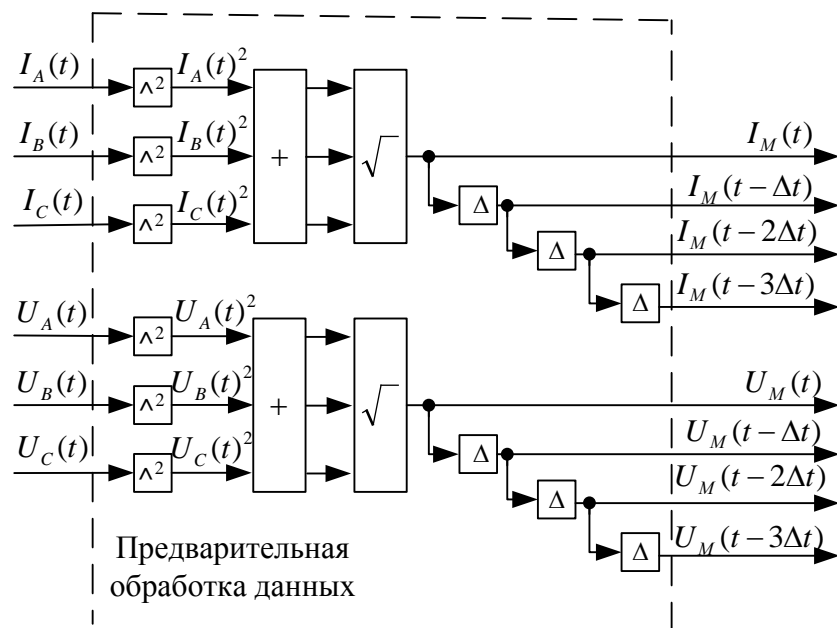


Рис. 3.13. Блок предварительной обработки данных

Испытание алгоритмов обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по системе ТРН – АД производилась на нейронной сети размерностью 9-7-27-1, где во входном слое было 9 нейронов, 7 и 27 – в скрытых слоях и 1 нейрон – в выходном слое. В качестве входных параметров нейросети использовались данные с блока предварительной обработки, а так же обратная связь по скорости с задержкой. Архитектура нейросетевого наблюдателя представлена на рис. 3.14. Для сравнения необходимых качества обучения и количества эпох было выбрано одинаковое время обучени.

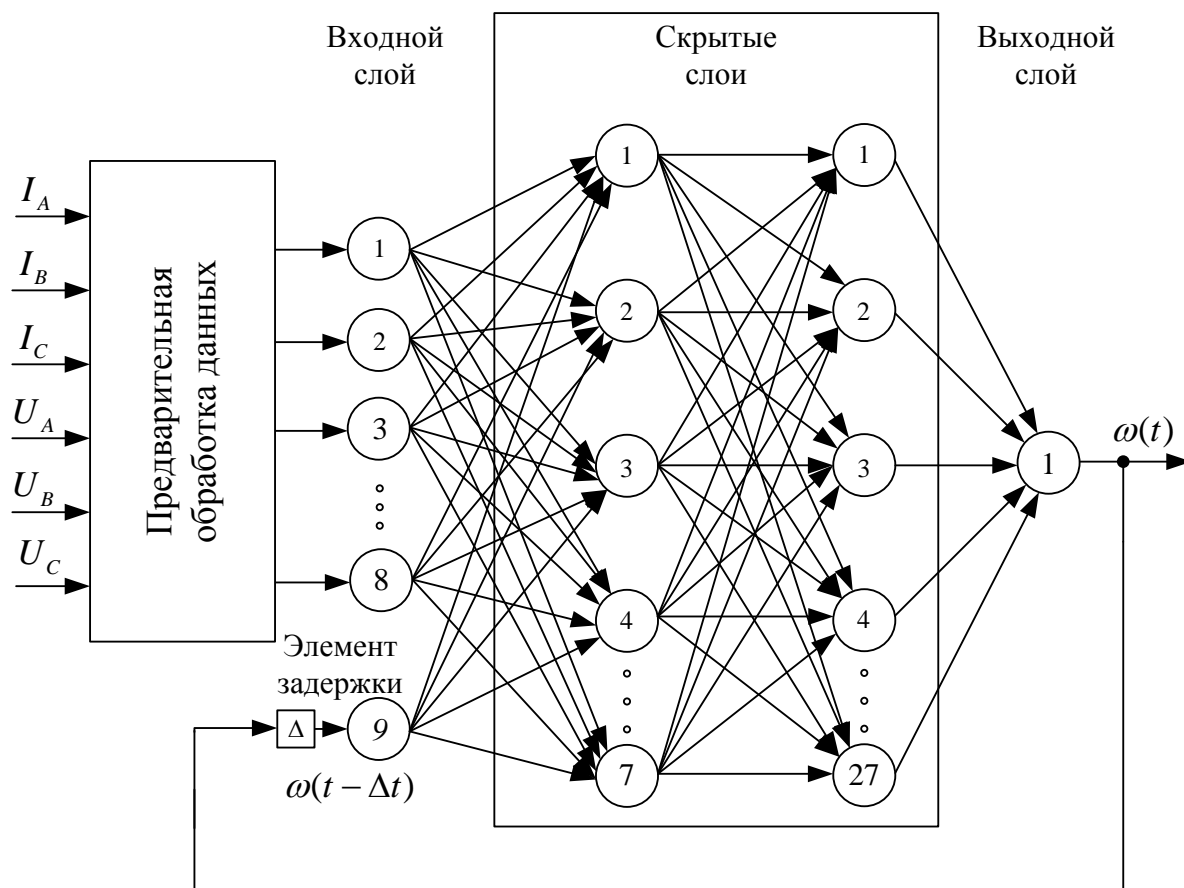


Рис. 3.14. Архитектура нейросетевого наблюдателя скорости ЭП по схеме ТРН - АД

В таблице 3.1 представлен сравнительный анализ качества обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости вращения вала асинхронного двигателя. Нейронная сеть размерностью 9-7-27-1 обучалась различными алгоритмами обучения за постоянный промежуток времени, равный 1964 сек. машинного времени, при неизменных вычислительных параметрах компьютера. Графа "Количество эпох" характеризует метод обучения как затраты вычислительной машины на процесс обучения нейронной сети, а графа "Качество обучения" – величину ошибки после обучений нейронной сети.

Сокращенная форма записи алгоритмов обучения в таблицах 3.1 и 3.2, соответствует написанию принятому в программной среде MATLAB.


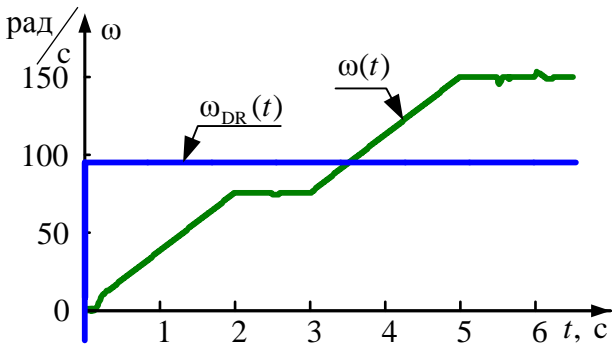
Таблица 3.1. – Результаты качества обучения нейронной сети

Алгоритм обучения	Количество эпох	Качество обучения
Алгоритм градиентного спуска ( <b>Traingd</b> )	22 947	10 300
Алгоритм градиентного спуска с возмущением ( <b>Traingdm</b> )	23 857	6 420
Алгоритм обучения М. Ф. Моллера ( <b>Trainscg</b> )	8 342	26,7
Алгоритм обучения Левенберга – Марквардта ( <b>Trainlm</b> )	500	0,000423

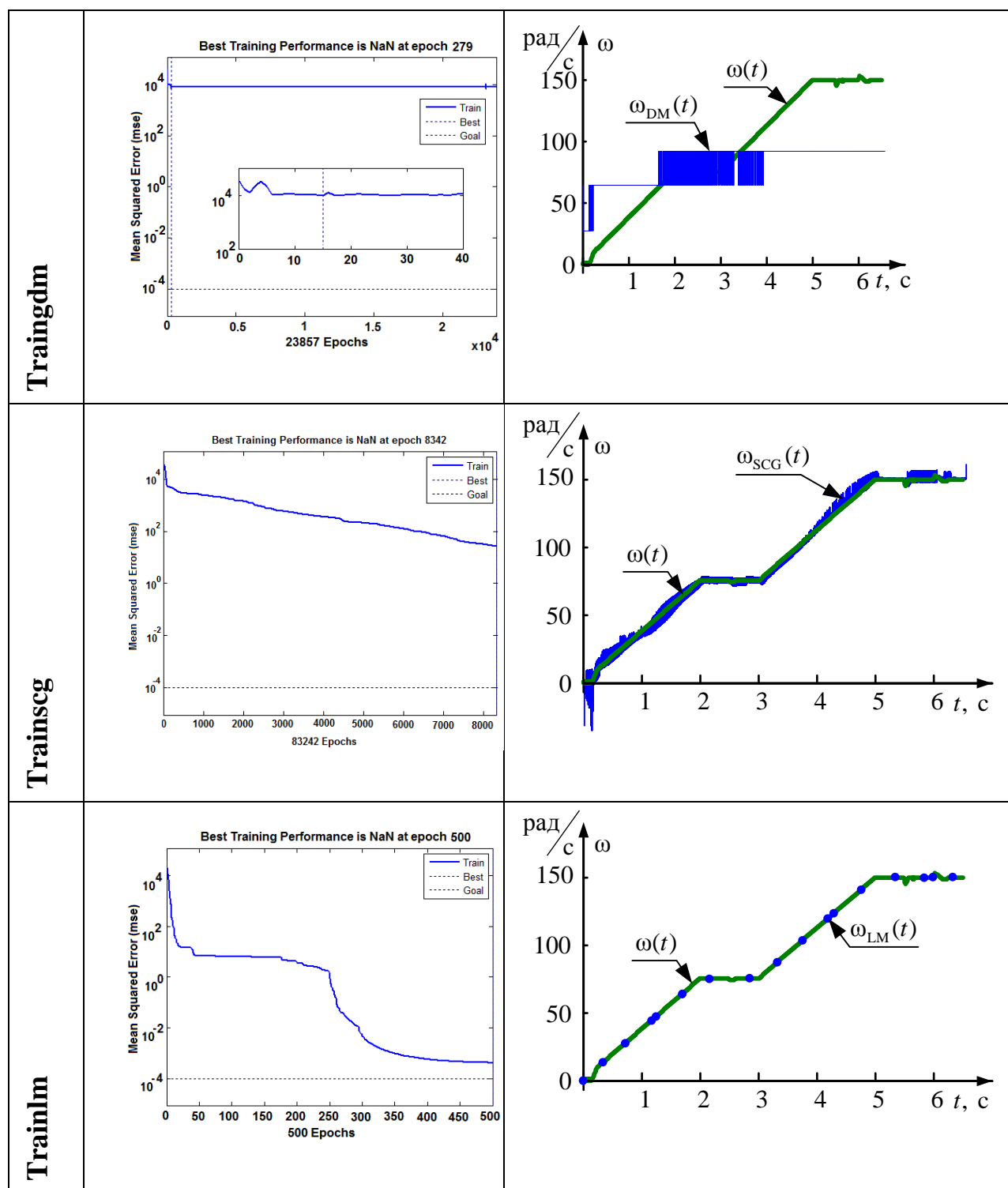
Параметры компьютера: процессор – Intel® Core™ i3 CPU M 380, частота – 2,53 ГГц, ОЗУ – 4 Гб, тип системы – 64-разрядная операционная система

В таблице 3.2 представлены график, характеризующий величину ошибки обучения в процессе обучения нейронной сети, и график, характеризующий качество обработки данных нейронной сетью.

Таблица 3.2. - Результаты качества обучения нейронной сети

АО	Качество обучения	Переходный процесс
<b>Traingd</b>		

Продолжение Таблицы 3.2.



Из таблицы 3.2 видно, что такие алгоритмы обучения, как алгоритм градиентного спуска, алгоритм градиентного спуска с возмущением – совершенно не справляются с поставленной задачей. Алгоритм обучения М. Ф. Моллера – справляется с задачей, но имеет высокой уровень ошибки.



Алгоритм обучения Левенберга – Марквардта наилучшим образом справляется с поставленной задачей.

На рис. 3.15 представлены в сравнении графики переходных процессов по скорости с реального датчика скорости и с нейросетевого наблюдателя, созданного на основе алгоритма обучения Левенберга - Марквардта, для различных технологических режимах работы, в число которых входит: работа двигателя при скорости задания 75 рад/с (области работы – A, B, C), работа двигателя при скорости задания 150 рад/с (области работы – D, E, F), пуск в холостую (области работы – A), разгон до максимальной скорости (области работы – D), наброс нагрузки (области работы – B, E), сброс нагрузки (области работы – C, F).

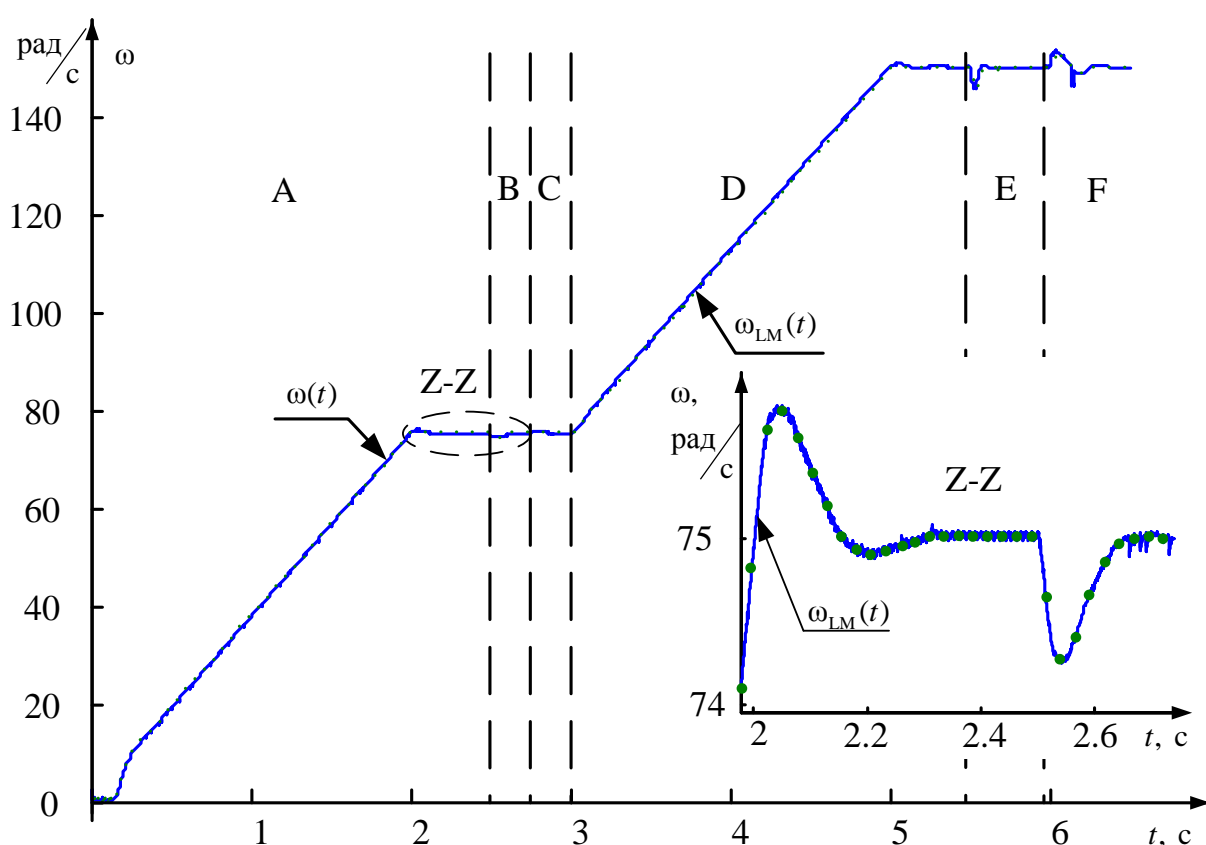


Рис. 3.15. Графики переходных процессов по скорости с реального датчика скорости  $\omega(t)$  и с нейросетевого наблюдателя  $\omega_{LM}(t)$

Процессы показанные на рис. 3.15 иллюстрируют приемлемое качество обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД.

По результатам обучения нейросетевого наблюдателя видно, что при одной и той же продолжительности обучения наилучшее качество обучения было достигнуто с применением алгоритма обучения Левенберга – Марквардта. Но данный алгоритм требует наибольших вычислительных ресурсов компьютера. Это видно из того, что за 1964 сек. машинного времени данный алгоритм обработал только 500 итераций, в то время как другие алгоритмы на порядок выше.

### **3.2.2. Влияние выбора функции активации нейрона на качество обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ЭП по схеме ТРН - АД**

При обучении нейронной сети большое значение имеет выбор функции активации нейронов. Как показано в главе 2 активационная функция определяет выходное значение нейрона, в зависимости от входного сигнала, сигнала сдвига и синаптических весов нейрона, образующихся в процессе обучения. В данном параграфе описан процесс выбора функций активации нейронов скрытого слоя нейросетевого наблюдателя для оценки угловой скорости вращения ротора в замкнутом электроприводе по схеме ТРН – АД.

Функции активации можно разделить на две группы (рис. 3.16): непрерывно-дифференцируемые и функции с разрывной производной.

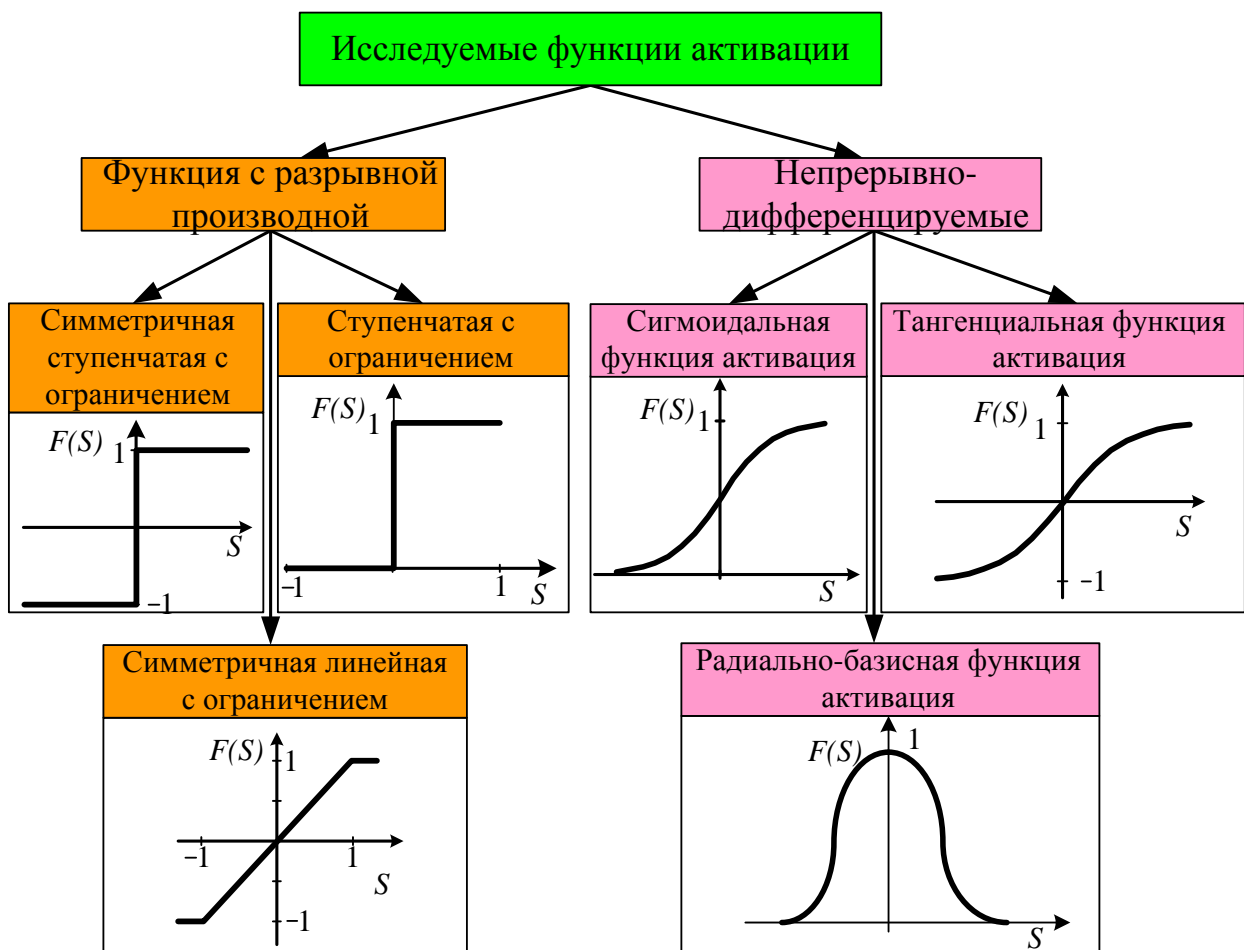


Рис. 3.16. Исследуемые функции активации для построения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при питании АД от ТРН

Проводилось исследование нейросетей имеющих непрерывно-дифференцируемые функции активации и функции с разрывной производной. К непрерывно-дифференцируемым функциям активации относятся: сигмоидальная, тангенциальная и радиально-базисная; к функциям с разрывной производной – ступенчатые функции активации и симметричная линейная с ограничением [1, 53, 87] (рис. 3.16). Характер функции активации значительно влияет на качество обучения нейронной сети.

Для исследования выбран нейросетевой наблюдатель размерностью 9-7-27-1 (рис. 3.14), входными параметрами для которого служат данные с блока предварительной обработки сигнала, описываемого ранее по уравнению (3.3). Метод обучения нейросетевого наблюдателя был выбран согласно рекомендациям, представленным в параграфе 3.2.1.

Нейронная сеть состоит из одного входного, двух скрытых слоев и одного выходного слоя. Входной слой нейросетевого наблюдателя не имеет функции активации, а является ретранслятором, выходной слой имеет линейную функцию активации.

В данном параграфе были выбраны для исследования следующие функциями активации скрытых слоев (рис. 3.16):

- пороговая функция;
- сигмоидальная функция;
- тангенциальная функция.

В таблице 3.3 представлен сравнительный анализ качества обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости вращения вала асинхронного двигателя. Нейронная сеть размерностью 9-7-27-1 обучалась по алгоритму Левенберга – Марквардта за постоянный промежуток времени, равный 1964 сек. машинного времени, при неизменных вычислительных параметрах компьютера.

Таблица 3.3. – Результаты обучения нейронной сети

<b>Функция активации</b>	<b>Градиент</b>	<b>Количество эпох</b>	<b>Качество обучения</b>
Пороговая функция	$3.79 \cdot 10^{-13}$	-	10300
Сигмоидальная функция	4,03	4205	181
Тангенциальная функция	1,86	500	0,000423

Параметры компьютера: процессор – Intel® Core™ i3 CPU M 380, частота – 2,53 ГГц, ОЗУ – 4 ГБ, тип системы – 64-разрядная операционная система

Функции активации с разрывной производной в исследовании не участвовали, так как для сложных динамических объектов, к которым можно отнести асинхронный электропривод по схеме ТРН - АД, ИНС с таким типом

функций активации сложно подобрать корреляционные связи между входными и выходными параметрами системы и найти глобальный минимум ошибки при обучении нейронной сети. Примером тому послужила пороговая функция активации, в которой на первом этапе обучения градиент составил  $3.79 \cdot 10^{-13}$ , а величина ошибки обучения — 10 300, данные указаны в таблице 3.3. Согласно рекомендациям [56] нейронная сеть с радиально-базисной функцией активации составляется не более чем из трех слоев: входного, скрытого и выходного. Исследуемая нейронная сеть состоит из четырех слоев, вследствие чего данная функция активации в исследовании так же не участвует. Такая нейронная сеть обладает высокой обучающейся способностью, но требует большого количества нейронов в скрытом слое.

Согласно проведенным исследованиям, представленным в таблице 3.3, наилучшим качеством обучения обладает нейронная сеть с тангенциальными функциями активации в скрытом слое. На рис. 3.17 представлены графики переходных процессов по скорости электропривода по схеме ТРН - АД в сравнении с нейросетевым наблюдателем скорости, обученным при различных функциях активации в скрытом слое.

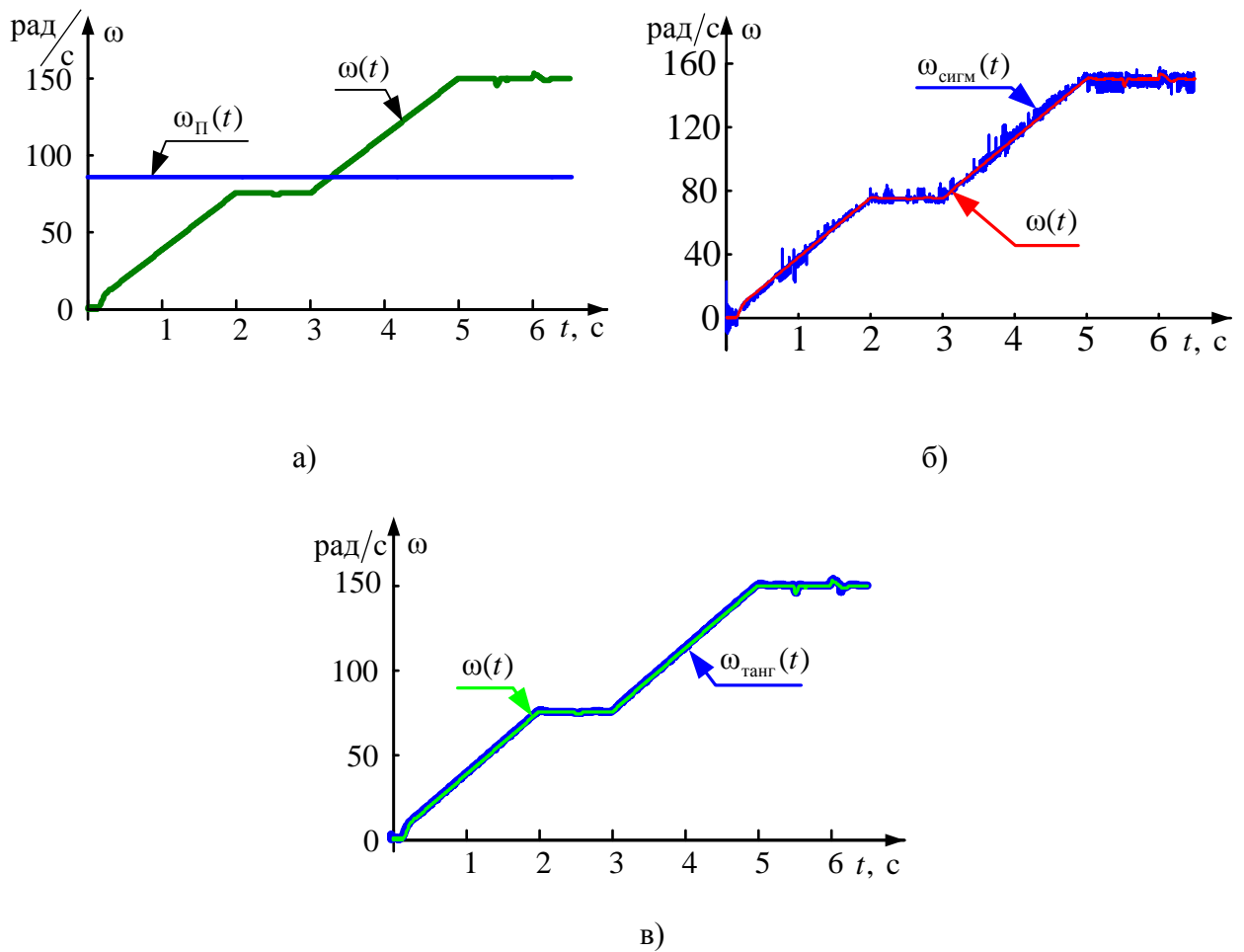


Рис. 3.17. Переходные процессы по скорости с различными функциями активации: а) пороговая функция; б) сигмоидальная функция; в) тангенциальная функция

Для такого нейросетевого наблюдателя, обучаемого по алгоритму обучения Левенберга – Марквардта, за 1964 сек. машинного времени величина градиента составила 1,86, а величина ошибки обучения – 0,000423. На основе анализа результатов, представленных на рис. 3.17, следует, что наилучшими обобщающими свойствами обладает нейронная сеть с тангенциальной функцией активации, относящаяся к классу непрерывно-дифференцируемых, а наихудшим – пороговая функция из класса функций с разрывной производной.

### 3.3. Исследование статики и динамики замкнутого бездатчикового асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости

При регулировании скорости вращения вала асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД необходимо исследовать замкнутую по скорости систему управления. Использование реальных датчиков скорости ведет к значительному удорожанию оборудования, так как стоимость высококачественного датчика скорости соизмерима со стоимостью электродвигателя малой мощности, к увеличению потенциального числа отказов оборудования вследствие увеличения количества компонентов системы [88, 89]. Вследствие чего, использование реальных датчиков для оценки скорости вращения вала двигателя в системах ТРН – АД крайне нежелательно и нецелесообразно из соображений удобства автоматизации технологического процесса [90].

В данном разделе описываются результаты исследований о возможности использования нейросетевого наблюдателя скорости при работе в замкнутом асинхронном электроприводе по схеме ТРН - АД на основе анализа статических и динамических режимов работы.

Согласно [29, 66] уравнение, описывающее статические механические характеристики замкнутого асинхронного ЭП по схеме ТРН-АД с ДС имеет вид:

$$\omega = \omega_{0\text{з.с}} - \frac{M}{\beta_{\text{з.с}}}, \quad (3.4)$$

где  $\omega_{0\text{з.с}} = U_{\text{з.с}} / k_{o.c}$ ;  $\beta_{o.c} = k_{\text{з.с}} \cdot k_M \cdot k_{p.n} \cdot k_{p.c} / U_{1\text{ном}}$ ,  $\omega_{0\text{з.с}}$  – скорость идеального холостого хода,  $\beta_{\text{з.с}}$  – модуль жесткости, который определяется сигналом задания и коэффициентом обратной связи по скорости  $k_{o.c}$ . При большом значении  $k_{o.c}$  жесткость искусственных механических характеристик

получается значительной, и можно считать, что уравнение (3.4) удовлетворительно описывает реальную механическую характеристику [66].

При рассматриваемом способе регулировании скорости потери в роторной цепи пропорциональны скольжению. Для асинхронных двигателей с независимой вентиляцией работа на низких скоростях возможна при снижении его нагрузки в обратно пропорциональной зависимости от скольжения. Для двигателей с самовентилиацией снижение нагрузки должно быть значительнее. Это связано с ухудшениями условий вентиляции двигателя на малых скоростях [66, 91]. Область применения данного способа управления ограничивается механизмами, у которых момент нагрузки при регулировании скорости вниз от номинальной уменьшается [66], например, в электроприводе турбомеханизмов [92].

В параграфе 1.3. описан принцип работы асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД с обратной связью по скорости. Вместо реального датчика скорости применялся нейросетевой наблюдатель (рис. 3.14), использующий данные с датчиков тока и напряжения. Архитектура такого нейросетевого наблюдателя была описана и исследована в предыдущем параграфе.

Имитационная модель асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД замкнутого по наблюдателю скорости, реализованная в программе MATLAB Simulink, представлена на рис. 3.18 [93].



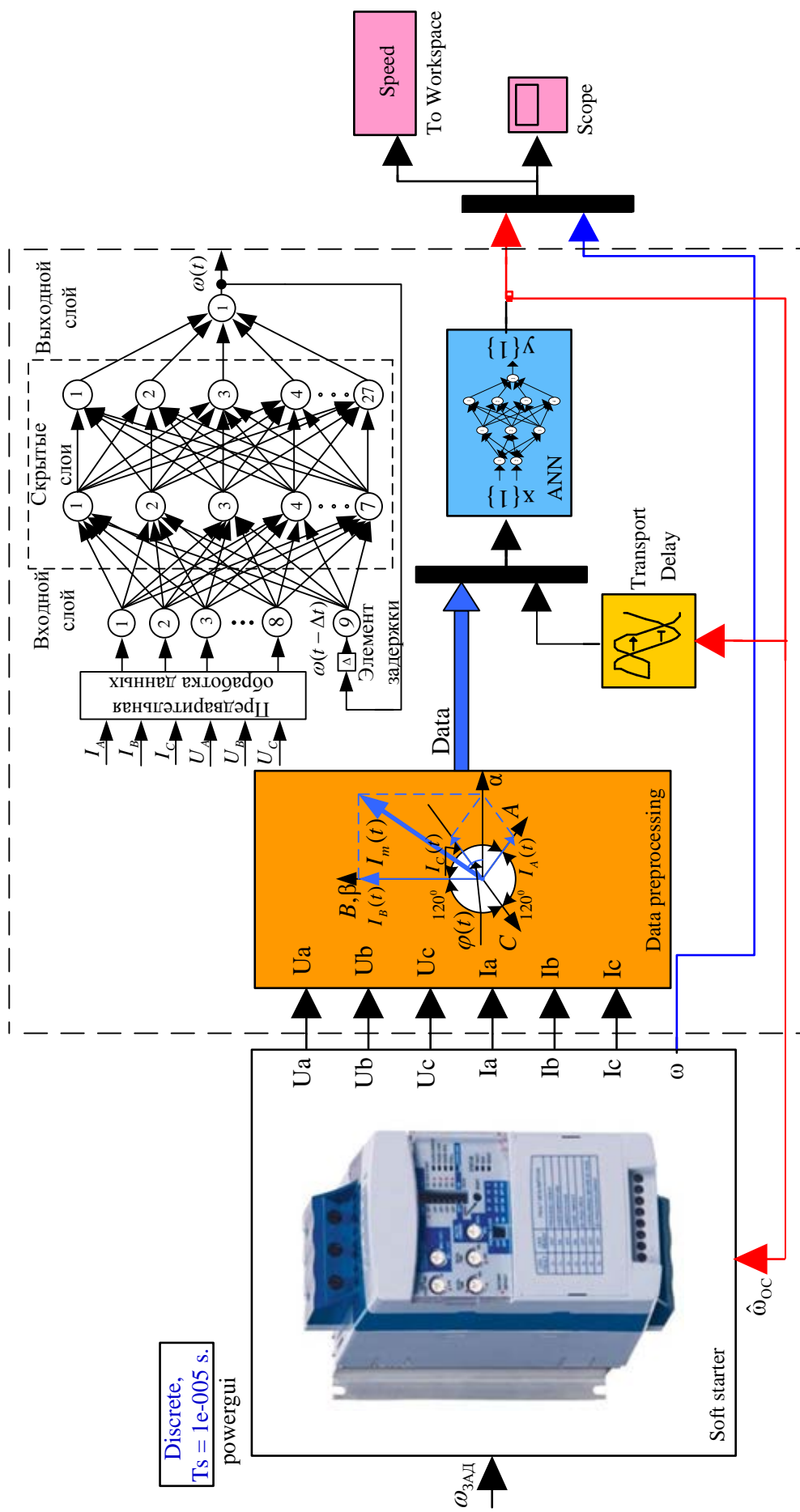


Рис. 3.18 Имитационная модель асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД, замкнутого по сигналу нейросетевого наблюдателя скорости

Проверка работоспособности созданного нейросетевого наблюдателя проводилась на имитационной модели во всех основных технологических режимах работы УПП [66]:

- Пуск ЭП при разных значениях сигнала задания;
- Наброс и сброс нагрузки.

Полный цикл работы ЭП с нейросетевым наблюдателем представлен на рис. 3.19. Основной задачей имитационного моделирования было определить потенциальную возможность нейросетевого датчика обеспечить технические требования, предъявляемые к устройствам плавного пуска на основе асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД. По результатам имитационного моделирования видно, что бездатчиковый асинхронный электропривод по схеме ТРН - АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости обеспечивает технические требования.

Качество идентификации скорости вращения вала асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД можно оценить, используя интегральную погрешность оценивания, представленный в (2.1).

Работа нейросетевого наблюдателя в составе замкнутого электропривода по схеме ТРН – АД исследовалась в динамических режимах (рис. 3.19): пуск в холостую до наименьшей скорости – режим *A*, доразгон до средней скорости – режим *D*, разгон до максимальной скорости – режим *G*, наброс и сброс нагрузки – режимы *B*, *E*, *H* и *C*, *F*, *I* соответственно. Пределы интегрирования в формуле (2.1) ограничиваются началом и окончания соответствующего режима работы.

Результаты вычислений интегрального критерия по формуле (2.1) для вышеупомянутых режимов работы сведены в таблицу 3.4.

Оценить изменение интегральной погрешности оценивания в различных технологических режимах работы электропривода можно по таблице 3.4 и рис. 3.20.

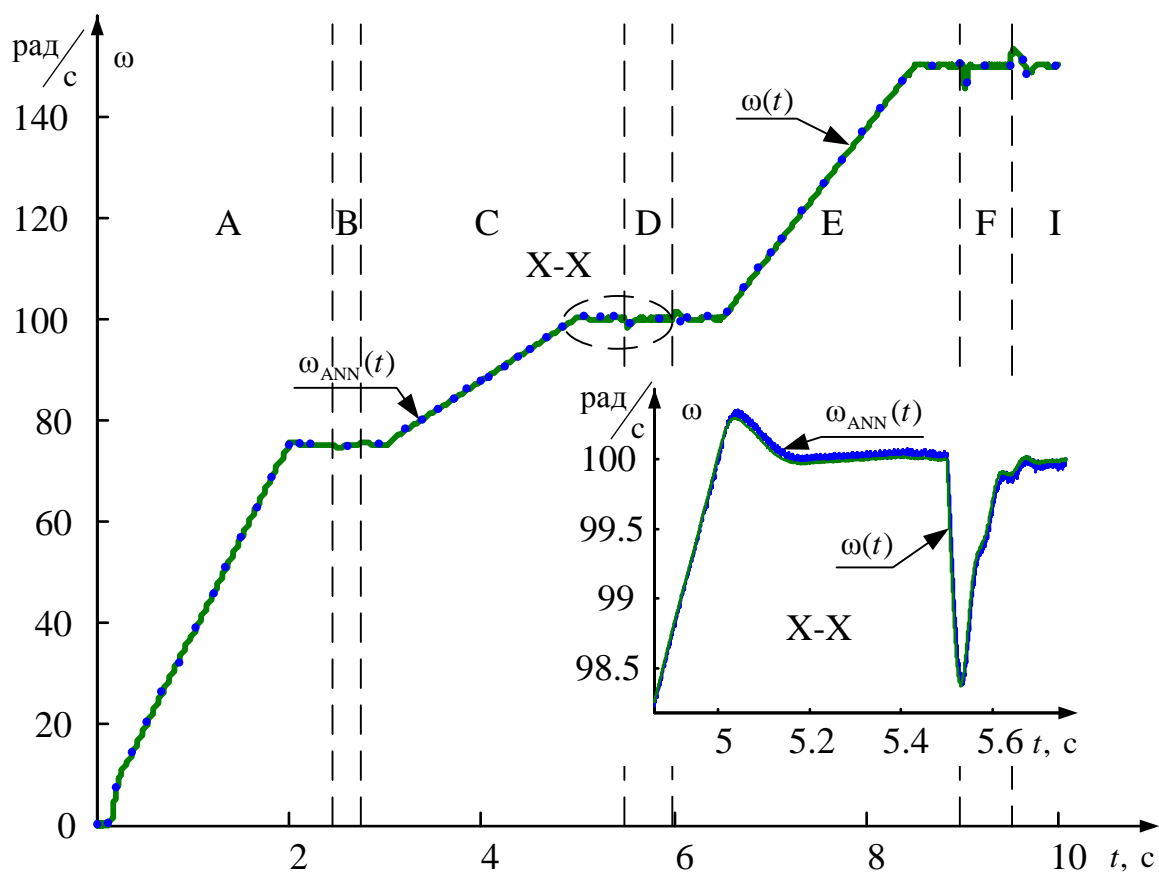


Рис. 3.19. Цикл работы асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости: А, В, С – пуск до  $\omega = 75 \text{ рад/с}$ ; D, E, F – пуск до  $\omega = 100 \text{ рад/с}$ ; G, H, I – пуск до  $\omega = 150 \text{ рад/с}$ ; В, Е, Н – наброс нагрузки  $M_c = 27 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; С, F, I – сброс нагрузки.

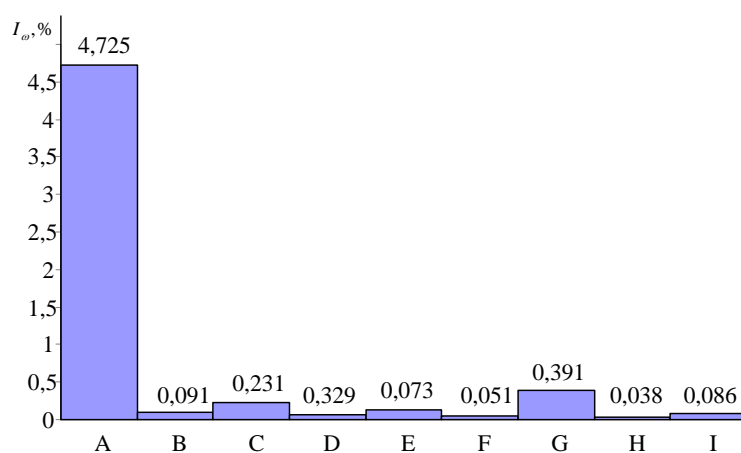


Рис. 3.20. Гистограмма интегральной оценки качества на всех участках работы асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости

Таблица 3.4. Интегральная погрешность оценивания

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$t_{нач}, c$	0	1,1	1,4	1,7	2,1	2,3	2,6	3	3,2
$t_{кон}, c$	1,1	1,4	1,7	2,1	2,3	2,6	3	3,2	3,5
$I_{\omega}, \%$	4,725	0,091	0,231	0,329	0,073	0,051	0,391	0,038	0,086

Анализируя результаты, представленные в таблице 3.4, рис. 3.20, следует отметить, что интегральная погрешность оценивания замкнутого по оценки скорости асинхронного электропривода ТРН - АД от нейросетевого наблюдателя в исследованных динамических режимах не превышает 5 %.

### 3.4. Выводы по третьей главе

1. Созданы имитационные модели замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД и его элементов, позволившие создать тренировочный набор для обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при типовых режимах работы УПП.

2. При создании нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД была предложена структура блока предобработки данных с датчиков статорных токов и напряжений, а так же их задержек с преобразованием в полярную систему координат, что позволило обеспечить работоспособность нейросетевого наблюдателя скорости в условиях несинусоидальности форм токов и напряжений статора и наличия режима бестоковых пауз.

3. В результате проведенных сравнительных исследований наиболее перспективных алгоритмов обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД выявлено несомненное преимущество алгоритма Левенберга - Марквардта, но данный алгоритм требует наибольших вычислительных ресурсов

компьютера по сравнению с другими рассмотренными методами. Это видно из того, что за 1964 сек. машинного времени данный алгоритм обработал только 500 итераций, в то время как другие алгоритмы на порядок выше.

4. Сравнительный анализ непрерывно-дифференцируемых функций и функций с разрывной производной при построении динамических нейронных сетей показал, что функции активации с непрерывной производной обладают наилучшими обобщающими свойствами при построении нейросетевого наблюдателя. Наилучшие показатели качества обучения были достигнуты с использованием тангенциальной функцией активации в нейронах скрытого слоя.

#### **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПО СХЕМЕ ТРН – АД**

##### **4.1. Описание лабораторного оборудования**

Апробация диссертационной работы была проведена на компьютеризированной экспериментальной установке кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Томского политехнического университета, собранной для исследования режимов работы асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД.

Программное обеспечение установки позволяет производить запись данных с датчиков тока, напряжения и скорости в виде массива данных и графиков.

Основными элементами экспериментальной установки (рис. 4.1) является асинхронный двигатель, тиристорный регулятор напряжения и двигатель постоянного тока независимого возбуждения, используемый в качестве нагрузки на валу АД. Асинхронный двигатель и двигатель постоянного тока соединены через маховик.

Параметры асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока независимого возбуждения представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1. Параметры АД

Частота тока, Гц	50
Номинальная полезная активная мощность, Вт	30
Номинальное напряжение, В	127
Схема соединения обмотки статора	Y
Схема соединения обмотки ротора	Y
Номинальный ток статора, А	0,35

Продолжение таблицы 4.1

КПД, %	36
$\cos \varphi_H$	0,73
Номинальная частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	1250
$x_1$ , о.е.	0,087
$R_1$ , о.е	0,18
$x'_2$ , о.е	0,15
$R'_2$ , о.е.	0,15

Таблица 4.2. Параметры машины постоянного тока

Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальная частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	1500
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
КПД, %	57,2
$\cos \varphi$	0,73
$R_{\text{я}}$ , Ом	86
$R_{\text{оя}}$ , Ом	1,15

Помимо вышеперечисленных элементов экспериментальная установка (рис. 4.1) состоит из: датчиков тока, напряжения и скорости; трехфазной трансформаторной группы, трехполюсного выключателя, коннектора, трехфазного источника питания, источника питания двигателя постоянного тока, персонального компьютера.

Каналы измерения токов, напряжений и скорости состоят из непосредственно датчиков промышленного исполнения и согласующих усилителей, коэффициенты которых представлены в таблице 4.3

Основные характеристики приборов, используемых в ходе эксперимента, представлены в таблице 4.4

Таблица 4.3. Коэффициенты согласующих усилителей каналов измерения

Коэффициенты усиления согласующего усилителя, о.е.	Измеряемая датчиком величина		
	Ток	Напряжение	Скорость
	1,1	198,257	56

Таблица 4.4 Основные характеристики экспериментального оборудования

Обозначение	Наименование и описание	Параметры
1	2	3
ИП1	<p><b><u>Трехфазный источник питания</u></b></p> <p>Предназначен для питания комплекта трехфазным переменным напряжением. Включается вручную. Имеет защиту от перегрузок, устройство защитного отключения, кнопку аварийного отключения и ключ от несанкционированного включения.</p>	<p>400 В ~; 16 А</p> <p>Ток срабатывания УЗО – 30 мА</p>
ИП2	<p><b><u>Источник питания машины постоянного тока</u></b></p> <p>Предназначен для питания обмоток якоря и возбуждения постоянным током. Включается вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ). Якорное напряжение регулируется вручную или дистанционно. Напряжение возбуждения нерегулируемое.</p>	<p>Цепь якоря</p> <p>0...250 В –; 3 А</p> <p>Цепь возбуждения</p> <p>200 В –; 1 А</p>



Продолжение таблицы 4.4

1	2	3
ТТ	<p><b><u>Трехфазная трансформаторная группа</u></b></p> <p>Предназначена для преобразования однофазного / трехфазного напряжения.</p>	<p>3×80 В·А; 230 /240,230, 220, 133, 127 В</p>
ТР	<p><b><u>Тиристорный преобразователь / регулятор</u></b></p> <p>Предназначен для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока (режим преобразователя) и трехфазного асинхронного двигателя (режим регулятора). Преобразует трехфазное напряжение синусоидального тока в напряжение постоянного тока, а также в трехфазное напряжение переменной величины. Выходное напряжение регулируется вручную или дистанционно / автоматически (от ПЭВМ).</p>	<p>3×400 В ~; 2 А</p>
ТВ	<p><b><u>Трехполюсный выключатель</u></b></p> <p>Предназначен для ручного или дистанционного / автоматического (от ПЭВМ) включения / отключения электрических цепей.</p>	<p>400 В ~; 10 А</p>

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3
ДТН	<b><u>Блок датчиков тока и напряжения</u></b> Предназначен для получения нормированных электрических сигналов, пропорциональных напряжениям и токам в контролируемых силовых цепях постоянного и переменного тока, и гальванически с последними не связанных.	3 измерительных преобразователя «ток – напряжение» (5 А/1 А)/5 В; 3 измерительных преобразователя «напряжение - напряжение» (1000 В/100 В) /5 В
К	<b><u>Коннектор</u></b> Предназначен для обеспечения удобного доступа к входам / выходам платы сбора данных PCI 6024Е персонального компьютера.	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
АД	<b><u>Асинхронный двигатель</u></b>	50 Вт; ~230 В; 1500 мин <sup>-1</sup>
ДС	<b><u>Указатель частоты вращения</u></b>	-2000...0...2000 мин <sup>-1</sup> Модель ВЕ 178А; Число импульсов за оборот в серии - 2500
ДПТ	<b><u>Двигатель постоянного тока</u></b>	90 Вт; 220 В 0,76 А (якорь) 220 В (возбуждение)
ПК	<b><u>Персональный компьютер</u></b> Предназначен для дистанционного / автоматического управления лабораторным комплексом и отображения информации о нем.	IBM-совместимый, плата сбора данных PCI 6024Е фирмы National Instruments

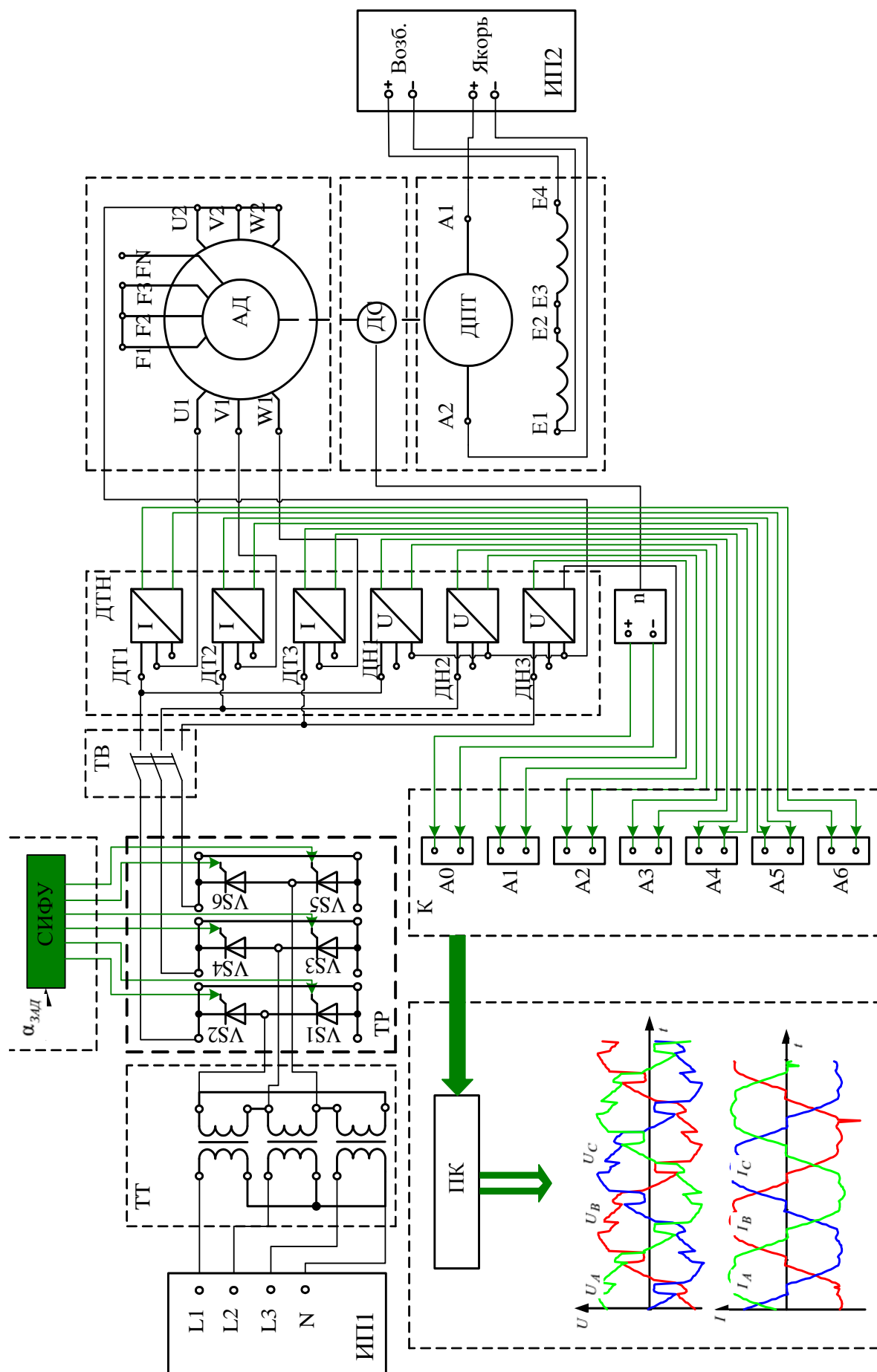


Рис. 4.1.. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки ТРН-АД

В таблице 4.5 представлены характеристики аналогового входа [94] платы сбора данных PCI 6024E фирмы National Instruments.

Таблица 4.5 Характеристики аналогового входа платы сбора данных PCI 6024E фирмы National Instruments [93]

Количество каналов	16 однопроводных и 8 дифференциальных (режим выбирается программно для каждого канала)
Тип АЦП	последовательная аппроксимация
Разрешение	12 бит, 1 в 4096
Скорость сэмплирования	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 мкс (максимум)

На рис. 4.2 представлена экспериментальная установка асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД. Данная экспериментальная установка позволяет снятие статорных токов, напряжений и скорости при различных режимах работы для создания нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН – АД.

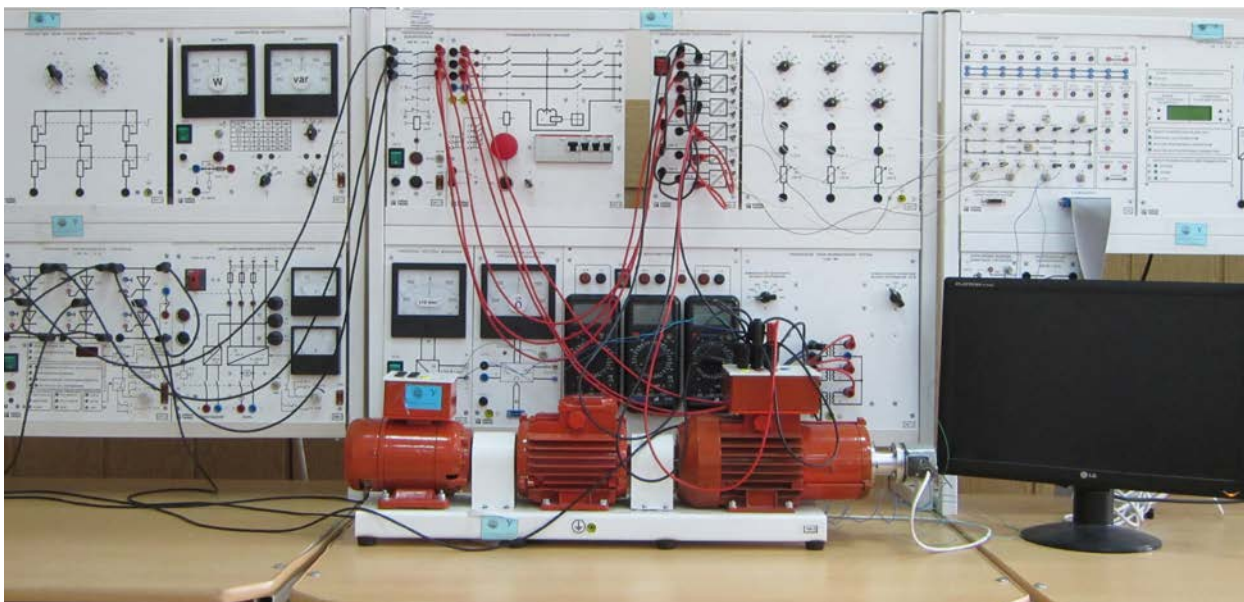


Рис. 4.2. Экспериментальная установка асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД

#### **4.2. Разработка прикладного программного обеспечения в среде графического программирования LabVIEW для снятия данных с компьютеризированной экспериментальной установки**

Большое значение в современной промышленности получили электропривода, управляемые от персонального или промышленного компьютера, а следственно и важным является и программное обеспечение, посредством которого это управление достигается.

Для снятия экспериментальных данных с датчиков статорных токов, напряжений и угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД была выбрана среда программирования LABVIEW [95], работающая совместно с платой сбора данных PCI 6024E фирмы National Instruments.

LABVIEW – это приложение для разработки программ, похожее на C, BASIC или LabWindows фирмы National Instruments. Однако, когда для создания кода эти системы программирования используют языки, основанные на текстовых командах, тогда как в LABVIEW используется

графический язык программирования, называемый G, с помощью которого программа создаётся в виде блок-схемы.

Возможно использование LABVIEW практически без опыта программирования. Терминология, программы и идеи, использованные в LABVIEW, знакомы всем учёным и инженерам. Кроме того, для описания действий в LABVIEW в основном используются графические символы, а не текст.

Разработанное прикладное программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW имеет два основных окна: лицевую панель (рис. 4.3) и окно блок-диаграмм (рис. 4.4) [96].

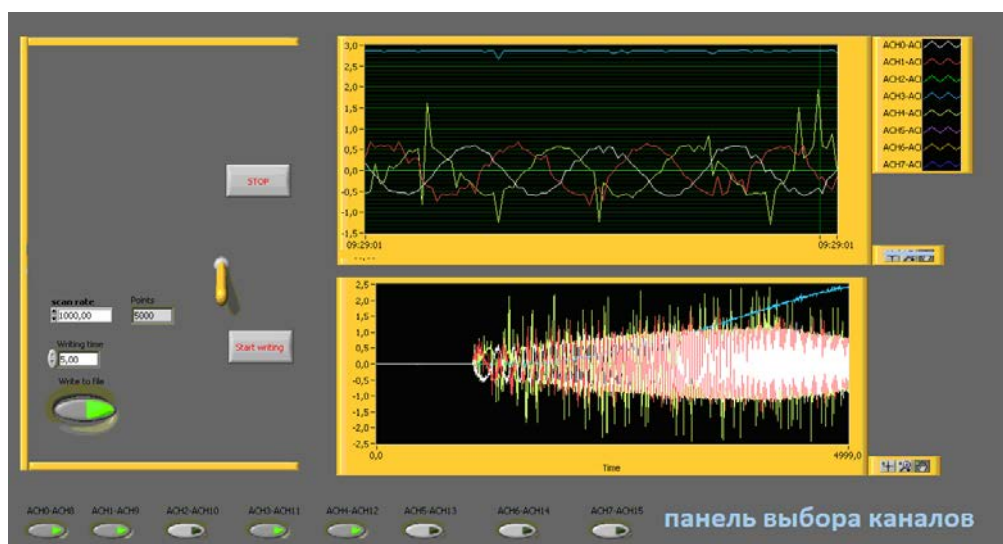


Рис. 4.3. Пользовательский интерфейс программы LabVIEW

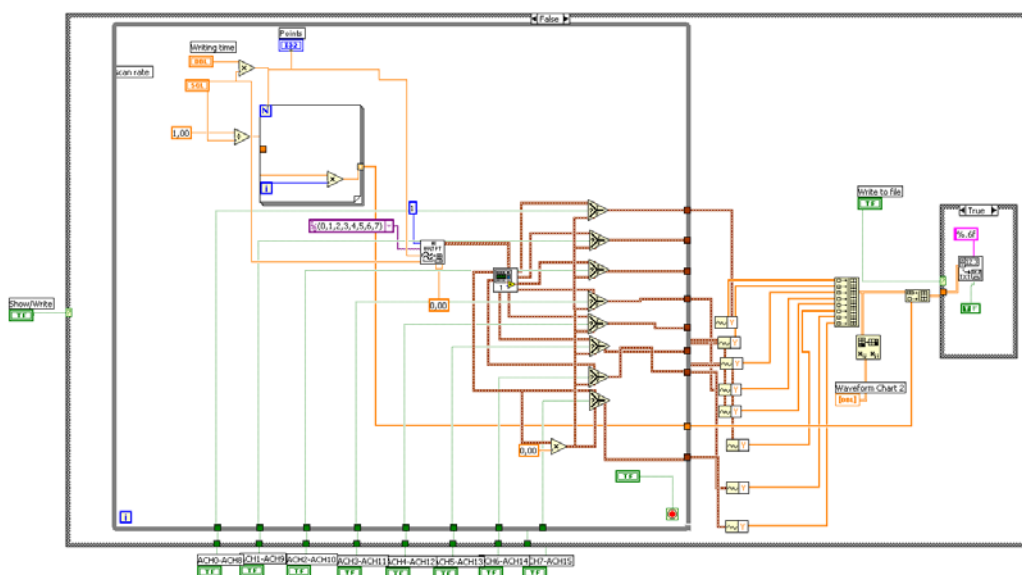


Рис. 4.4. Окно графического программирования программы LabVIEW

Лицевая панель программы состоит из таких блоков как группа кнопок и индикаторов для обеспечения работы программы, отвечающих за частоту и время снятия экспериментальных данных, осциллографы и панели выбора снимаемых каналов, позволяющих включать и отключать каналы для записи и отображения на осциллографах, как в демонстрационном режиме, так и в режиме записи.

Окно блок-диаграмм состоит из блоков, позволяющих графически программировать в программной среде LabVIEW.

#### **4.3. Методика проведения и обработки результатов эксперимента**

Целью экспериментальных исследований является создание нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН – АД и проверка его работоспособности в условиях реальных сигналов с датчиков статорных токов и напряжений.

Для создания нейросетевого наблюдателя были произведен ряд экспериментов при различных углах управления от минимального до максимального, равного  $60-65^\circ$  для разомкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД, представленные на рисунке 4.5.

На рисунке 4.5 представлены сигналы статорных токов, напряжений и скорости при различных углах управления разомкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД и различных режимах работы: пуске электропривода на холостом ходу, набросе и сбросе нагрузки, а так же его останова.

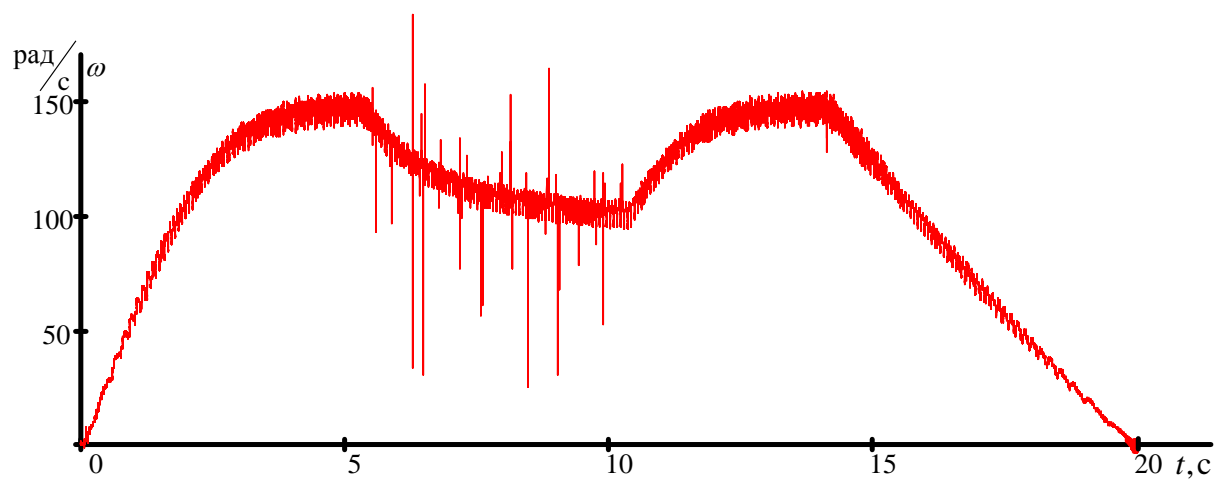


Рис. 4.5. Осциллограмма скорости при различных режимах работы и минимальном угле управления ТРН - АД

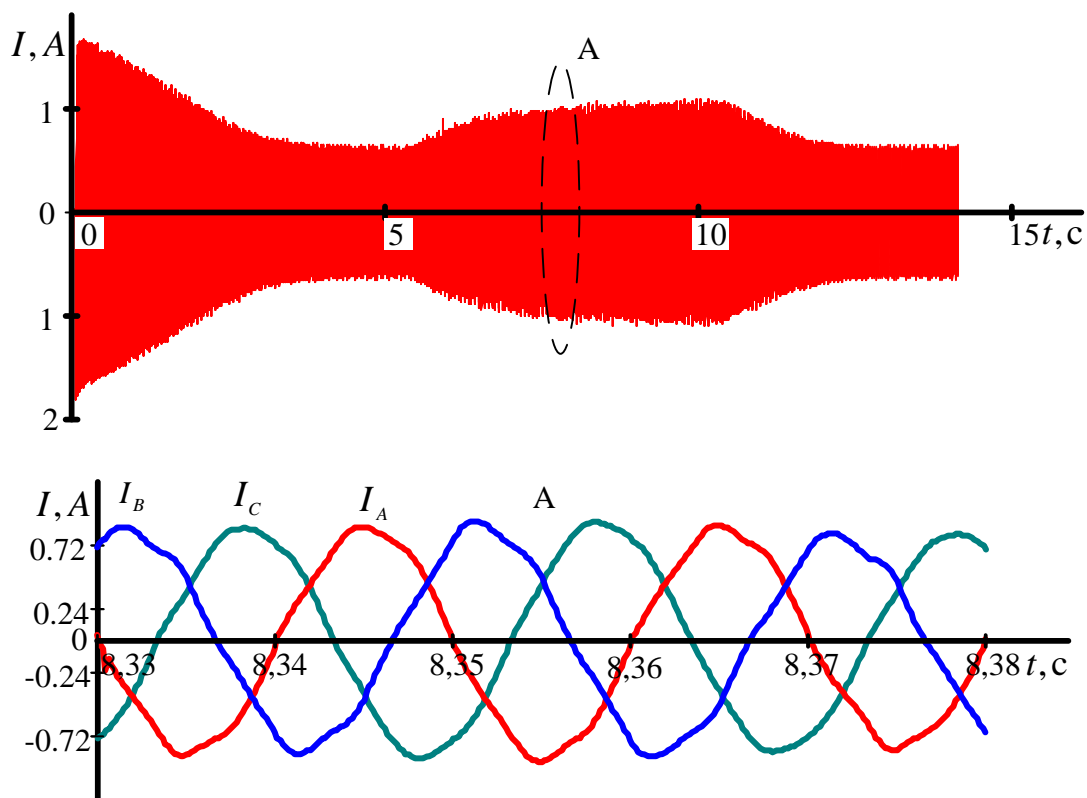


Рис. 4.6. Осциллограмма статорных токов при различных режимах работы и минимальном угле управления ТРН - АД



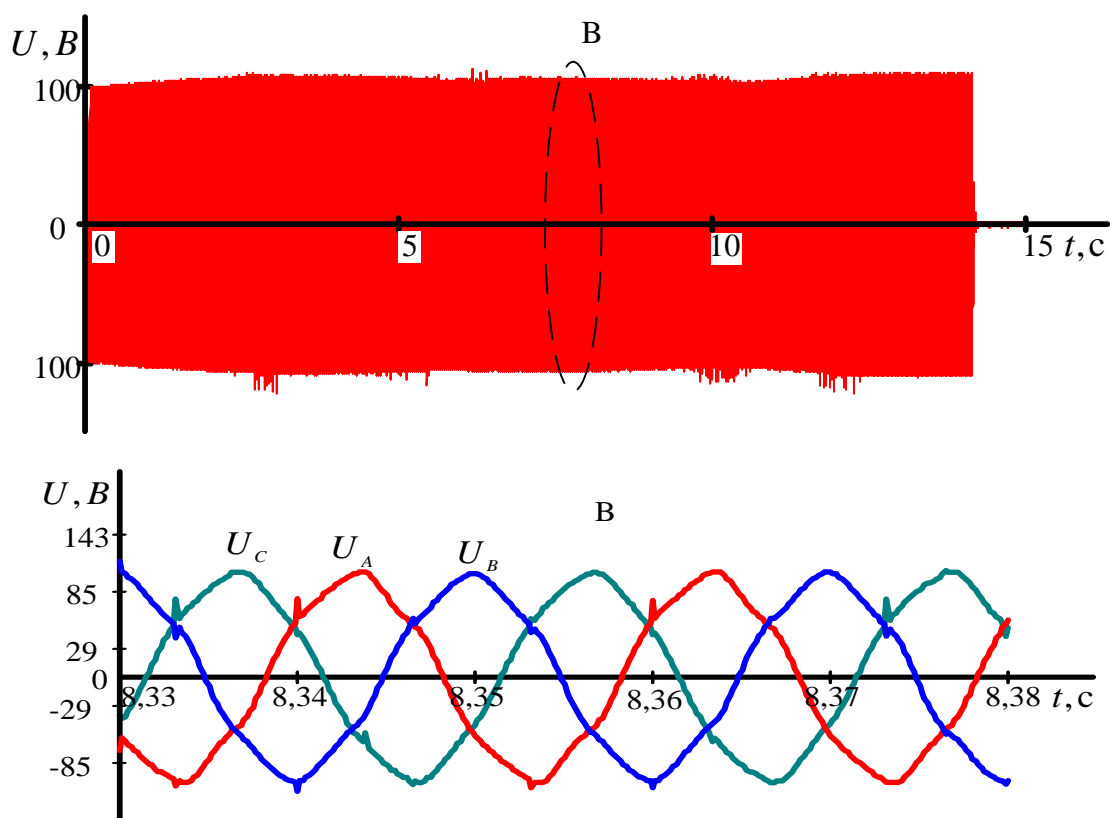


Рис. 4.7. Осциллограмма статорных напряжений при различных режимах работы и минимальном угле управления ТРН - АД

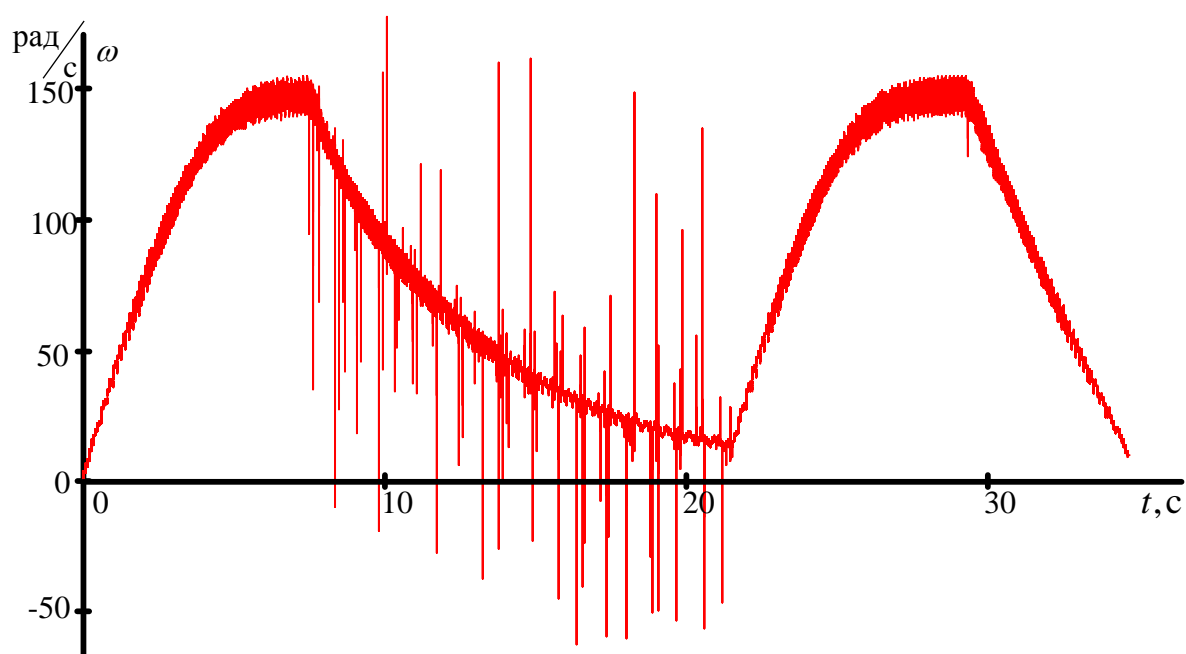


Рис. 4.8. Осциллограмма скорости при различных режимах работы и угле управления ТРН - АД  $65^\circ$

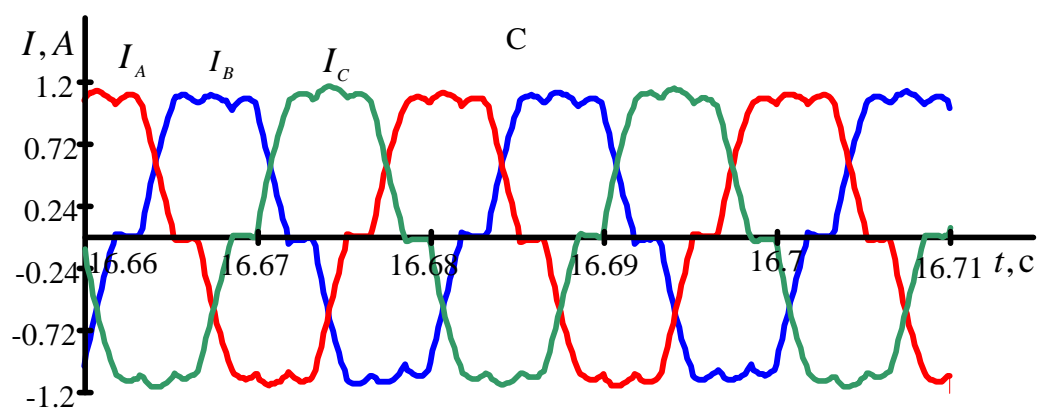
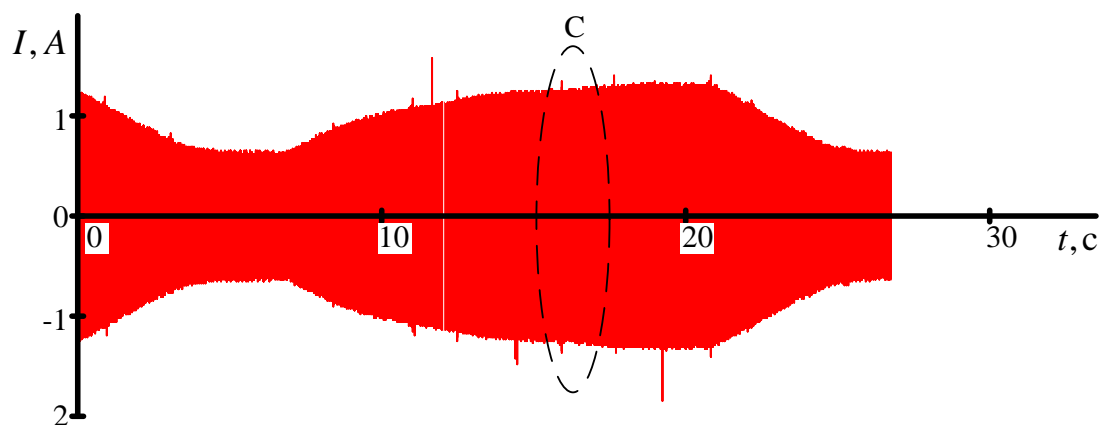


Рис. 4.9. Осциллограмма статорных токов при различных режимах работы и угле управления ТРН - АД  $65^\circ$

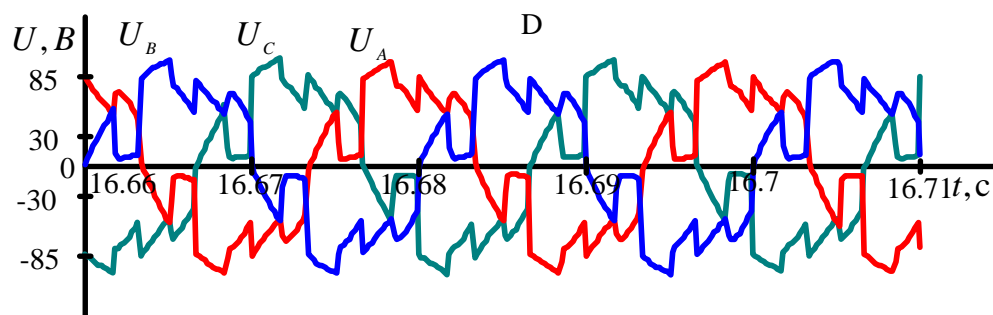
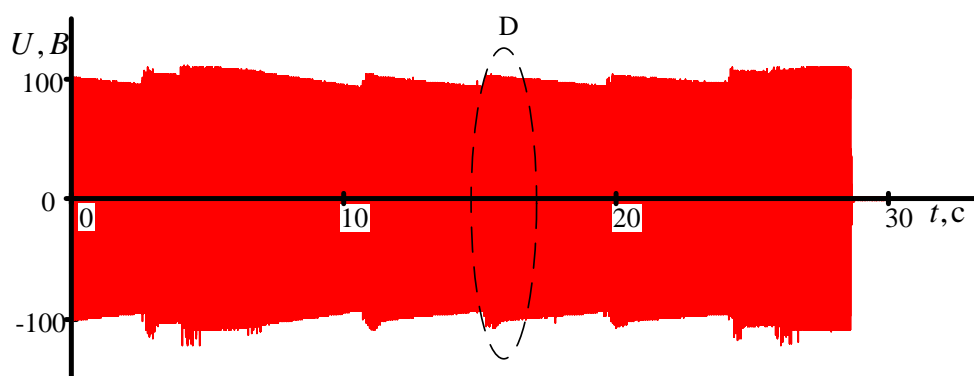


Рис. 4.10. Осциллограмма статорных напряжений при различных режимах работы и угле управления ТРН - АД  $65^\circ$

Согласно рисункам 4.6, 4.7, 4.9, 4.10 осциллограммы статорных токов и напряжений имеют несинусоидальную форму при управлении электропривода от тиристорного регулятора напряжения даже при минимальном угле управления. С увеличением угла управления тиристоров имеет место бестоковые паузы (рис. 4.9). Экспериментальные данные отличаются наличием шумов высокой частоты (рис. 4.5, 4.8).

На рисунках 4.11 - 4.14 представлены диаграммы статорных токов и напряжений в проекциях  $\alpha$  и  $\beta$  при работе электропривода под и без нагрузки в неподвижной системе координат при минимальном угле управления и угле  $65^\circ$  в статическом режиме.

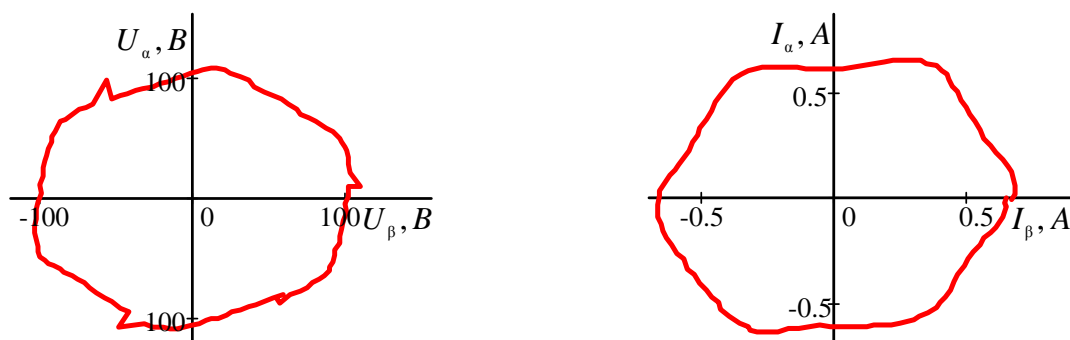


Рис. 4.11. Диаграммы статорных токов и напряжений в проекциях  $\alpha$  и  $\beta$  при работе электропривода без нагрузки в неподвижной системе координат при минимальном угле управления

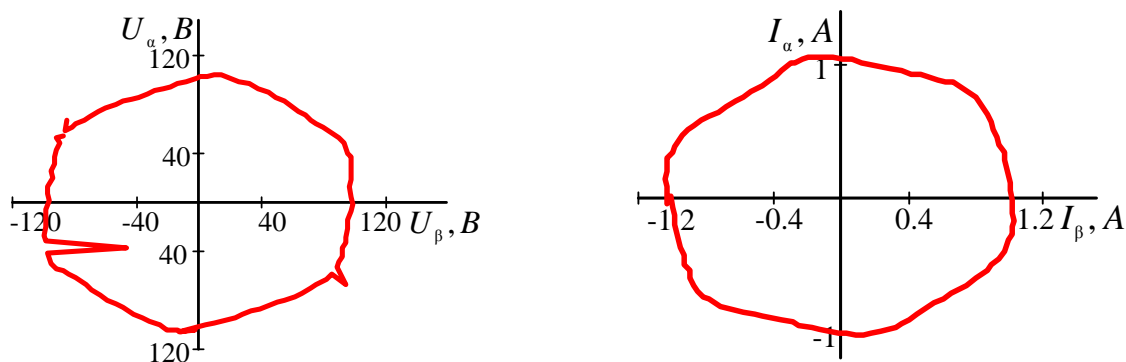


Рис. 4.12. Диаграммы статорных токов и напряжений в проекциях  $\alpha$  и  $\beta$  при работе электропривода без нагрузки в неподвижной системе координат при угле управления  $65^\circ$

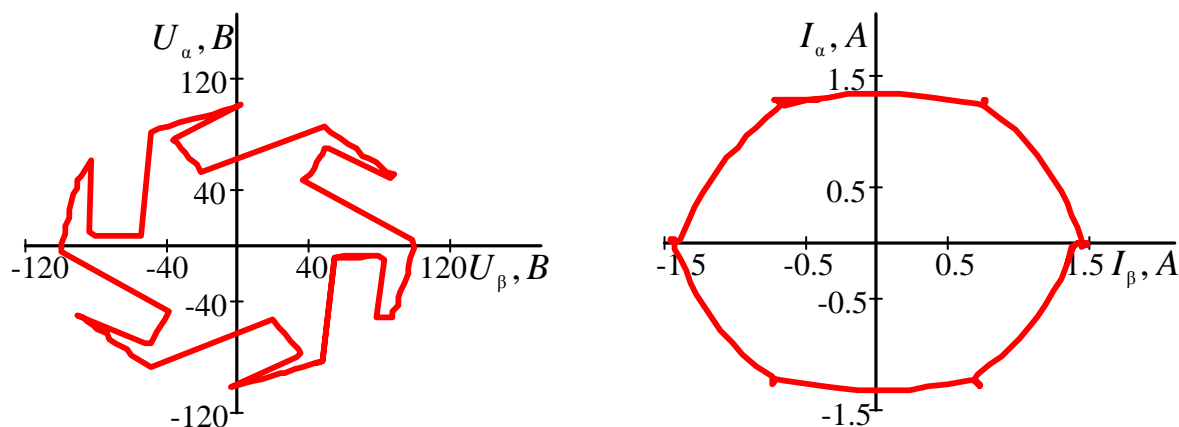


Рис. 4.13. Диаграммы статорных токов и напряжений в проекциях  $\alpha$  и  $\beta$  при работе электропривода под нагрузкой в неподвижной системе координат при угле управления  $65^\circ$

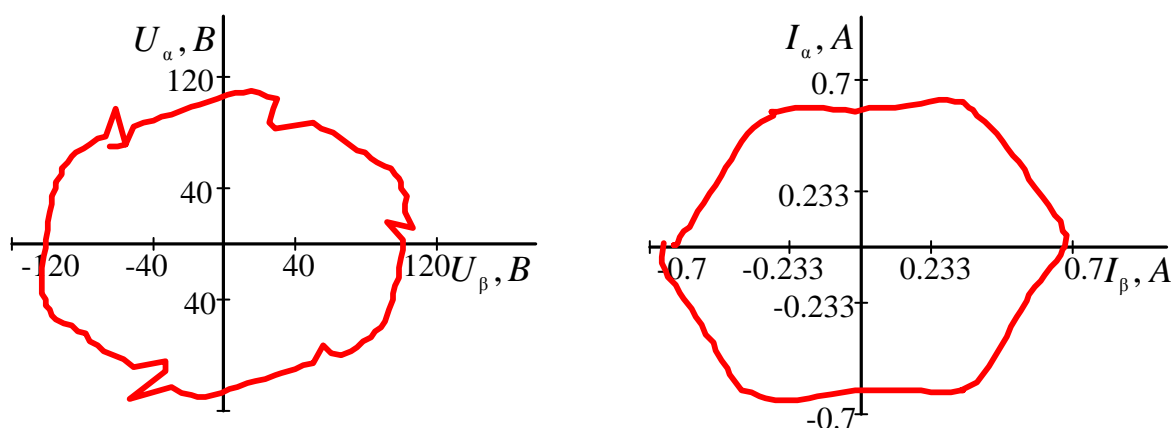


Рис. 4.14. Диаграммы статорных токов и напряжений в проекциях  $\alpha$  и  $\beta$  при работе электропривода под нагрузкой в неподвижной системе координат при минимальном угле управления

Из диаграмм можно заметить то, что с увеличением угла управления статорный ток возрастает (рис. 4.12, 4.13). При работе электропривода под нагрузкой и большим углом управления показана особо выраженная несинусоидальная зависимость статорных напряжений (рис. 4.13). Из осциллограмм на рисунках 4.11 и 4.14 видно, что несмотря на минимальный

угол управления статорные токи и напряжения имеют так же несинусоидальную зависимость.

После предварительной обработки данных согласно методике, предложенной в главе 4, статорные токи и напряжения имеют вид, представленных на рисунках 4.15 и 4.16.

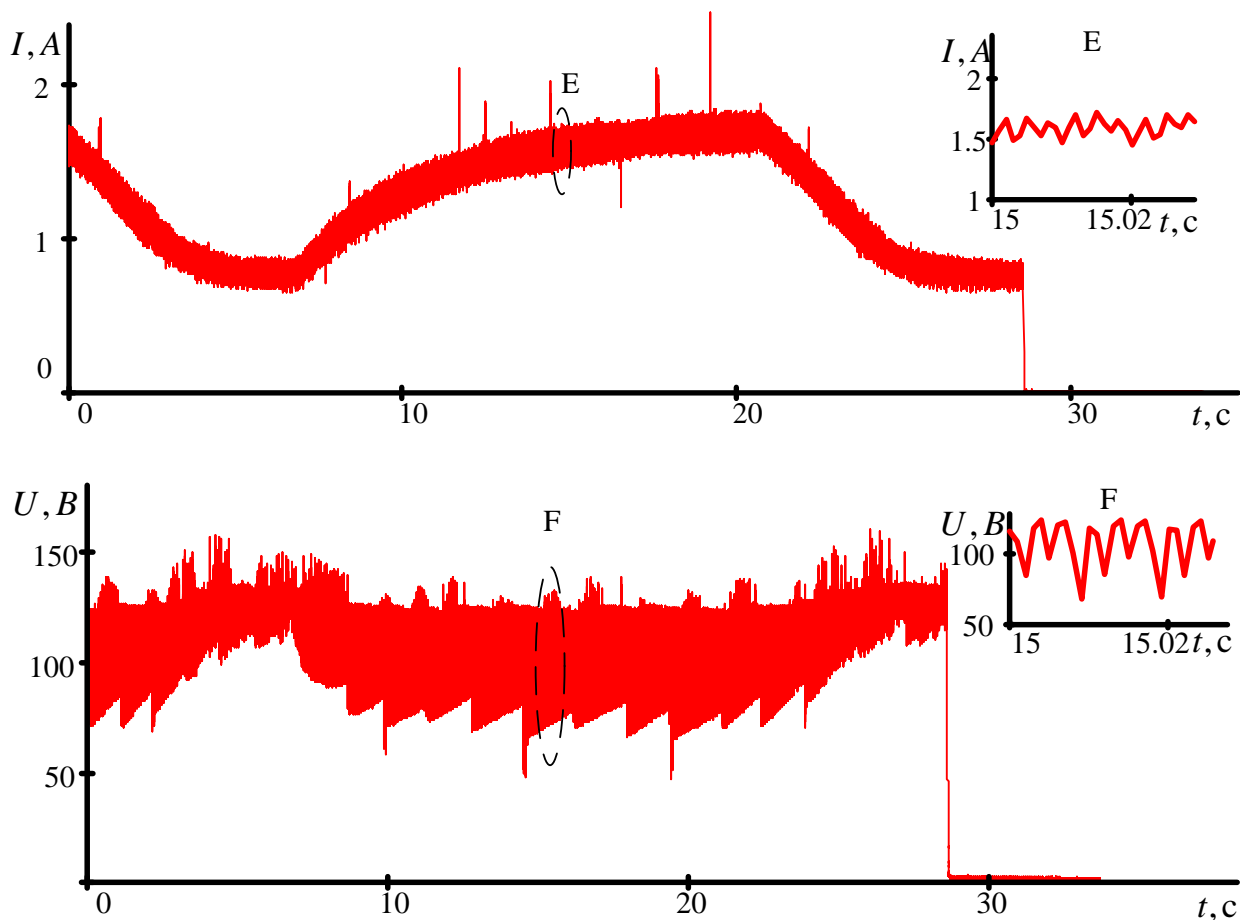


Рис. 4.15. Осциллограммы статорных токов и напряжений после предварительной обработки данных при угле управления "65°"

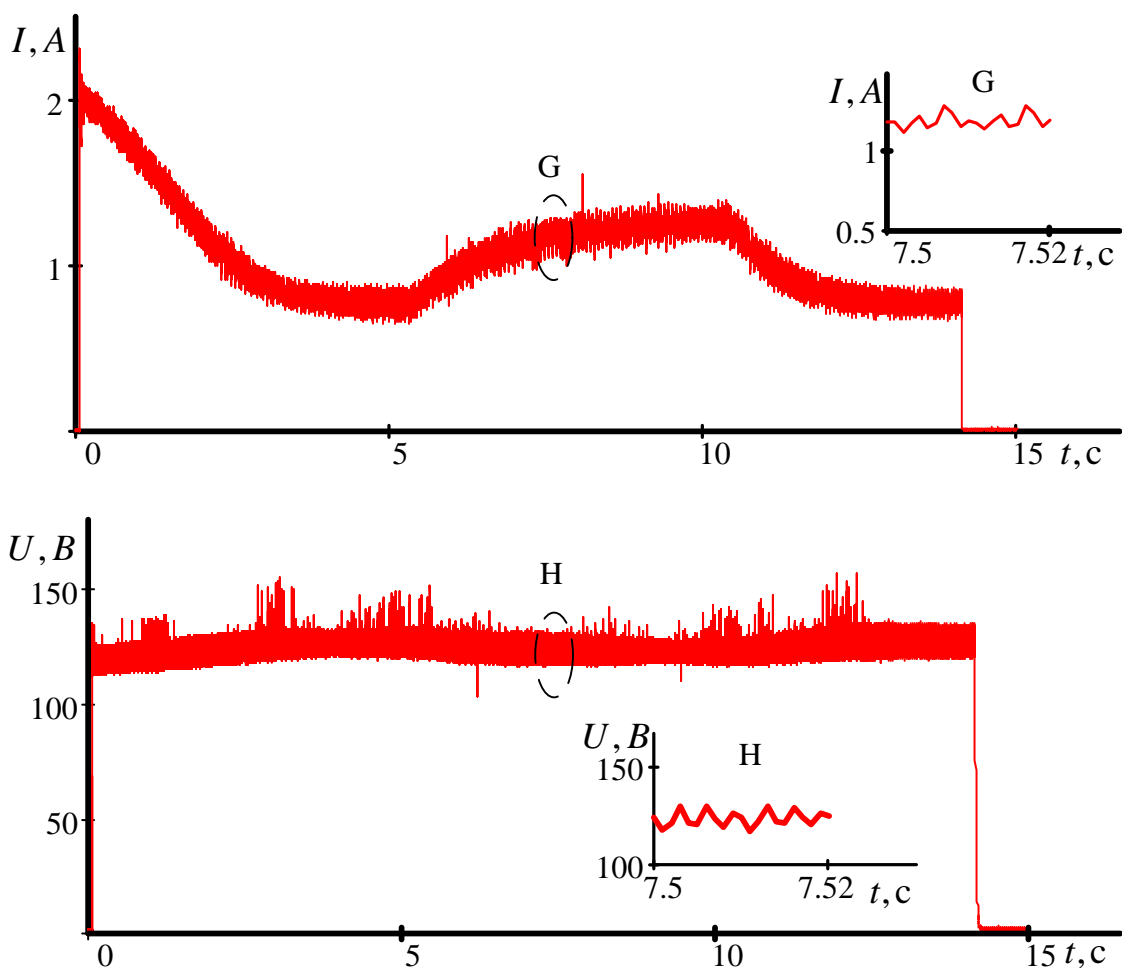


Рис. 4.16. Осциллограммы статорных токов и напряжений после предварительной обработки данных при угле управления "0°"

По экспериментальным данным, предложенным выше, была создана нейронная сеть размерностью 9-7-27-1, в которой 9 нейронов во входном слое, 7 и 27 нейронов в скрытых слоях и 1 - в выходном слое. Адекватность работы нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД можно оценить по графикам переходного процесса по скорости (рис. 4.17, 4.18) и интегральной погрешности оценивания (табл. 4.6), предложенной в параграфе 3.3.

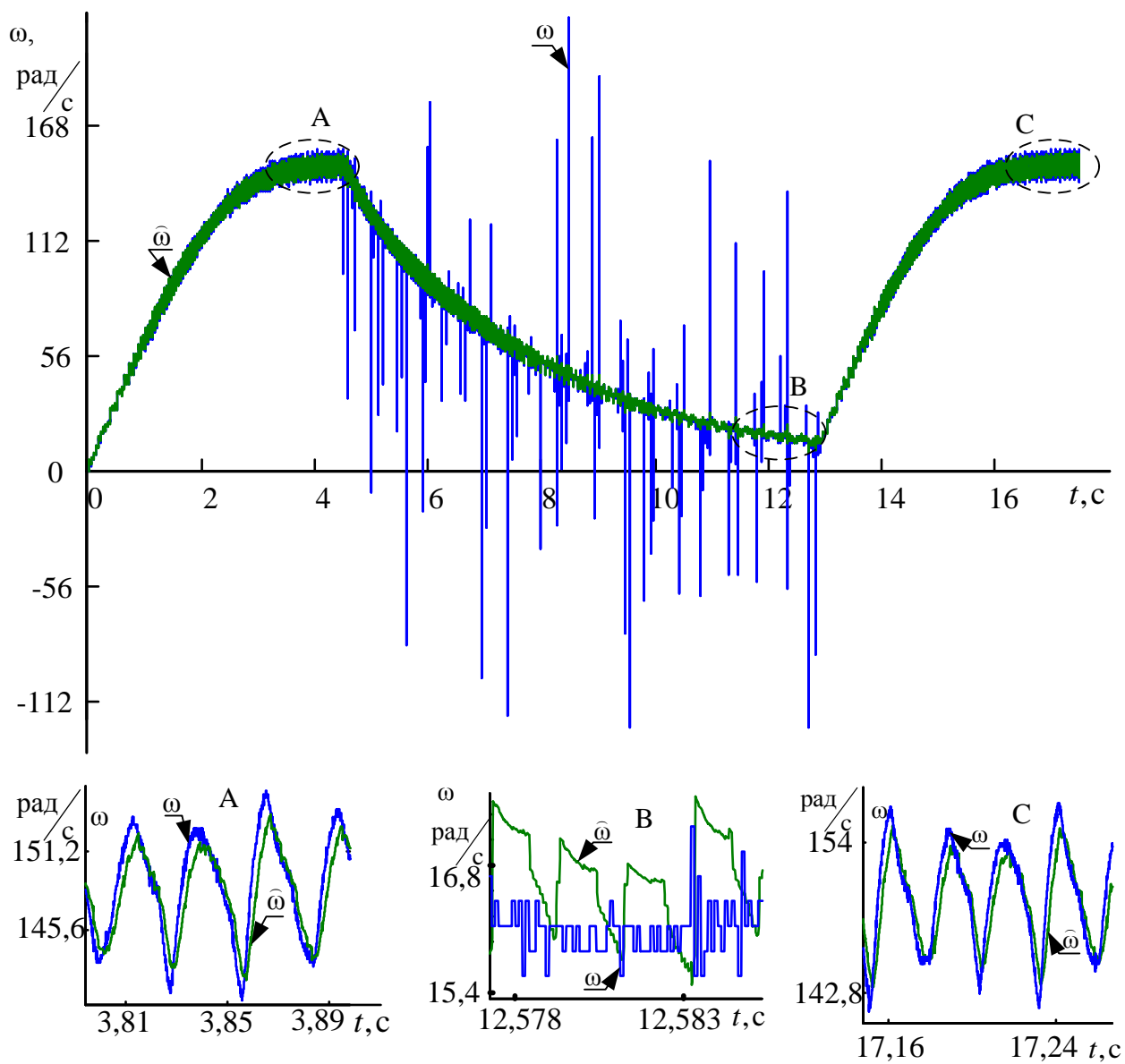


Рис. 4.17. Осциллограммы скорости при различных режимах работы и угле управления ТРН - АД  $65^\circ$

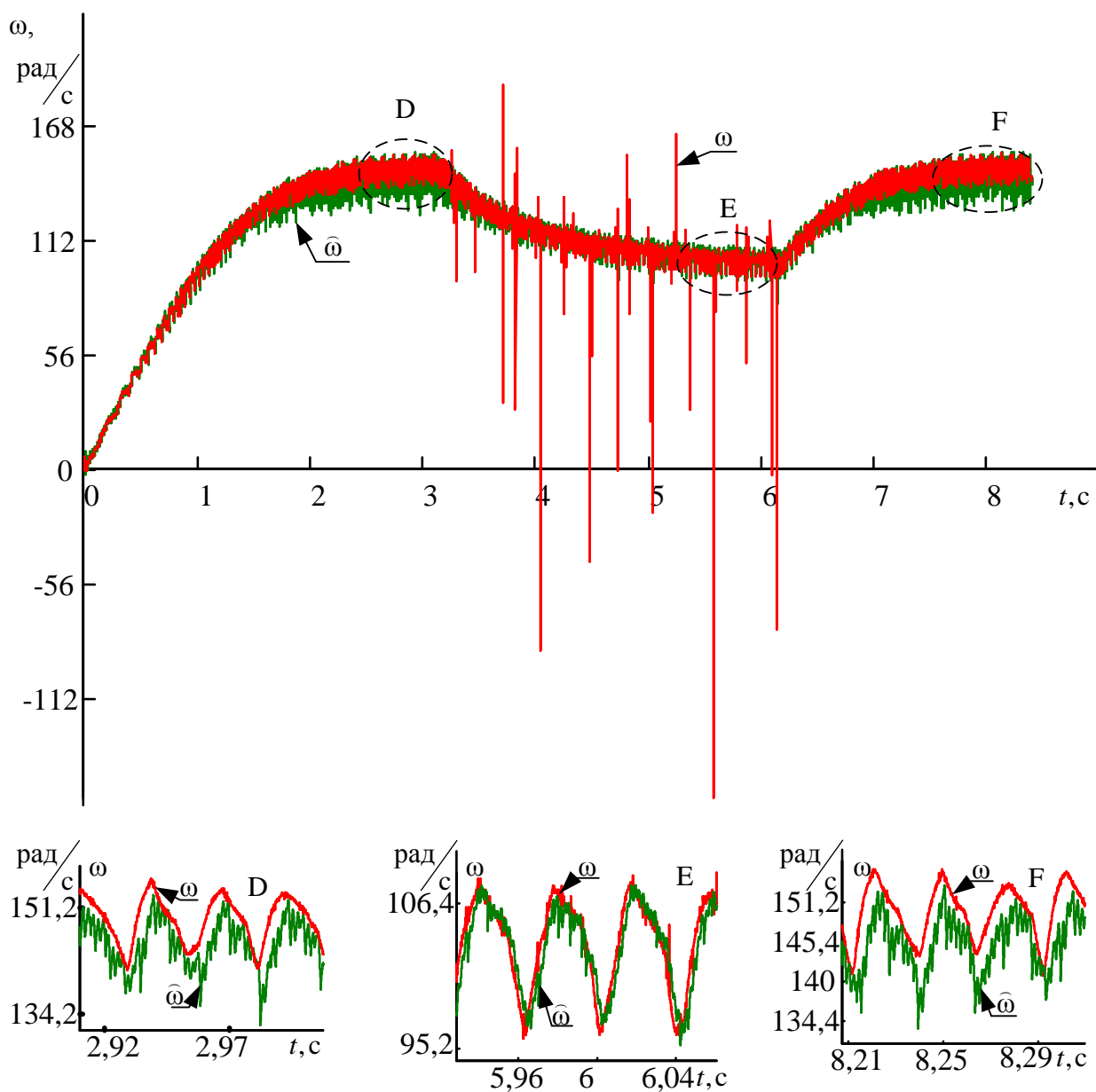


Рис. 4.18. Осциллограммы скорости при различных режимах работы и минимальном угле управления ТРН - АД

Таблица 4.6 Интегральная погрешность оценивания

Угол управления	Режимы работы электропривода		
	Пуск	Наброс нагрузки	Сброс нагрузки
Минимальный угол	2,8	4,3	2,63
65°	3,5	4,9	2,9



Из рисунков 4.17 и 4.18 видно, что нейросетевой наблюдатель угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД производит оценивание скорости по данным с датчиков тока и напряжения с погрешностью, лежащей в пределе до 5%, даже несмотря на наличие шумов. Наихудшими оценочными свойствами нейросетевой наблюдатель обладает при оценки скорости близкой к нулю, что можно заметить из рис. 4.17. Повышенной интегральной погрешностью оценивания обладает режим наброса нагрузки отчасти из-за высокой концентрации шумов в данном режиме управления. Нейронная сеть обладает высокими обобщающими свойствами, вследствие чего удалось выделить тренд изменения скорости, который не подвержен воздействию импульсных шумов имеющихся в сигнале датчика скорости. Таким образом, показано дополнительное полезное свойство разработанного нейросетевого наблюдателя угловой скорости - исключение импульсных помех в канале измерения угловой скорости.

#### **4. 4. Выводы по четвертой главе**

1. В результате проведения проверки работоспособности разработанного нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД на компьютеризированной экспериментальной установке доказано, что интегральная погрешность оценивания нейросетевого наблюдателя угловой скорости во всех режимах не превышает 5%, что является приемлемым в инженерной практике.

2. Как видно из анализа осциллограмм на рисунке 4.17, фрагмент В, нейросетевой наблюдатель показал наихудшие результаты оценивания вследствие совокупности следующих факторов: большой угол управления ТРН, наброс номинальной нагрузки, пониженная скорость примерно 10% от номинальной в переходном режиме, снижение точности измерения импульсного датчика скорости, значительное отклонение форм статорных

токов и напряжений от идеальных синусоид. Несмотря на влияние вышеприведенных факторов интегральная погрешность оценивания в режиме торможения АД составила 4,9%, что является приемлемым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача контроля скорости вращения вала асинхронного двигателя для бездатчиковых электроприводов на основе искусственной нейронной сети. Внедрение разработанного нейросетевого наблюдателя в устройства плавного пуска асинхронных электроприводов обеспечит широкие возможности по управлению пусковыми процессами в условиях изменения момента инерции и момента сопротивления на валу, что в перспективе расширяет область применения устройств плавного пуска для автоматизации широко распространенных производственных механизмов и вносит значительный вклад в развитие страны.

Результаты работы сводятся к следующему:

1. В результате проведенных исследований даны рекомендации по составлению тренировочного набора и структуры подготовки входных данных с целью минимизировать объем выборки на основе методики, заключающейся в сжатии тренировочного набора без потери обобщающих свойств ИНС;
2. Разработана и апробирована путем математического моделирования структура нейросетевого наблюдателя угловой скорости АД, работоспособного в практических пределах изменения статорного напряжения и нагрузки на валу двигателя.
3. Созданы имитационные модели замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД и его элементов, позволившие создать тренировочный набор для обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора при типовых режимах работы устройств плавного пуска.
4. При создании нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД была предложена структура блока предобработки данных с датчиков статорных токов и напряжений, а так же их задержек с преобразованием в полярную систему координат, что позволило обеспечить работоспособность нейросетевого

наблюдателя скорости в условиях несинусоидальности форм токов и напряжений статора и наличия режима бестоковых пауз.

5. В результате проведенных сравнительных исследований наиболее перспективных алгоритмов обучения нейросетевого наблюдателя угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД выявлено несомненное преимущество алгоритма Левенберга - Марквардта, но данный алгоритм требует больших вычислительных ресурсов компьютера по сравнению с другими рассмотренными методами. Это видно из того, что за 1964 сек. машинного времени данный алгоритм обработал только 500 итераций, в то время как другие алгоритмы на порядок выше.

6. Сравнительный анализ непрерывно-дифференцируемых функций и функций с разрывной производной при построении динамических нейронных сетей показал, что функции активации с непрерывной производной обладают лучшими обобщающими свойствами при построении нейросетевого наблюдателя. Наилучшие показатели качества обучения были достигнуты с использованием тангенциальной функцией активации в нейронах скрытого слоя.

7. В результате проведенных экспериментальных исследований с применением данных, полученных с компьютеризированного лабораторного стенда, доказана работоспособность разработанного нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД. Для нейросетевого наблюдателя была рассчитана интегральная ошибка оценивания угловой скорости ротора в переходных режимах, которая не превышает 5 %, что является приемлемым для применения в современных микропроцессорных устройствах плавного пуска асинхронных электроприводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bose B. K. Modern power electronics and ac drive. / Bimal Bose – 2001. – 710 с.
2. Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором // Известия томского политехнического университета. – Т. 321. – № 4. – 2012. – С. 107–111.
3. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода // Электротехнические комплексы и системы управления. – № 1. – 2012. – С. 2–7.
4. Браславский И.Я., Костылев А.В., Мезеушева Д.В., Степанюк Д.П. Методы синтеза систем управления асинхронными электроприводами с использованием нейронных сетей // Электротехника – № 9. – 2005. – С. 54–57.
5. Зюзев А.М., Нестеров К.Е. Методы косвенной оценки скорости двигателей в системах ТПН – АД // Электротехника – №9 – 2009. – С. 45–49.
6. Зюзев А.М., Нестеров К.Е. К построению бездатчикового электропривода системы ТПН – АД // Электротехника. – № 9. – 2005. – С. 38–41.
7. Браславский И.Я., Костылев А.В., Мезеушева Д.В. Цифровое прогнозирующее управление с использованием нейронных предсказателей // Электротехника. – № 11. – 2007. – С. 43–47.
8. Радин, В. И. Электрические машины; Асинхронные машины: учебник / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович; Под ред. И. П. Копылова. — Москва: Высшая школа, 1988. — 328 с.
9. Greenwood, S. Soft starter benefits in pump control (2015) World Pumps, 2015 (2), pp. 24 and 26-27.

10. Jaikrishna, V., Alex, L.T., Dash, S.S., Gachhayat, S.K. Fault tolerant soft starter control for induction motors (2015) Lecture Notes in Electrical Engineering, 326, pp. 953-962.
11. Chen, J., Zhou, B., Yuan, Y.-X., Zhu, H.-B. Design of the DSP controller for the magnetic-control soft-starter (2013) Applied Mechanics and Materials, 344, pp. 145-148.
12. Shue, L., Chao, F. Design and simulation of three-phase ac motor soft-start (2013) Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, ISDEA 2013, art. no. 6456458, pp. 554-557.
13. Yang, J., Shi, S., Ren, S., Cai, E., Zhou, J. A study of fuzzy control algorithm applying to induction motor soft-starter (2012) 2012 International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2012, art. no. 6223631, pp. 347-350.
14. Каталог «Электрооборудование для электродвигателей: управление и защита» URL: [emotron-piter.ru/uploads/katalogy/katalog\\_emotron\\_ada\\_engineering\\_%20812\\_9811013.pdf](http://emotron-piter.ru/uploads/katalogy/katalog_emotron_ada_engineering_%20812_9811013.pdf) (дата обращения: 10.07.2014).
15. Прайс-лист приводов ABB URL: [www.privod.szemo.ru](http://www.privod.szemo.ru) (дата обращения: 24.06.2014).
16. Прайс-лист приводов Siemens ООО «Спецтрейдингпорт» URL: [www.mechprivod.ru](http://www.mechprivod.ru) (дата обращения: 24.06.2014).
17. Прайс-лист приводов Emotron URL: [www.emotron.com](http://www.emotron.com) (дата обращения: 24.06.2014).
18. Прайс-лист приводов ООО «Звезда-Электроника» URL: [www.zvezda-el.ru](http://www.zvezda-el.ru) (дата обращения: 24.06.2014).
19. Загорский А., Захарова З., Пар И. Низковольтные асинхронные двигатели. Преимущества тиристорных пусковых устройств // Новости электротехники - №1(37) – 2006 г.

20. Климов В., Климова С. Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // Силовая электроника. – № 4. – 2008. – С. 58–61.
21. Винтрич А., Николаи У., Турски В., Райманн Т., Колпаков А. Диоды и тиристоры - это очень просто! Часть 4. Структура и принцип работы // Силовая электроника. – Т. 3. – № 42. – 2013. – С. 21–26.
22. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учебное пособие / Г. С. Зиновьев. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: изд-во НГТУ. – 2003. – 664 с.
23. Устройство плавного пуска SIRIUS 3RW30/3RW40 // справочник по аппарату 10/2010 URL: [www.siemens-ru.com/doc/52\\_files\\_1351171684\\_manual\\_sirius\\_softstarter\\_ru-ru.pdf](http://www.siemens.ru.com/doc/52_files_1351171684_manual_sirius_softstarter_ru-ru.pdf) (дата обращения: 10.07.2014).
24. Устройство плавного пуска PSR, PSS, PSE, PST и PSTB: технический каталог. URL: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac41faca923829e0c1257ce40047a4a8/\\$file/25137\\_abb\\_upp\\_2.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ac41faca923829e0c1257ce40047a4a8/$file/25137_abb_upp_2.pdf) (дата обращения: 10.07.2014).
25. Timoshkin V., Glazyrin A., Kozlova L. Reasoning of the use of TVR-IM electric drives of closed-loop type by the angular velocity observer for solving technological problems // Applied Mechanics and Materials Vol. 698 (2015) pp. 131-135.
26. Нестеров К.Е. Разработка и исследование системы «Тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» с вычислителем скорости ротора по ЭДС статора// дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург. – 2009. – 140 с.
27. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с фазным ротором. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 224 с.
28. Козлова Л.Е., Боловин Е.В. Исследование статики и динамики замкнутого бездатчикового асинхронного электропривода собственных нужд ТЭС по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости

[электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №. 3. – С. 1-6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/117-13581> (дата обращения: 10.07.2014).

29. Ключев В.И. Теория электропривода. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 704 с.

30. Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – № 6. – 2011. – С. 57–61.

31. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // Электротехнические комплексы и системы управления. – № 4. – 2012. – С. 66–69.

32. 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. – Т. 317. – № 4. – 2010. – С. 120–123.

33. Ланграф С.В., Глазырин А.С. Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – № 6. – 2009. – С. 61–64.

34. Козлова Л. Е. Разработка и исследование систем замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД с нейросетевым наблюдателем скорости [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2013 - №. 5.

35. Козлова Л.Е., Глазырин А.С. Применение методов искусственных нейронных сетей идентификации параметров и координат асинхронного Электродвигателя //Электромеханические преобразователи энергии:



Материалы IV Международной научно-технической конференции - Томск, 13-16 октября 2009. - Томск: ТПУ, 2009. - с. 298-300

36. 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

37. Козлова Л. Е., Глазырин А. С. Определение оценки скорости вращения ротора асинхронного электропривода с использованием искусственной нейронной сети [Электронный ресурс] // 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. 478-479 - 1 опт. электрон. диск (CD - ROM)

38. Ланграф С.В, Сапожников А.И., Глазырин А.С., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Динамика электропривода с нечетким регулятором //Известия Томского политехнического университета, 2010. -т. 316 -№ 4 -с. 168-173

39. Каширских В.Г., Гаргаев А.Н. Диагностика двигателей постоянного тока с помощью искусственной нейронной сети // Вестник Кузбасского государственного технологического университета. - 2014. - №2(102) С. 104-106.

40. Нестеровский А.В., Каширских В.Г. Использование демпфирования и искусственной нейронной сети для определения потокосцепления статора асинхронного двигателя // Вестник Кузбасского государственного технологического университета. - 2007. - №1 С. 41-43.

41. 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

42. 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

43. 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

44. Козлова Л.Е. Применение искусственных нейронных сетей в электроприводе синтез нейроэмулятора фильтра низких частот //Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 12-16 апреля 2010. - Томск: ТПУ, 2010. - с. 430-432

45. 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

46. Пат. №2438229 РФ. МПК H02P 21/13 (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 № 2010131978; Оpubл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 6 с.: ил.

47. 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; Оpubл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 2 с.: ил.

48. Пат. №102162 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 № 2010135995; Оpubл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 2 с.: ил.
49. Пат. №102161 РФ. МПК H02P 21/13 (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 № 2010135747; Оpubл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 2 с.: ил.
50. 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, Бюл. № 4. – 2 с.: ил.
51. Нестеровский А.В., Каширских В.Г. Динамическая идентификация параметров ротора асинхронного электродвигателя с помощью искусственной нейронной сети // Вестник Кузбасского государственного технологического университета. - 2004. - №4(41) С. 50-51.
52. Клепиков В.Б., Сергеев С.А., Махотило К.В., Обруч И.В. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в системах управления электроприводами // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 2-6.
53. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
54. Shepherd G.M., Koch C. Introduction to synaptic circuits // The Synaptic Organization of the Brain (G.M. Shepherd, ed.). – New York: Oxford University Press, 1990. – P. 3-31.
55. Churchland P.S. Neurophilosophy: Toward a Unified Science of the Mind/ Brain. – Cambridge, MA: MIT Press, 1986. – 127 p.
56. Махотило К. В. Разработка методик эволюционного синтеза нейросетевых компонентов систем управления / дис. ... канд. техн. наук. – Харьков. – 1998 г. – 179 с.

57. Bashkirov O. A., Bravermann E. M., Muchnik I. B. Potential function algorithms for pattern recognition learning machines // Automation and Remote Control. – 1964. – № 25. – P. 629–631.
58. Лукичев Д. В., Усольцев А. А. Синтез оптимальной структуры нейросетевых устройств // Научно–технический вестник. – 2005 г. – № 4(20). – С. 97–102.
59. Лукичев Д. В. Исследование и разработка нейросетевого наблюдателя потокосцепления ротора в системе векторного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем / дис. ... канд. техн. наук. – Санкт Петербург. – 2005 г. – 197 с.
60. Козлова Л.Е., Глазырин А.С. Нейросетевой датчик скорости асинхронного двигателя // Тинчуринские чтения: Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции. – Казань, 28–29 апреля 2010. – Казань: КГЭУ, 2010. – С. 70–71.
61. Jordan M.I. Serial Order: A Parallel Distributed Processing Approach. Institute for Cognitive Science Report 8604. University of California, San Diego. 1986.
62. Elman J. Finding Structure in Time // Cognitive Science. – 1990. – Vol.14. – P. 179–211.
63. Глазырин А.С., Ткачук Р.Ю., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С., Гречушников Д.В., Ланграф С.В. Способ определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя: пат. № 2476983 Рос. Федерация.; заявка № 2011135823/07; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6. – 21 с.
64. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем. – М.: Издательский центр «Академия». – 2009. – 352 с.
65. Савчук Т.А., Петришин С.И. Определение евклидового расстояния между чрезвычайными ситуациями на железнодорожном транспорте при кластерном анализе // Научные труды Винницкого национального технического университета. – № 3. – 2010. – С. 1–9.

66. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 448 с.
67. Архипцев Ю. Ф. Асинхронные электродвигатели : Вып. 591. — Москва: Энергоатомиздат, 1986. — 104 с.
68. Брускин Д.Э., Зорохович Д.Е., Хвостов. В. С Электрические машины: учебное пособие: в 2-х ч. — 2-е изд. перераб., и доп.. — Москва: Высшая школа. — 1987. — 335 с.
69. Взрывозащищенный электродвигатель АИМ100L4. URL: <http://v-z.com.ua/product/vzryvozashishennyj-elektrodvigatel-aim100l4-aim-100l4/> (дата обращения: 10.07.2014).
70. Однокопылов И.Г. Асинхронный электропривод механизма подъема крана мостового типа с повышенной безопасностью и живучестью. Дисс. ... канд. техн. наук. ТСК., 2008. – 162 с.
71. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. — 3-е изд., перераб. и доп.. — Москва: Высшая школа, 2001. — 327 с.
72. Глазырина Т. А. Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов// дис. ... канд. техн. наук. – Томск. – 2012. – 122 с.
73. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем MATLAB. – Санкт-Петербург. Издательство "Питер", – 2005. – 511 с.
74. Тирристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода/ Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986.–200 с.
75. Л.П. Петров Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981.–184 с.
76. Документация на программный продукт, реализованный в программе MATLAB URL: [www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/thyristor.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/thyristor.html) (дата обращения: 13.03.2015).

77. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А.. Электропривод переменного тока: учебное пособие/Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 218 с.
78. Системы автоматизированного управления электроприводами : учебное пособие / под ред. Ю. Н. Петренко. — 2-е изд., испр. и доп. — Минск: Новое знание, 2007. — 394 с.: ил. — Библиогр.: с. 388-389.
79. Kiran, U.R., Harish, B., Nema, R.K., Jain, S. Artificial neural network based controller for two leg three phase induction motor// Proceeding of the IEEE International Conference on Green Computing, Communication and Electrical Engineering, ICGCCEE. – 2014. – pp. 1-5.
80. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6/ Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
81. Пантелеев А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие/ А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 544 с.
82. Møller, M.F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning // Neural Networks, 1993 – 6 (4). – pp. 525-533.
83. Ben Nasr, M., Chtourou, M. Neural network control of nonlinear dynamic systems using hybrid algorithm// Applied Soft Computing Journal, 24. – 2014.– pp. 423-431.
84. Baruch, I.S., De La Cruz, I.P., Nenkova, B. Direct field oriented neural control of a three phase induction motor// Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics).–2010.–pp. 241-250
85. Yao, X. Evolving artificial neural networks// Proceedings of the IEEE.–1999.–87 (9).pp. 1423-1447.
86. Козлова Л. Е. Принцип построения архитектуры нейроэмулятора угловой скорости электропривода по схеме ТРН – АД // Научный вестник НГТУ. - 2015 №1(58). - С. 41-50

87. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети // М.: ФИЗМАТЛИТ. - 2001 - 201с.
88. Абрамов Б. И, Дацковский Л. Х., Кузьмин И. К., Придатков А. Г., Лиморенко П. М. Устройства плавного пуска в электроприводах горных механизмов // Электротехника. 2014. - №1. - С. 19-27.
89. Ермолин, Николай Пантелеймонович. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. — Ленинград: Энергия, 1976. — 248 с.: ил. — Библиогр.: с. 241-246.
90. Dybkowski, M., Klimkowski, K., Orłowska-Kowalska, T. Speed sensor fault tolerant direct torque control of induction motor drive// 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014.–2014.– pp. 679-684.
91. 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.
92. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов // М.: Энергия. - 1972. - 240 с
93. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №21100. ИУО РАО ОФЭРНиО. Программный модуль "Разработка модели нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД" / Хамитов Р.Н., Козлова Л.Е., Боловин Е.В., Полищук В.И., Глазырин А.С. Дата регистрации: 27 июля 2015 года. – 3 с.: ил.
94. Руководство пользователя плат 6023E/6024E/6025E // National Instruments Corporation. – 1999. – с. 81-83.
95. Бутырин П.А., Васьковская Т.А., Каратаева В.В., Материкин С.В. Автоматизация физических исследований и эксперимента компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW // Под. ред. Бутырина П.А. - М.: ДМК Пресс, 2005. 264 с.

96. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №21101. ИУО РАО ОФЭРНиО. Программный модуль "Моделирование нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД" / Хамитов Р.Н., Козлова Л.Е., Боловин Е.В., Полищук В.И., Глазырин А.С. Дата регистрации: 27 июля 2015 года. – 3 с.: ил.



## Приложение А

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

ООО «Мехатроника-Софт»

С.В. Ляпушкин

2015 г.



### АКТ

№ 4 от «16» февраля 2015 г.

о внедрении результатов диссертационной работы «Разработка нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН - АД» на соискание ученой степени кандидата технических наук сотрудника Национального исследовательского Томского политехнического университета

Козловой Людмилы Евгеньевны

Комиссия в составе представителей ООО «Мехатроника-Софт» директора Ляпушкина С.В. и технического директора Каракулова А.С. составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Козловой Л.Е. «Разработка нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН - АД», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук используются при настройке софтверных систем.

Были внедрены следующие положения диссертации:

1. Прикладной программный продукт, разработанный в среде графического программирования LABVIEW, для измерения и снятия сигналов с датчиков тока, напряжения и скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД.
2. Прикладной программный продукт, разработанный в интерактивной среде для программирования Matlab Simulink, для визуализации и проверки работоспособности математической модели асинхронного электропривода по схеме ТРН - АД.

Технический директор  
ООО «Мехатроника-Софт»,  
канд. техн. наук

А.С. Каракулов

## Приложение Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2438229

**УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования "Национальный исследовательский  
Тамский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010131978  
Приоритет изобретения **29 июля 2010 г.**  
Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации **27 декабря 2011 г.**  
Срок действия патента истекает **29 июля 2030 г.**



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.Н. Симонов

## Приложение В



## Приложение Г



## Приложение Д



## Приложение Е



## Приложение Ж





### Приложение 3

