

УДК 62-83-52: 621.3

КП

№ госрегистрации 0105U009179

Инв. №

Министерство образования и науки Украины  
Сумский государственный университет  
(СумГУ)  
40007, г.Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2; тел. (0542) 33 34 58;  
факс 60 44 78

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
канд. техн. наук, проф.

В.А.Хворост

2006.06.30

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
Объектно-ориентированные системы управления процессами  
движения технологических машин  
РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН  
(промежуточный)

Начальник НИС

канд. техн. наук, доцент

В.А.Осипов

Руководитель НИР

зав. кафедрой Компьютеризованных  
систем управления

канд. техн. наук, доцент

В.Д.Червяков

2006

Этот отчет подготовлен как часть работы, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

## СПИСОК АВТОРОВ

Руководитель НИР  
зав. кафедрой Компьютеризованных  
систем управления  
канд. техн. наук, доцент

В.Д.Червяков  
(реферат, введение,  
выводы, рекомендации,  
разд. 1)

Ответственный исполнитель  
ст. преподаватель

А.А.Паныч  
(разд. 1, разд. 2,  
приложение А)

Аспирант

Я.Х.Каваре  
(разд. 3)

## РЕФЕРАТ

Отчет о НИР (промежуточный): 142 с., 55 рис., 5 табл., 1 приложение, 112 источников.

Объект исследования – методология концептуального проектирования и методы синтеза систем управления процессами движения рабочих органов технологических машин широкого применения

Цель работы – повышение экономической эффективности систем управления несущими органами летучих пил возвратно-поступательного движения на этапах их разработки и эксплуатации, исследование процессов в системе "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель".

Метод исследования – системный анализ, технологии объектно-ориентированного проектирования, математическое моделирование.

Применение объектно-ориентированного подхода позволяет обеспечить минимизацию ресурсозатрат на этапе проектирования систем управления технологических объектов широкого применения, образующих классы с большим количеством экземпляров. Одним из видов таких объектов являются несущие органы летучих пил, относящихся к классу летучих механизмов. В ходе решения поставленных задач получил дальнейшее развитие метод построения объектных моделей классов технологических машин, ориентированных на использование в задачах концептуального проектирования систем управления. Отличительной особенностью метода является введение в объектные модели дополнительных связей между классами, отражающих информационные и энергосиловые взаимодействия. Предложены объектные модели класса летучих механизмов и классов, относящихся к предметной области летучих пил.

Полученные результаты в их совокупности позволяют снизить ресурсоемкость систем управления несущих органов летучих пил на этапе их проектирования. Объектные модели класса летучих механизмов и классов, относящихся к предметной области летучих пил могут быть положены в основу проектно-конструкторских разработок систем управления летучих пил в качестве концептуальной базы. Кроме того, они могут служить руководящими материалами для интеграции и упорядочения накопленного опыта и наработок в пределах класса летучих механизмов.

Получено математическое описание процессов в системе "квазичастотный преобразователь – асинхронный двигатель", отличающееся комплексным учетом влияния электромагнитных и электромеханических параметров асинхронного двигателя, построена компьютерная модель, позволяющая в рамках одной структурной схемы реализовать различные способы управления работой асинхронного двигателя.

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЛЕТУЧИЙ МЕХАНИЗМ, ОПТИМИЗАЦИЯ, ВЕНТИЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ.**

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН .....	13
1.1 Современные тенденции в методологии создания объектов новой техники .....	13
1.2 Летучие механизмы как класс рабочих машин в аспекте задач управления .....	20
1.3 Современное состояние систем управления летучими пилами .....	26
1.4 Выводы. Постановка задач исследования.....	30
2 ОБЪЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАССОВ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ЛЕТУЧИХ ПИЛ С ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НЕСУЩИХ ОРГАНОВ.....	33
2.1 Объектная модель класса "Летучий механизм" .....	33
2.2 Функционально-технологическая характеристика экземпляра класса "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа .....	37
2.3 Класс "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа как подкласс абстрактного суперкласса "Летучий механизм" .....	46
2.4 Выводы .....	55
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ "ВЕНТИЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ" В РЕЖИМЕ КВАЗИЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ .....	58
3.1 Предпосылки построения и структура модели асинхронного двигателя, питаемого от регулятора напряжения .....	58
3.2 Предпосылки построения и структура модели тиристорного регулятора напряжения.....	76

3.3 Обоснование структуры модели блока управления тиристорным регулятором напряжения “control system” .....	79
3.4 Анализ результатов исследования параметров асинхронного двигателя в режиме квазичастотного электропитания.....	83
3.5 Обоснование структуры скорректированной модели "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель" .....	89
3.6 Моделирование процессов в системе «вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» в режиме квазичастотного электропитания.....	97
3.7 Выводы .....	117
ВЫВОДЫ .....	119
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	123
Приложение А Структурно-функциональный анализ суперкласса "Летучий механизм" .....	134

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ,  
ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

АЭП	– автоматизированный электропривод
ИМ	– исполнительный механизм
ИУ	– информационные устройства
ЛМ	– летучий механизм
ЛН	– летучие ножницы
ЛП	– летучая пила
МВ	– механизм вращения
МП	– механизм подачи
МС	– механизм сцепления
НО	– несущий орган
ОИ	– обрабатываемое изделие
ООП	– объектно-ориентированный подход
ПУ	– пульт управления
СУ	– система управления
СУМП	– система управления мерным порезом
СУПЛ	– система управления профилирующей линией
ТЛ	– технологическая линия
ТРН	– тиристорный регулятор напряжения

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики конкурентная борьба за потребителей требует от производителей постоянного повышения качества продукции, максимального удовлетворения требований заказчиков. Это приводит к необходимости всемерного сокращения сроков и стоимости создания или модернизации технологических систем, качественного совершенствования разрабатываемых проектов. Объективная реальность, характеризуемая этими обстоятельствами, обуславливает актуальность научно-технической проблемы ресурсосбережения на всех этапах жизненного цикла технологических объектов [1, 2]. Системы управления технологических объектов в значительной мере определяют ресурсоемкость последних и качество выпускаемой продукции, поэтому непреходяще актуальными являются задачи совершенствования методологии разработки систем управления и методов синтеза последних, обеспечивающих минимизацию ресурсозатрат на таких этапах их жизненного цикла, как проектирование и эксплуатация (согласно стандарту ISO 9004). На первом из указанных этапов задача ресурсосбережения решается путем сокращения временных и финансовых затрат на разработку (проектирование) изделия, в нашем случае – систем управления технологическими объектами. На этапе эксплуатации ресурсосбережение рассматривается в аспектах минимизации энергозатрат в процессе функционирования автоматизированного технологического объекта, минимизации потерь от выпуска некондиционной продукции и возникновения аварийных ситуаций. Особую актуальность проблема ресурсосбережения имеет по отношению к технологическим объектам широкого применения, образующим классы с большим количеством экземпляров (не умаляя значимости проблемы для уникальных объектов). Учитывая актуальность решения задачи ресурсосбережения в указанных аспектах и концептуально обозначенные пути ее решения средствами управления, в настоящей работе выбран **объект исследования** "Методология концептуального проектирования и методы синтеза систем управления процессами движения рабочих органов технологических машин широкого применения".

Одним из видов технологических объектов широкого применения являются несущие органы летучих пил, относящихся к классу летучих механизмов [3]. Летучие пилы применяются в металлургической промышленности при порезе фасонных профилей и труб [4-7], в деревообрабатывающей промышленности при порезе древесностружечных плит [8, 9] и древесного полотна [10]. Среди других представителей данного класса можно назвать летучие ножницы [11], применяемые в прокатном производстве, и промышленные роботы [12-14], обрабатывающие изделия, движущиеся на конвейере. Приводы несущих органов летучих пил, как и других летучих механизмов, относятся к категории электромеханических систем автоматизации. С точки зрения механики приводов технологических машин несущий орган любого летучего механизма представляет собой неделимую массу, процессы движения которой реализуются путем целенаправленного формирования законов движения привода. Отсюда следует, что система управления привода выполняет функции управления движением несущего органа.

Существуют летучие пилы с несущими органами, которые вращаются или движутся поступательно. В настоящей работе мы ограничиваемся подклассом летучих пил с возвратно-поступательным движением несущего органа. Летучие механизмы имеют циклический режим работы, причем их рабочий цикл характеризуется большой ресурсоемкостью. Наибольшей ее составляющей является энергопотребление приводов несущих органов, с помощью которых формируются законы движения последних.

Снижение энергоемкости приводов технологических машин циклического действия является актуальной задачей. Это обстоятельство еще более усугубляется тем фактом, что Украина относится к энергодефицитным странам, в связи с чем экономия электроэнергии признана важнейшим направлением энергетической политики в Украине [15], разработаны комплексная государственная [16] и региональные [17] программы энергосбережения. Второй составляющей ресурсоемкости являются потери от выпуска некондиционной продукции и возникновения аварийных ситуаций (например, при поломках конструктивных элементов технологической машины). Перечисленные составляющие



ресурсоемкости летучих механизмов имеют место на одном из этапов их жизненного цикла, а именно – во время эксплуатации. В свете сказанного закономерно актуальной является научно-техническая проблема снижения ресурсоемкости приводов несущих органов летучих механизмов на данном этапе. Указанная проблема решается путем совершенствования процессов управления рабочими органами летучих механизмов и улучшения за счет этого экономических показателей их функционирования. На этапе проектирования технологических машин, в частности летучих механизмов, проблема снижения ресурсоемкости, которая обуславливается всесторонним стремлением уменьшить затраты финансовых и временных ресурсов, также является актуальной. Данная проблема решается путем развития существующих и применения новых методологий проектирования сложных систем [18-21]. Решением указанных проблем в итоге достигаются научно-технические результаты, которые повышают экономический потенциал государства.

подавляющее большинство различных технологических машин (насосные и компрессорные установки, центрифуги, конвейерный транспорт и др.) используют в своих приводах асинхронные двигатели [22-24]. Для управления асинхронными двигателями применяются различные преобразовательные устройства. Для машин с несложными законами движения рабочих органов обеспечить оптимальное отношение стоимости системы к эксплуатационным характеристикам позволяет применение системы "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель". Специфические свойства таких систем (наличие колебательных составляющих момента и частоты вращения ротора двигателя) требуют проведения дополнительных исследований для расширения области их эффективного применения.

**Целями** работы является повышение экономической эффективности систем управления несущими органами летучих пил возвратно-поступательного движения на этапах их разработки и эксплуатации, исследование процессов в системе "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель". Поставленная цель достигается за счет применения объектно-ориентированного подхода к задаче

синтеза систем управления приводами несущих органов на этапе концептуального проектирования, а на этапе эксплуатации – за счет применения методов ресурсосберегающего управления их движением и режимами работы. Для исследования процессов в системе "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель" поставленная цель достигается за счет применения методов математического моделирования.

**Актуальность** работы обусловлена остротой проблемы ресурсосбережения в промышленности Украины [25-31] и современным состоянием существующих систем управления летучих механизмов. Принимая во внимание то обстоятельство, что большинство этих систем разрабатывалось в 60-70-х годах предыдущего столетия, в них реализованы методы структурно-функционального построения и управления, ориентированные на потребности и возможности систем управления того времени и, в частности, они не реализуют в полной мере возможности ресурсосбережения. Поэтому следует ожидать модернизации существующих и создания новых систем, в связи с чем объективно существует необходимость развития методов ресурсосберегающего управления. Кроме того, принимая во внимание развитие и распространение (преимущественно в рамках информационных технологий) новых методов ресурсосберегающего синтеза систем [18, 32-38], а также намечающиеся пути применения указанных методов в процессах разработки промышленных систем [1, 39-46], назрела необходимость в разработке соответствующей методологии. При этом необходимо обратить особое внимание на объективное существование целых классов машин (в частности, летучих механизмов), что даст возможность еще больше повысить эффективность разработок для групп механизмов широкого применения, создаст условия для накопления, интеграции и упорядочения опыта разработчиков летучих механизмов, применяемых в разных отраслях, с перспективами широкого внедрения в промышленности [1, 42-44]. Эти обстоятельства рассматриваются в качестве исходных для постановки задач исследования. Необходимость проведения научного исследования обосновывается значимостью научно-технической проблемы и существующим состоянием систем автоматизации технологических машин и

процессов. Актуальность исследования процессов в системе "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель" обусловлена их недостаточной изученностью.

Научно-исследовательская работа выполнялась на кафедре Компьютеризованных систем управления Сумского государственного университета по плану научно-исследовательских работ университета, в рамках "Комплексной государственной программы энергосбережения Украины", утвержденной Постановлением Кабинета Министров Украины №148 от 5.02.1997г., "Программы энергосбережения и рационального использования топливно-энергетических ресурсов в Сумской области на ближайшие годы и перспективу до 2010 года", утвержденной научно-координационным советом по энергосбережению Сумской областной госадминистрации, протокол №11 от 28.10.1998 года, и государственной научно-технической программы "Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии генерирования, преобразования и использования энергии", п.5.1.2 "Создание методических, программных и технических средств оптимальной организации управления режимами электрических систем, сетей и объектов", в соответствии с научным направлением кафедры "Методология синтеза объектно-ориентированных систем управления".

Общей задачей работы, в соответствии с ее целью, является разработка метода синтеза объектно-ориентированной системы управления несущим органом летучей пилы, методов и алгоритмов ресурсосберегающего управления процессами его движения и режимами работы. Согласно общей задаче, идея работы разбивается на две составляющие. Первая состоит в том, чтобы на основе разработанных объектных моделей, отражающих предметную область классов летучих механизмов и летучих пил, сетевой модели рабочего цикла летучей пилы, объектно-ориентированных структурной и функциональной схем системы управления летучей пилы предложить пути совершенствования методов концептуального синтеза системы управления несущим органом, реализация которых позволила бы снизить ресурсоемкость процесса их проектирования. Вторая составляющая заключается в том, чтобы на основе результатов анализа рабочего цикла летучей

пилы и предложенных методов ресурсосберегающего управления ее несущим органом предложить пути совершенствования алгоритма управления приводом несущего органа, реализация которых позволила бы снизить ресурсоемкость процесса обработки изделия (мерного пореза длинномерного материала).

Проблемная ситуация, порождаемая предметом исследования и общей задачей работы, приводит к необходимости постановки и решения следующих задач исследования:

системного анализа и объектного моделирования суперкласса "Летучий механизм" и подчиненных ему по иерархии классов "Летучая пила с возвратно-поступательным движением несущего органа", "Привод несущего органа", "Система управления летучей пилой", "Система управления приводом несущего органа летучей пилы";

концептуальной разработки объектно-ориентированной системы управления приводом несущего органа летучей пилы;

разработки алгоритма ресурсосберегающего управления приводом несущего органа летучей пилы, отвечающего принципам объектно-ориентированной технологии создания объектов новой техники.

На данном этапе работы решаются задачи системного анализа и объектного моделирования классов предметной области летучих механизмов и летучих пил.

Для решения поставленных задач в научной работе использовались методы системного анализа и технологии объектно-ориентированного проектирования, методы математического моделирования.

# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

В данном разделе на основе анализа источников информации обсуждаются пути повышения экономической эффективности технологических объектов на этапах их разработки и эксплуатации.

## 1.1 Современные тенденции в методологии создания объектов новой техники

Исторически можно выделить два этапа научно-технического прогресса, определяемые по месту человека в производственном процессе и уровню автоматизации труда [47]. Первый связан с механизацией – передачей энергетических функций машинам. Второй связан с автоматизацией – передачей машинам информационных и управляющих функций. Появление ЭВМ положило начало автоматизации функций, относящихся к сфере умственной деятельности человека. В настоящее время вычислительная техника является неотъемлемым элементом технологических машин (объектов) на всех стадиях их жизненного цикла (стандарт ISO 9004). В научных исследованиях, проектировании, подготовке производства она используется в виде различных САПР, CASE-средств, моделирующих программ; при производстве и испытаниях она используется в виде различных систем управления (СУ) оборудованием, предприятиями, информационно-измерительными системами; при эксплуатации изготовленного объекта она входит в его состав в виде компьютерных СУ. Не вдаваясь в анализ причин, приведших к появлению и применению ЭВМ только на втором этапе, можно сказать, что применение компьютерных СУ в объектах современной техники значительно улучшает их характеристики и придает им новые свойства: повышается эффективность вновь разрабатываемых объектов; повышается удобство при работе с объектами новой техники, они приближаются к человеку (комфорт, эргономика); упрощается технология ремонтов (вплоть до сведения их к простой замене

отказавших блоков); появляется гибкость и возрастает разнообразие выполняемых функций.

1.1.1 Тенденции развития технических систем. Следует отметить такие важные тенденции развития техники [48, 49], как ускорение внедрения результатов научно-исследовательских разработок в производство, сближение науки с производством; ускорение смены моделей и поколений новой техники; увеличение количества модификаций; повышение надежности (путем принятия соответствующих мер на всех стадиях жизненного цикла объекта). В дополнение к перечисленным тенденциям, в последнее десятилетие приобрело если не важнейшее, то существенное значение ресурсосбережение на всех этапах жизненного цикла технологических объектов. Важным стимулом развития техники в указанных направлениях является конкуренция как между отдельными производителями, так и между странами. Ускорение смены моделей и поколений, увеличение количества модификаций, меры по повышению надежности и экономии ресурсов имеют одним из своих следствий усложнение процессов проектирования и производства.

На этапе проектирования технологического объекта закладываются концептуальные решения по его конструкции и принципам функционирования [20]. Именно на данном этапе сосредоточены основные усилия разработчиков по решению проблем, возникающих в связи со сложностью самой системы и сложностью процесса ее создания. Исследованию сложных систем посвящено много работ [18-20, 36]. Анализ показывает, что сложные системы имеют пять признаков [18]:

сложность принимает форму иерархии. Сложная система обычно состоит из взаимозависимых подсистем, которые в свою очередь также могут быть разделены на подсистемы;

выбор низшего уровня абстракции достаточно произволен и в значительной степени определяется наблюдателем;

внутриэлементные связи обычно сильнее межэлементных, поэтому высокочастотные взаимодействия внутри структуры оказываются естественным образом отделены от низкочастотных взаимодействий между структурами. Это обуславливает разделение системы на абстрактные автономные части, которые можно изучать по отдельности;

иерархические системы обычно состоят из нескольких подсистем разного типа, реализованных в различном порядке и в разнообразных комбинациях. Иногда можно обнаружить подсистемы, общие для различных сфер функционирования всей системы;

работающая сложная система неизбежно оказывается результатом развития работающей простой системы. В процессе развития системы объекты, которые сначала считаются сложными, начинают рассматриваться как элементы низших уровней абстракции, из которых затем строятся более сложные системы.

Учет приведенных признаков привел к появлению и развитию в различных отраслях техники схожих по своей природе подходов к решению проблем, возникавших в связи с возросшей сложностью, как ответ на потребность в дальнейшем развитии. Прежде всего, это типизация, унификация, нормализация и стандартизация [20], призванные разумно ограничить многообразие различных технических объектов, причем, закон ограниченного многообразия имеет тем большее значение, чем шире используется данное изделие [20]. В качестве примеров можно указать выпуск стандартных комплектующих изделий – метизов, подшипников, резисторов и т.п. Несколько другие аспекты отражает модульный подход, когда на базе совместимых модулей можно скомпоновать оптимальную для конкретной области использования конфигурацию технической системы. Такой подход получил развитие в робототехнике [12, 47], производстве программируемых контроллеров [50], персональных компьютеров [51]. Понятие модульности известно также и в программировании. Здесь оно связано с развитием структурного подхода к разработке и созданию программных средств [33], причем данное развитие пошло дальше указанного понятия – появился объектно-ориентированный подход.

1.1.2 Информационные технологии. Известные под этим названием [23, 52-54] технологии осуществления информационных процессов, программирования и управления относятся к одной из интенсивно развивающихся областей научных исследований и практических разработок. Подходы, применяемые в информационных технологиях, часто являются результатом пересмотра, модификации и развития подходов, известных ранее в других областях деятельности. Однако на новом витке спирали научно-технического прогресса эти подходы приобретают новые качества, повышающие их эффективность. В случае с информационной сферой причиной может быть присущая ей значительная гибкость, связанная с непосредственной близостью, даже с неотъемлемостью от интеллектуальной сферы исследователей и разработчиков. В данную сферу активно и оперативно вовлечен научный потенциал государства. Оперативности внедрения новых разработок способствуют быстрые сроки освоения проектов и распространения информации (в частности, в сети Internet).

Одним из основных факторов, определяющих развитие технологии создания сложных систем, является борьба со сложностью с целью снижения стоимости проектирования и создания программных продуктов [33]. Сложность является неотъемлемым свойством программирования и программ, которое проявляется во времени и стоимости создания системы управления, объеме алгоритма или длине текста программы, характеристиках логической структуры последних.

В программировании широко используется фундаментальный принцип управления сложными системами, в соответствии с которым при проектировании сложной системы производится алгоритмическая декомпозиция процессов управления технологическими объектами. Такой подход получил теоретическое оформление в конце 60-х – начале 70-х годов XX века. Он основан на идее разделения программы на относительно самостоятельные крупные части, реализующие определенные процедуры и функции и образующие определенную иерархию взаимосвязей.

Объектно-ориентированное программирование является третьим крупным этапом, после структурного и модульного программирования, в процессе развития



структурного подхода. Причинами появления объектно-ориентированного программирования стала возросшая в середине 70-х годов сложность программных систем. Использование структурного подхода в рамках господствовавшего процедурно-ориентированного стиля программирования не давало желаемого результата. Объектно-ориентированный подход (ООП) и, в частности, объектно-ориентированный стиль программирования, в отличие от процедурно-ориентированного, обеспечивает алгоритмическую декомпозицию, ориентированную на "естественные" элементы пространства решаемой задачи, что упрощает сопоставление программистских конструкций с моделируемыми объектами. В настоящее время ООП стал господствующим в сфере информационных технологий [32-34].

1.1.3 Объектно-ориентированный подход и ресурсосбережение. В связи с обширностью проблем и природной сложностью объектов исследования, к которым применяется ООП, к середине 90-х годов развилось достаточно большое количество основанных на ООП так называемых объектно-ориентированных методологий [32, 34, 36]. К наиболее известным из них относятся Booch, OMT (Object Modeling Technique), OOSE (Object-Oriented Software Engineering). В 1994 – 1995 годах авторы указанных методологий (Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson) объединили свои усилия и создали UML – унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language), который в настоящее время является одним из наиболее популярных инструментов разработки объектно-ориентированных систем. Возник консорциум UML, в который вошли компании DEC, Hewlett-Packard, Intellicorp, Microsoft, Oracle, Texas Instruments, Rational, и другие. Объектно-ориентированные методологии поддерживаются соответствующими CASE-средствами. Для использования UML разработаны, такие CASE-средства, как Rational Rose, Select Enterprise, Visual UML и др., имеется поддержка UML в Microsoft Visio [55-57].

Использование любой объектно-ориентированной методологии подразумевает наличие базовых строительных блоков в виде классов и их экземпляров – объектов. Несмотря на множество методологий и, в соответствии с этим, взглядов на ООП [18,

33-35], можно выделить следующие концептуальные принципы последнего: абстрагирование, ограничение доступа, модульность, иерархия.

По мнению Г. Буча [34], объектно-ориентированная парадигма воплощает в себе логичный, стабильный и окончательный организующий принцип разработки программного обеспечения. Концепции, на которых основан ООП, позволяют эффективно работать со сложными системами и повышать их надежность, обеспечивают относительную простоту внесения изменений в систему на всех стадиях ее жизненного цикла, позволяют повторно использовать отдельные компоненты разработки в разных проектах. Разработка системы на базе ООП имеет итеративный характер, что позволяет создавать системы управления при неполной информации о технологическом объекте на начальных этапах разработки. Кроме того, ООП близок к доминирующим у людей представлениям о мире, имеющим предметный характер, что повышает эффективность интеллектуального труда.

В настоящее время известно множество примеров успешного применения ООП при разработке различных технических систем [18, 37-46]. Следует признать актуальным применение ООП к процессу создания СУ рабочих машин, группируемых в классы (см. п.1.1.2). При этом базовые принципы ООП должны привести к иерархической структуризации ключевых абстракций (классов, объектов, отношений) в рассматриваемом классе технологических машин. Особое внимание следует уделить использованию принципов (отношений) наследования, позволяющих вынести самые существенные признаки класса на самый верхний уровень абстракции, уменьшив таким образом ресурсоемкость создания объектов специфичных подклассов. Не менее важное значение имеет следование принципу самодостаточности (модульности и ограничения доступа), в соответствии с которым объекты, образующие систему, должны "знать" о механизме функционирования друг друга только необходимый минимум – перечень исполняемых функций без механизма их реализации. В итоге мы должны получить структуру объектов, связанных между собой отношениями наследования, взаимодействия и иерархии. Способ реализации этих отношений выражается объектной моделью СУ, а

распределение абстракций системы по физическим контейнерам – модулям, подведет нас к функциональной схеме СУ.

Важно отметить, что решения, принятые при проектировании системы на принципах ООП, распространяются на весь класс машин в целом. Это, при соответствующей проработке, обеспечивает легкое распространение удачных проектных решений как при проектировании, так и при модернизации систем.

Экономический аспект ООП к задачам создания СУ технологическими объектами состоит в том, что мы получаем возможность заметно экономить ресурсы (временные и материальные) при разработках новых систем путем эффективного использования отработанных фрагментов других проектов. Сказанное приобретает еще большее значение в связи с тем, что в современных условиях жесткой конкуренции между производителями высокотехнологичных изделий более быстрое, при прочих равных условиях, появление продукта на рынке означает успех проекта.

Таким образом, основными тенденциями развития технических систем являются их компьютеризация, усложнение конструкции и алгоритмов работы, а также процессов проектирования и производства. Для работы со сложными системами в различных областях знаний получили развитие подходы, среди которых особое внимание заслуживает объектно-ориентированный подход к созданию сложных, в том числе информационных систем, а к числу последних относятся системы управления. Выделение классов рабочих машин по общим конструктивно-технологическим признакам и задачам управления создает предпосылки для решения задач ресурсосбережения на всех этапах жизненного цикла систем управления этими машинами. Базой для создания соответствующей методологии проектирования СУ классов машин целесообразно выбрать объектно-ориентированный подход.

## 1.2 Летучие механизмы как класс рабочих машин в аспекте задач управления

В соответствии с мотивацией выбора объекта исследования (см. Введение) и заключением о целесообразности применения ООП для решения задач ресурсосбережения на этапах жизненного цикла технологических объектов (см. п.1.1.3) здесь мы рассмотрим структуру класса технологических машин, одним из подклассов которого являются летучие пилы с возвратно-поступательным движением несущего органа, определим характеристические признаки этого класса.

1.2.1 Классообразующие признаки летучих механизмов, определение класса "Летучий механизм". Важнейшим признаком технологической машины, дающим основание для ее определения как летучего механизма, является то, что одной из технологических функций этой машины является преследование движущегося обрабатываемого изделия (ОИ). В отличие от других способов обработки изделия, когда производится его остановка, ЛМ позволяют производить требуемые операции над ОИ без его остановки, двигаясь синхронно с ним, – "на лету". Следует заметить, что кроме очевидного повышения производительности всей линии, данные механизмы позволяют увеличить выход годной продукции из-за уменьшения технологических потерь при аварийных остановках (например, прокатных станов), а в некоторых случаях без ЛМ вообще невозможны некоторые технологические процессы (например, "бесконечная" прокатка).

Проведенный нами анализ различных технологических машин, отнесенных к ЛМ (см. прил. А), дает основания для выделения набора конструктивных и технологических признаков, которые определяют и ограничивают ЛМ как класс рабочих машин. Такими признаками являются:

наличие несущего органа (НО) с автономным приводом (каретка летучей пилы, барабан летучих ножниц, поворотная платформа робота и т.п.);

наличие размещенных на НО других исполнительных механизмов (ИМ), осуществляющих технологические операции по обработке изделия (дисковой пилы, гайковерта, распылительной головки, манипулятора и т.п.);

циклический режим работы;

осуществление в течение рабочего цикла или на отдельных его этапах согласования законов движения НО, ОИ и рабочих органов других ИМ, размещенных на НО;

технологическая сущность одного из участков рабочего цикла заключается в выполнении операции преследования с конечным результатом в виде совпадения пространственных и скоростных координат несущего органа и точки обработки на обрабатываемом изделии;

отсутствие постоянной механической связи НО с ОИ или другими механизмами технологической линии (ТЛ), благодаря чему НО может перемещать размещенные на нем ИМ независимо от координат движения ОИ. По условиям технологии возможно преднамеренное образование временной механической связи НО с рабочими органами других механизмов ТЛ или с ОИ, при этом стремятся свести к возможному минимуму оказываемое производимой ЛМ обработкой отрицательное влияние (вплоть до нуля, или даже превратить это влияние в полезное) на технологический процесс и, главным образом, на транспортирование ОИ.

Таким образом, технологическая сущность, определяющая конструктивный состав ЛМ и задачи управления ими, может быть выражена определением: ЛМ – это класс рабочих машин, предназначенных для обработки изделий, производимой в процессе их перемещения в технологической линии, и обладающих указанными шестью характеристическими признаками. Любая рабочая машина, отвечающая данному определению, может быть отнесена к классу ЛМ. Примеры летучих механизмов рассмотрены в приложении А.

1.2.2 Декомпозиция рабочего цикла летучего механизма в аспекте задач управления. Сходство технологических функций, выполняемых различными ЛМ

(см. п.1.2.1, прил. А), порождает общую для них последовательность пяти этапов рабочего цикла. Дадим общую характеристику сущности этих этапов с точки зрения задач управления. Для этого воспользуемся показанной на рис.1.1 технологической схемой обработки движущегося изделия с помощью ЛМ. Здесь принято, что ОИ и ЛМ движутся прямолинейно. Пространственные траектории движения ОИ и НО строго фиксированы конструктивным исполнением ТЛ. В общем случае поступательные движения ОИ и НО могут быть трехкоординатными в декартовой системе координат. Поэтому общая задача управления движением НО представляется совокупностью трех идентичных в их постановке задач управления пространственными, скоростными и силовыми координатами движения некоторой фиксированной точки конструкции НО по каждой из трех координат. Такая декомпозиция задачи управления движением НО может быть применена также для НО, совершающих вращательное движение с неподвижной осью вращения, что характерно, например, для барабанных ножниц. Будем называть упомянутую выше точку конструкции НО опорной, поскольку в случае поступательного движения НО в направлении одной координатной оси эта точка может быть развернута в опорную плоскость, перпендикулярную направлению движения, а в случае двухкоординатного движения – в опорную прямую, перпендикулярную координатной плоскости. Описанная декомпозиция пространственного движения

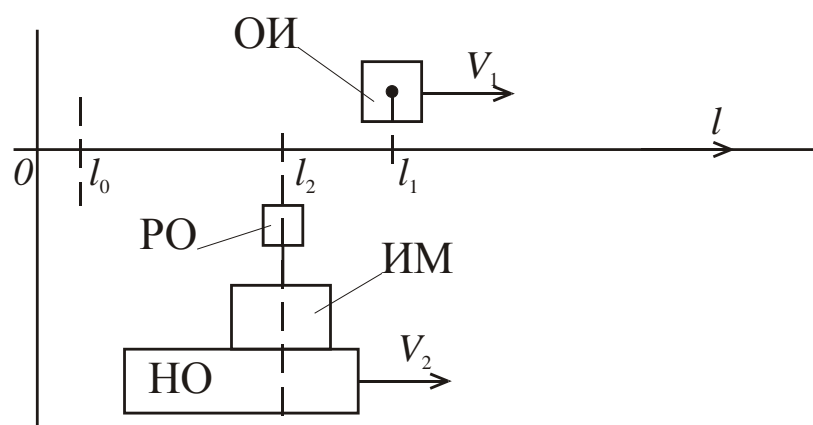


Рисунок 1.1 – Технологическая схема обработки изделия с помощью летучего механизма

НО и, соответственно, задачи управления координатными движениями позволяет ограничиться рассмотрением рабочего цикла применительно к одной координате движения. Заметим, что для большинства промышленных ЛМ характерна постановка задачи управления движением НО в точности по одной координате (например, летучие пилы). Рис.1.1 иллюстрирует именно такой случай. Координатное пространство ЛМ (назовем его базовым), жестко ориентированное в пространстве ТЛ, в нашем случае имеет одну координатную ось  $l$ , определяющую положительное направление движения как ОИ, так и НО.

Поскольку рассматривается однокоординатное движение ОИ и НО, то опорные точки на этих объектах заменяются опорными плоскостями (показаны пунктиром), перпендикулярными оси  $l$ . Для ОИ естественно принять в качестве опорной точку его обработки. Для упрощения задачи согласования движений НО и ОИ удобно выбрать опорную плоскость НО такой, чтобы при совпадении опорных плоскостей обработка ОИ производилась абсолютно точно. Положение ОИ и НО в базовом пространстве определяется координатами  $l_1$  и  $l_2$  положения их опорных точек. Кроме координаты  $l_1$ , к числу контролируемых относится также скорость  $V_1$  движения ОИ. Задача управления движением НО сводится к управлению его положением  $l_2$  и производными последнего, в частности, скоростью движения  $V_2$ .

Этап 1. Начало цикла. Подготовка к запуску НО. Привод перемещения НО работает в режиме позиционирования. Движущее усилие или момент, развиваемый приводом, может поддерживаться отличным от нуля с целью выборки зазоров в кинематической цепи. Исполнительные механизмы, размещенные на НО, могут готовиться к последующей работе. Командно-координационное управление приводом НО и другими локальными подсистемами осуществляет СУ ЛМ на основе анализа процесса движения ОИ. Окончанию этого этапа соответствует начальное состояние НО, которое характеризуется рядом признаков, связанных со значениями управляемых координат вектора состояния НО и состояниями ИМ, размещенных на НО. При этом НО находится в положении, которое характеризуется определенным (начальным) значением координаты  $l_2=l_n$ . Исходное  $l_0$  значение положения НО устанавливается по окончании предыдущего рабочего цикла либо после выполнения

настроечных операций (ввода начальных условий). На данном же этапе рабочего цикла исходное положение НО может корректироваться, с переходом его в начальное с целью более точного исполнения последующих рабочих операций за счет выборки зазоров.

Этап 2. Формирование целеуказания на преследование опорной точки ОИ, ожидание команды на запуск НО. СУ ЛМ на этом этапе прогнозирует время поступления опорной точки ОИ в зону обработки (пореza, окраски и т.п.) и скорость ее движения в этой зоне, определяет момент запуска НО и задает параметры закона движения НО на третьем этапе рабочего цикла. Локальная СУ привода НО принимает от СУ ЛМ эту информацию и ожидает поступления команды на запуск.

Этап 3. Запуск НО, отработка приводом НО целеуказания на преследование ОИ. Локальная СУ привода НО осуществляет процесс управления последним в соответствии с полученным целеуказанием на достижение заданной скорости  $V_2$  движения НО в заданной точке ТЛ, чтобы синхронизировать НО с ОИ как по скорости, так и по положению и сохранять требуемое их взаимное расположение в течение некоторого времени, необходимого для выполнения технологических операций по обработке изделия. Во время этого этапа рабочего цикла возможно выполнение некоторых подготовительных операций исполнительными механизмами, расположенными на НО. Данный этап может завершаться механическим сцеплением НО с ОИ либо другими элементами ТЛ, связанными механически с ОИ.

Этап 4. Продолжение движения НО в направлении перемещения ОИ, выполнение технологических операций обработки изделия. На данном этапе осуществляется синхронное перемещение НО и ОИ. Исполнительные механизмы, размещенные на НО, выполняют требуемые технологические операции над ОИ по заданной программе. Если синхронизация НО с ОИ осуществляется путем механического сцепления, то начало и окончание данного этапа фиксированы во времени моментами сцепления и расцепления. В других случаях, когда синхронность движения НО и ОИ обеспечивается формированием соответствующего закона движения НО, начало этого этапа фиксируется при



попадании вектора состояния НО (положения, скорости, ускорения, движущего момента или усилия) в заданную область пространства состояний, определяемую текущими значениями координат движения ОИ. Иначе говоря, к началу рассматриваемого этапа должна быть решена задача преследования ОИ. Что касается момента окончания данного этапа, то его временную фиксацию осуществляет СУ ЛМ на основании логического анализа информационных сигналов, поступающих от всех ИМ, размещенных на НО. В процессе выполнения технологических операций или в течение всего четвертого этапа возможно силовое взаимодействие ЛМ с ОИ. В частности, оно имеет место при жесткой механической связи НО с ОИ, если она предусмотрена принципом работы ЛМ. Более того, усилие, с которым ЛМ действует на ОИ (или несущий его механизм), в подобных случаях допускается только тянущего характера в направлении движения НО (летучие пилы и ножницы).

Этап 5. Установка НО в исходное положение, переход ЛМ в исходное состояние. Этот этап начинается по сигналу о завершении четвертого этапа (от МС или другого ИМ) и завершается установкой НО в заданное исходное положение  $l_0$ . На данном этапе производится перевод всех исполнительных механизмов ЛМ в исходные состояния (если это не произошло раньше). Если НО движется возвратно-поступательно либо возвратно-вращательно, то на данном этапе обязательно осуществляется его движение в обратном направлении с последующим позиционированием в заданном (исходном) положении. Возврат НО в исходное положение осуществляется без изменения направления его движения, если оно вращательное однонаправленное.

Рассмотренное разбиение рабочего цикла ЛМ на пять этапов может быть отнесено без принципиальных изменений к ЛМ любого технологического назначения. Как видно из характеристики этапов рабочего цикла ЛМ, его определяющим механизмом является НО. Это связано с тем, что именно НО работает в режиме преследования, именно им реализуются все функции, отличающие ЛМ от других рабочих машин. В соответствии с этим, основные функции, выполняемые СУ ЛМ, связаны с управлением движением НО.

Таким образом, мы определили суперкласс "Летучий механизм", рассмотрели его структуру и выделили шесть характеристических признаков его экземпляров и произвели декомпозицию рабочего цикла ЛМ на пять последовательно исполняемых этапов.

### 1.3 Современное состояние систем управления летучими пилами

Рассмотрение различных ЛМ с точки зрения областей применения показывает, что одной из ведущих отраслей промышленности в развитии СУ ЛМ является металлургия, характеризующаяся высотой предъявляемых к ЛМ требований. Все технические решения, полученные здесь, применяются и в других отраслях. Также следует обратить внимание на различные производства с применением роботов. Здесь сосредоточены большие материальные средства. Таким образом, мы можем определить приоритетные направления в выработке концептуальных решений относительно систем управления рабочими органами летучих механизмов.

Выделенные в п.1.2 характеристические признаки экземпляров класса "Летучий механизм" и технологические характеристики пяти последовательно исполняемых этапов рабочего цикла достаточны для определения ключевых абстракций класса ЛМ. Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении изучения отдельных подклассов ЛМ, т.е. технологических машин широкого применения, чем и обусловлен выбор объекта исследования (см. Введение). В настоящей работе мы ограничимся летучими пилами с возвратно-поступательным движением несущего органа.

Из всех видов ЛМ (см. прил. А), руководствуясь их отличительными признаками, выделим подкласс ЛП. К нему отнесем механизмы, отличающиеся обязательным наличием двух признаков: НО совершает прямолинейное возвратно-поступательное движение; в процессе обработки изделия имеет место жесткая механическая связь НО с ОИ через режущий инструмент или МС, исключаяющая

возможность перемещения НО относительно сечения реза в процессе обработки изделия.

При любом конкретном применении ЛП выполняют технологическую задачу мерного пореза движущегося без остановок длинномерного материала (фасонного профиля, трубы, древесностружечной плиты и т.п.). Широта подкласса "Летучая пила", одинаковый основной состав ИМ и существенная общность задач управления вне зависимости от области применения обуславливают экономическую целесообразность разработки объектно-ориентированной системы управления летучей пилой (СУЛП). К данному подклассу можно отнести ЛП профилирующих линий, прокатных и трубных станков (кроме ЛП с НО в виде вращающегося стола), линий по производству древесноволокнистых плит (см. прил. А).

С точки зрения набора ИМ подкласс ЛП можно разбить на две группы. Первую из них составляют ЛП, имеющие МС. К их числу относятся, например, ЛП с пильным диском, которые разрезают трубы, профили и другие длинномерные материалы, разрезание которых с помощью ЛН недопустимо. Вторую группу образуют ЛП, не имеющие МС. В их число входят, например, ЛП с дисковыми ножами, применяемые в металлургии и с пильным диском, применяемые в производстве листовых строительных материалов.

Анализируя современные источники информации, относящиеся к оборудованию металлургических заводов [58-65], можно сделать вывод о том, что существующие в настоящее время СУЛП в подавляющем большинстве морально и физически устарели. В связи с этим назрела необходимость их модернизации или замены, что и производится на некоторых заводах [59, 60]. Разработанные ранее и эксплуатирующиеся в настоящее время СУЛП в основном отвечают уровню приводной и управляющей техники середины прошлого столетия. В некоторых случаях несовершенство СУЛП [7] является фактором, сдерживающим повышение производительности всей ТЛ, из-за недоиспользования потенциала других ее агрегатов. Так как повышение производительности ТЛ является постоянно актуальной задачей, стоящей перед разработчиками, следует ожидать дальнейшего обострения этой проблемы.

Существующие СУЛП имеют резервы в отношении снижения ресурсоемкости ЛП во время их эксплуатации. Наличие таких резервов обусловлено возможностью применения современных приводов и компьютеризованных систем управления в сочетании с более сложными законами управления. В связи с актуальностью проблемы энергосбережения в Украине [29-31], в настоящее время уделяется большое внимание вопросам снижения энергопотребления приводами рабочих машин [66-73]. В работах [69, 72] рассматриваются процессы, аналогичные происходящим в приводе НО ЛП. Однако остается актуальным решение комплексной задачи ресурсосбережения для этапа эксплуатации ЛП (см. Введение).

Установки ЛП, которые выпускаются зарубежными фирмами [74-79], характеризуются высокими эксплуатационными характеристиками. Они оснащены современными СУЛП, выполненными на базе промышленных компьютеров или контроллеров, оснащаются пультами (или набором пультов на выбор) с дисплеями и сенсорными панелями, могут подключаться к вычислительным сетям. Такую технику приобретают некоторые заводы стран СНГ, например ОАО "Первоуральский новотрубный завод" (Россия) [59]. Однако, импортные системы обладают известными недостатками – высокая стоимость, зависимость от фирмы-производителя, недоиспользование накопленного отечественного научного и промышленного потенциала, инвестирование экономики страны-производителя в ущерб собственной.

Необходимо отметить, что существующие СУЛП не обладают признаками иерархической структуризации (модульности), не содержат явно выраженных подсистем разного уровня иерархии. Можно констатировать отсутствие случаев применения ООП к данным системам, а также и ко всему классу ЛМ в целом. В лучшем случае разрабатывались СУ, универсальные по применимости для нескольких аналогичных установок конкретной ТЛ для обеспечения взаимозаменяемости. Правда, можно усмотреть аспекты ООП в работе [80]. Однако, попытки обобщить задачи управления ЛП в лучшем случае ограничивались одной отраслью промышленности. Косвенно об этом свидетельствует, например, различное название ЛП в металлургии и деревообработке. Очевидно отсутствие

четкой теории, методик проектирования объектно-ориентированных СУЛП. В целом, существующее в настоящее время положение дел в данной области можно охарактеризовать как окончание этапа разрозненного, несистематического накопления практических и теоретических знаний. В связи с этим существует назревшая необходимость обобщения, интеграции и систематизации накопленных знаний с целью создания СУ различных подклассов ЛМ. Принимая во внимание п.1.1, базой для придания имеющимся знаниям новой качественной формы следует считать ООП. При этом из результатов, полученных при исследовании подклассов ЛМ (в нашем случае подкласса ЛП), можно выделить положения, относящиеся ко всему классу ЛМ, и, таким образом, указать пути экономии ресурсов при проектировании СУ любых ЛМ.

Обязательным атрибутом всех ЛП является наличие НО. НО также является классом с присущими ему атрибутами. Функции управления процессами движения НО выполняет СУЛП, рассматриваемая как класс, содержащая в качестве подкласса систему управления несущим органом. Последняя является, по существу, системой управления приводом НО. Эта система формирует задающие сигналы, поступающие в локальную систему управления привода НО. СУЛП представляет собой устройство для обработки информации и выполняется в виде вычислительного устройства, например промышленного контроллера. Система управления приводом несущего органа реализуется в СУЛП в виде определенного подалгоритма. Система управления приводом несущего органа, в свете единства технологических признаков рабочего цикла летучих пил (см. п.1.2), является широко распространенным классом. В соответствии с целью и задачей работы, учитывая массовость класса и определяющее влияние законов движения привода НО на ресурсоемкость технологических процессов (см. Введение), в пределах объекта исследования выбираем **предмет исследования**: метод синтеза объектно-ориентированной системы управления несущим органом летучей пилы с возвратно-поступательным движением несущего органа.

По своей логической структуре метод, являющийся предметом исследования, представляет собой совокупность методов решения отдельных задач

концептуального проектирования и разработки алгоритмов управления приводом НО с целевой установкой ресурсосбережения на этапах проектирования и эксплуатации конкретных экземпляров ЛП.

Концептуальное проектирование предусматривает построение объектных моделей суперкласса "Летучий механизм" и его подклассов. С помощью этих моделей выявляются отношения агрегации и наследования (атрибутов и методов), учет которых необходим для разработки структурно-алгоритмического базиса СУЛП и обеспечения модульности алгоритма управления несущим органом ЛП.

Для рассмотрения вопросов концептуального проектирования на основе ООП необходимо выбрать классообразующий (эталонный) технологический объект. Для класса "Летучая пила" с заданным характером движения НО (в нашем случае – возвратно-поступательным) это может быть один из известных образцов летучих пил с максимальным набором ИМ, размещенных на НО. Именно для такого "эталонного" объекта разрабатывается объектно-ориентированная функциональная схема СУЛП на основе структурно-алгоритмического базиса.

Задачи минимизации ресурсозатрат на этапе эксплуатации ЛП решаются путем формирования соответствующих законов движения НО на этапах рабочего цикла. Управление движением НО осуществляется алгоритмическими средствами, реализуемыми в СУЛП, поэтому необходимо корректно поставить задачи управления приводом НО и предложить методы их решения с алгоритмической и программной реализацией.

#### 1.4 Выводы. Постановка задач исследования

Анализ тенденций развития современной техники (см. п.1.1) позволяет признать ООП современной методологической основой проектирования компьютерных СУ технологическими объектами. ООП наиболее эффективен в задачах создания СУ для классов технологических машин широкого применения. Обзор различных отраслей промышленности позволил выделить один из классов машин широкого применения, а именно – класс "Летучий механизм".

Анализ характерных признаков ЛМ и наиболее показательных примеров этих механизмов (см. п.1.2, прил. А) приводит к заключению о том, что это широкий класс программно управляемых рабочих машин. С точки зрения управления этими машинами общей для них является задача управления движением НО. Что касается управления механизмами, размещенными на НО и непосредственно выполняющими операции обработки ОИ, то постановка задач управления этими механизмами носит индивидуальный характер для каждого вида ЛМ и конкретной ТЛ. Следовательно, в общем виде СУ ЛМ должна выполнять функции управления движением НО и информационной связи между локальными системами управления всех ИМ, включая НО, для координации их движений. Задачи управления НО и информационного обмена между СУ верхнего и локальных уровней детализируются на основе анализа рабочих циклов различных ЛМ.

Сделано аналитическое обобщение характеристических признаков рабочего цикла класса технологических машин, названных летучими механизмами. Из выделенных на основании ключевых абстракций подклассов ЛМ для дальнейшего исследования выбран подкласс ЛП. В соответствии с современными требованиями, СУЛП (как и СУ любого ЛМ) должна отвечать требованиям ресурсосбережения на этапах проектирования и эксплуатации. Ресурсосбережение при проектировании заключается в сокращении затрат трудовых и финансовых ресурсов, а во время эксплуатации ЛП под управлением СУЛП – в повышении производительности, точности, снижении энергопотребления, уменьшении вероятностей возникновения аварийных ситуаций и выпуска некондиционной продукции (см. Введение и п.п.1.2 – 1.3). Так как основной по сложности и важности функцией СУЛП является отработка задач управления НО, то и решение проблемы ресурсосбережения для ЛП в основном будет связано с процессами управления движением НО. Актуальностью этих задач обоснован выбор предмета исследования (см. Введение и п.1.3).

В соответствии с выбранным предметом исследования общей **задачей работы** будем считать разработку метода синтеза объектно-ориентированной системы управления несущим органом летучей пилы, методов и алгоритмов ресурсосберегающего управления процессами его движения. Проблемная ситуация,

порождаемая предметом исследования и общей задачей работы, требует решения следующих задач исследования.

**Задача 1.** Провести системный анализ и объектное моделирование суперкласса "Летучий механизм" и подчиненных ему по иерархии классов "Летучая пила с возвратно-поступательным движением несущего органа", "Привод несущего органа", "Система управления летучей пилой", "Система управления приводом несущего органа летучей пилой".

Результатом решения этой задачи должно быть корректное определение класса "Летучий механизм", объектные модели класса и его подклассов, отражающие их сущностные и структурные аспекты и пригодные для определения путей ресурсосбережения на этапе разработки систем управления.

**Задача 2.** Произвести концептуальную разработку объектно-ориентированной системы управления приводом несущего органа летучей пилой.

В результате решения этой задачи должны быть предложены объектно-ориентированные структурная и функциональная схемы системы управления летучей пилой, а также общий алгоритм работы системы управления, как завершающий этап ее концептуального проектирования.

**Задача 3.** Разработать алгоритм ресурсосберегающего управления приводом несущего органа летучей пилой, отвечающий принципам объектно-ориентированной технологии создания объектов новой техники.

Результатом решения этой задачи должны быть алгоритм, предусматривающий минимизацию энергозатрат в приводе несущего органа летучей пилой при соблюдении требуемой точности мерного пореза длинномерного материала (ОИ) и ограничения по силовому взаимодействию несущего органа летучей пилой с обрабатываемым изделием.

Решению первой задачи посвящен второй раздел данной работы.



## 2 ОБЪЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАССОВ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ЛЕТУЧИХ ПИЛ С ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НЕСУЩИХ ОРГАНОВ

В данном разделе проводится системное исследование летучих механизмов как класса рабочих машин с использованием унифицированного языка моделирования UML, необходимое для разработки методики концептуального построения объектно-ориентированной системы управления летучей пилой. С этой целью проведен объектно-ориентированный анализ и построены модели, отражающие ключевые абстракции, относящиеся к предметной области летучих пил.

### 2.1 Объектная модель класса "Летучий механизм"

Проведенный в п.1.2 анализ характерных признаков и заключенной в рабочем цикле технологической сущности экземпляров класса ЛМ позволяет провести системное исследование последнего, заключающееся в выявлении структуры класса и отношений между его элементами (подклассами). В качестве методологической базы принимаем ООП. Из известных объектно-ориентированных методологий (см. п.1.1.3) мы остановимся на унифицированном языке моделирования UML [55]. Его преимущества обусловили широкое распространение и поддержку данной методологии многими CASE-средствами. В нашем случае наличие таких средств можно признать желательным, но не обязательным, т.к. в основном они являются инструментом автоматизированной поддержки методологии.

Следуя выбранной методологии UML, можем построить объектную модель (диаграмму классов) класса ЛМ, представленную на рис.2.1. В данной модели класс ЛМ представляет собой абстрактный суперкласс верхнего уровня иерархии. Каждый из экземпляров класса ЛМ состоит из набора ИМ, причем НО в связи со специфичностью его функций выделен в отдельный класс. Зависимость между

классом ЛМ и классами ИМ и НО представлена отношением агрегации. ИМ и НО приводятся в движение своими приводами, имеющими в своем составе соответствующие локальные системы управления, обеспечивающие формирование требуемых статических и динамических характеристик, а также контроль состояния и диагностику привода и рабочего органа. Управление экземпляром класса ЛМ осуществляет система управления летучим механизмом (СУЛМ), которая также рассматривается как класс (в автоматизированной технологической линии функции СУЛМ выполняет система управления этой линией). Координационное управление

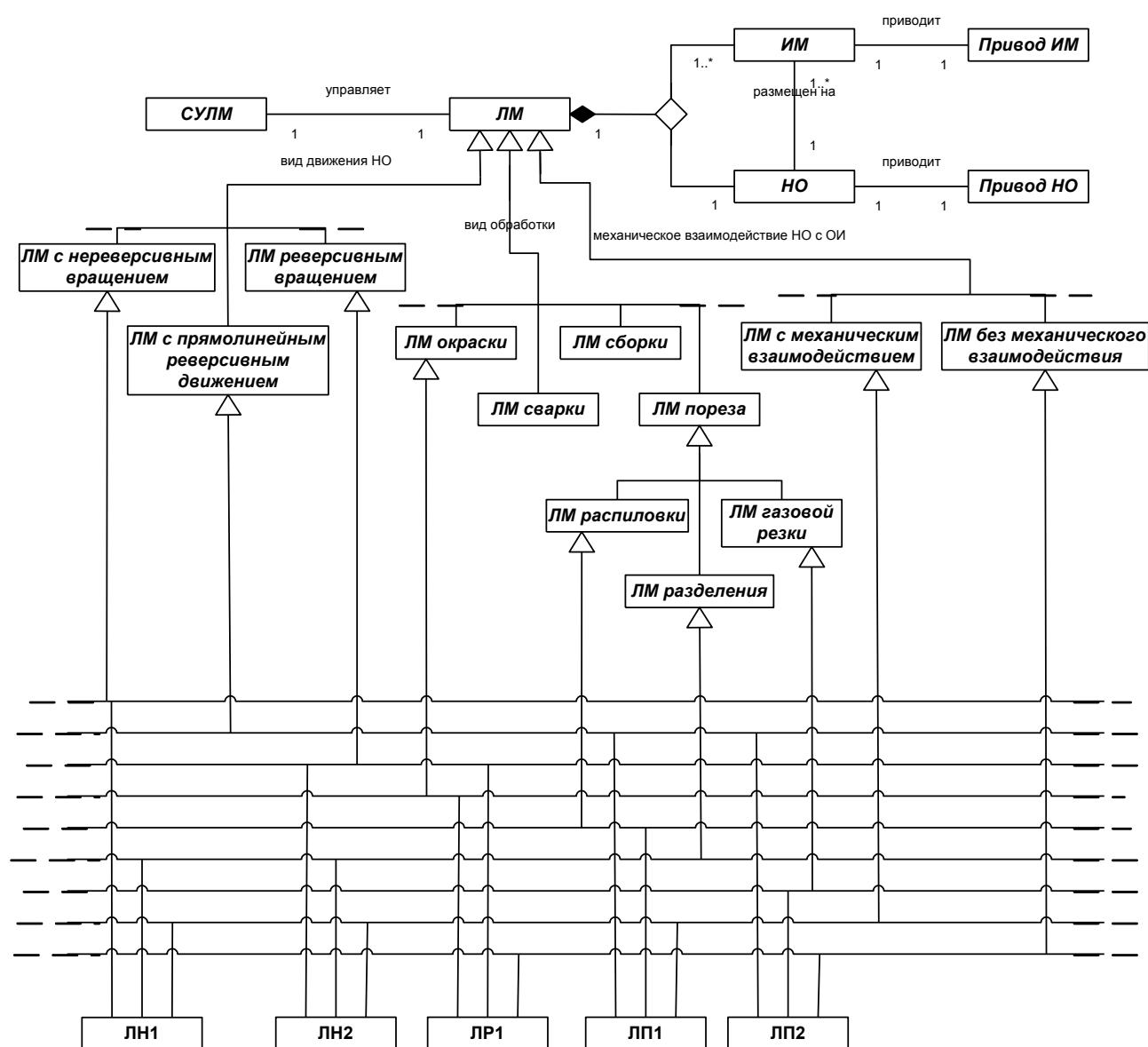


Рисунок 2.1 – Объектная модель суперкласса "Летучий механизм"

приводами ИМ и НО осуществляет локальная система управления летучего механизма, входящая в его состав, обменивающаяся информацией с СУЛМ. Все ЛМ, образующие суперкласс, по виду движения НО делятся на ЛМ с нереверсивным вращением НО, ЛМ с реверсивным вращением НО, ЛМ с прямолинейным реверсивным (возвратно-поступательным) движением НО. По виду обработки ОИ все ЛМ делятся на производящие окраску, сварку, сборку, порез. Последние делятся на ЛМ, производящие порез ОИ путем распиловки, разделения без снятия стружки или газовой (лазерной) резки. По характеру силового воздействия, оказываемого летучим механизмом на ОИ при его обработке, все ЛМ делятся на два вида. К первому из них относятся ЛМ, для которых характерно механическое (силовое) взаимодействие НО через определенный ИМ и обрабатывающий инструмент с ОИ в процессе обработки последнего, либо через специальный механизм сцепления НО с ОИ (что чаще всего). Ко второму виду относятся ЛМ, несущие органы которых не вступают в силовое взаимодействие с ОИ ни на одном из этапов рабочего цикла.

Описанные выше (см. п.1.2) существенные конструктивно-технологические признаки различных подклассов ЛМ представлены в объектной модели (рис.2.1) с помощью отношений наследования, причем в необходимых случаях применено соответствующее количество уровней классификации. На самом нижнем уровне находятся подклассы, которые, собственно, и порождают реальные объекты – летучие пилы, летучие ножницы, роботы и другие конкретные ЛМ. Необходимые отличительные признаки они берут у соответствующих классов и суперкласса путем множественного наследования. В приведенной модели представлены наиболее известные классы нижнего уровня в суперклассе ЛМ. Показанные пунктиром линии говорят о возможных дополнениях суперкласса ЛМ новыми представителями.

Для наглядности и понимания структуры суперкласса ЛМ в модели рис.2.1 не показаны атрибуты и методы классов. Предлагаемая объектная модель (рис.2.1) позволяет представить всю совокупность наиболее существенных признаков и отношений, структурные аспекты суперкласса ЛМ и дает возможность обеспечить общность элементов разработок для разных подклассов ЛМ (прямое следствие

наследования). В частности, из этой модели видно, что, например, класс ЛН1 – это ЛМ, НО которых совершают нереверсивное вращение, при обработке ОИ на него может оказываться силовое воздействие из-за механического сцепления, вид обработки – порез ОИ путем разделения материала без снятия стружки. Аналогично, класс ЛН2 имеет сходные с ЛН1 признаки, однако НО совершает реверсивное вращение. Любой представитель класса ЛП1 имеет НО, который совершает прямолинейное реверсивное движение, производит распиловку ОИ при наличии механической связи НО с ОИ. Класс ЛП2 аналогичен классу ЛП1 по виду движения НО, но во время пореза ОИ механическая связь последнего с НО отсутствует. ЛР1 представляет из себя класс окрасочных ЛМ с реверсивно вращающимся НО, без механической связи последнего с ОИ.

Предложенный вариант (рис.2.1) объектной модели суперкласса ЛМ не является единственно возможным. Структура объектной модели выбирается исходя из цели ее дальнейшего использования. Разработанная нами модель дает возможность установить состав и характер конструктивно-технологических признаков, наследуемых классами нижнего уровня (ЛН1, ЛН2, ЛР1, ЛП1, ЛП2), а точнее, любым из представителей каждого из этих классов. Принципы абстрагирования и классификации, принятые в данной модели, обусловлены поставленной конечной целью разработки системы управления представителем какого-либо класса нижнего уровня. Заметим, что в приложении к компьютерной системе управления конкретным ЛМ рассмотренная объектная модель отражает статические, структурные аспекты объекта управления.

Таким образом, мы имеем представление о месте и взаимоотношениях интересующего нас подкласса ЛП1 (далее ЛП) в классе ЛМ. Относительно хронологической стабильности модели (рис.2.1) можно сказать, что с течением времени в ней не предвидится принципиальных изменений. Возможны различные дополнения и модификации, связанные с привлечением новых (не известных на данном этапе) подклассов ЛМ, с перемещениями по уровням наследования некоторых абстракций в сторону спецификации или обобщения (что отразится на содержании соответствующих классов и подклассов). В частности, посредством

данной модели результаты развития некоторых подклассов ЛМ могут обобщаться по линиям наследования и на другие подклассы.

## 2.2 Функционально-технологическая характеристика экземпляра класса "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа

2.2.1 Технологическая схема классообразующей ЛП и ее рабочий цикл. Подробно опишем работу экземпляра класса ЛП1 (рис.2.1), выбранного в п.1.3 в качестве классообразующего ЛМ. Этот ЛМ служит эталонной моделью ЛП при создании СУЛП.

Технологическая схема классообразующей ЛП представлена на рис.2.2. Готовый профиль 1 выходит из валков 2 последней формующей клетки профилегибочной линии со скоростью  $V_1$ , измеряемой с помощью датчика скорости 3. ЛП имеет в качестве исполнительных механизмов НО 6 и размещенные на нем МП 15 со своим приводом (не показан) и МС 9 с приводом 7. Вращение режущего инструмента 14 производится МВ 11 с приводом М. Возвратно-поступательное движение НО обеспечивается электроприводом 5. Движение профиля и НО происходит в одномерной координатной системе (ось  $l$ ) с фиксированным началом отсчета. Сечение реза 4 имеет текущую координату  $l_1$ . Текущее положение НО определяется расстоянием  $l_2$  от начала отсчета до некоторой произвольно выбранной опорной плоскости 13, перпендикулярной оси  $l$  и жестко связанной с НО. Движение НО ограничено минимальной  $l_{\min}$  и максимальной  $l_{\max}$  координатами на оси  $l$ . Обработка профиля (порез), т.е. выполнение операций подачи и возврата режущего инструмента, зажима и разжима профиля, возможна только при нахождении режущего инструмента в пределах зоны обработки, когда  $l_{\text{нзо}} \leq l_2(t) \leq l_{\text{кзо}}$ , где  $l_{\text{нзо}}$  и  $l_{\text{кзо}}$  – координаты начала и конца зоны обработки. Ставится задача мерного пореза движущегося без остановки профиля 1 на отрезки заданной длины  $L_m$  (мерной длины) с допустимым отклонением  $\Delta L_m$ . На исполнительском уровне управление механизмами ЛП осуществляют ЛСУ. Командные сигналы для ЛСУ

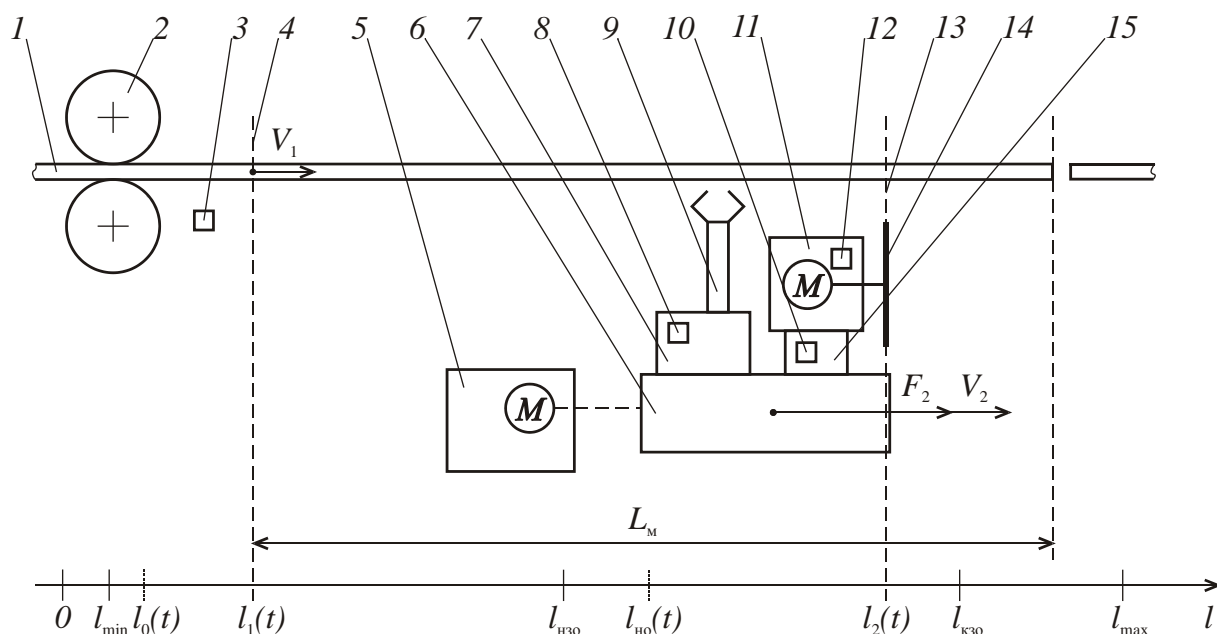


Рисунок 2.2 – Технологическая схема классообразующей летучей пилы

формируются в СУЛП. Все системы управления содержат свои информационно-измерительные подсистемы, в состав которых входят показанные на рис.2.2 датчики зажима профиля 8, исходного положения режущего инструмента 10, вращения режущего инструмента 12. Функциональный состав информационно-измерительной системы СУЛП и всех ЛСУ расширяется и уточняется в процессе выполнения последовательных этапов разработки СУЛП.

В дополнение к сказанному в п.1.3 заметим, что за исключением редких случаев наличие зазоров в приводе НО можно признать за правило. То же можно сказать и относительно преимущественного применения шестеренно-реечной передачи. Данная передача обеспечивает достаточные точность, жесткость, надежность и высокий КПД при малой стоимости [12]. Учитывая необходимость обеспечения перемещений НО ЛП на достаточно большие расстояния, указанную передачу можно признать наиболее подходящей из известных. Недостатком данной передачи является наличие зазоров. Их источником может быть также и редуктор, соединительные муфты [81, 82]. Известно множество способов компенсации зазоров в передачах [50, 81-84], однако они связаны с усложнением механической части системы, а также с увеличением суммарной установленной мощности привода или

значительными потерями на трение. Однако, как будет показано ниже, в нашем случае существует возможность реализации более простого способа исключения вредного влияния зазоров. Указанный способ связан с управлением моментом, развиваемым приводом НО.

ЛП работает в циклическом режиме. Рабочий цикл состоит из пяти этапов, последовательно типизированных для любых ЛМ в п.1.2.2. Приведем описание этих этапов, адаптированное к классообразующей ЛП.

Этап 1. Начало цикла, перевод НО из исходного в начальное состояние, подготовка к запуску НО. Исходное состояние ЛП характеризуется тем, что в исходных состояниях находятся все ее механизмы. В начале этапа НО неподвижен, т.е. скорость его движения  $V_2=0$ . Исходное положение НО в координатной системе характеризуется координатой  $l_2=l_0$ . Задачей данного этапа является подготовка ЛП к запуску "на рез". Привод НО должен прийти в состояние, обеспечивающее возможно наилучшее исполнение им задачи преследования несущим органом сечения реза, решаемой далее, что требует повышения уровня его управляемости. Также необходимо повысить уровень предсказуемости поведения привода при исполнении упомянутой задачи для повышения точности расчета момента запуска НО. Для решения указанных задач используются имеющиеся доступные средства – выборка люфтов средствами ЛСУ привода НО (в режиме управления моментом [85]) под управлением СУЛП. Продолжительность этапа не регламентируется, но должна минимизироваться для ослабления временных ограничений других этапов рабочего цикла. Окончание этого процесса характеризуется значением  $F_2=F_{2\delta}$  силы, действующей на НО со стороны привода. Очевидно, значение  $F_{2\delta}$  должно лежать в заданных пределах  $F_{2\delta \min} \leq F_{2\delta} \leq F_{2\delta \max}$ . Граничные значения этой силы могут быть установлены экспериментально. Естественно, вместо силы  $F_2$  могут использоваться соответствующие значения электромагнитного момента, развиваемого электроприводом НО. Признаком завершения первого этапа является одновременное выполнение условий  $F_2=F_{2\delta}$  и  $V_2=0$ . Начальное положение НО в координатной системе характеризуется координатой  $l_2=l_{2н} \geq l_0$ .

Этап 2. Формирование целеуказания, ожидание команды на запуск НО. НО находится в неподвижном состоянии ( $V_2=0$ ), люфты выбраны,  $F_2=F_{2\delta}$ . ЛСУ привода НО ожидает поступления от СУЛП команды на запуск. СУЛП рассчитывает оптимальный закон движения НО на третьем этапе рабочего цикла, выдает характеристические параметры этого закона движения в ЛСУ привода НО, определяет время начала третьего этапа цикла и по достижении этого момента времени подает в ЛСУ привода НО команду на запуск. В течение второго этапа фактически осуществляется выстой готового к запуску НО, продолжительность которого определяет СУЛП.

Этап 3. Запуск НО, отработка приводом НО целеуказания на преследование сечения реза и синхронизацию НО с сечением реза на профиле. К концу данного этапа должно быть достигнуто равенство скоростей  $V_2=V_1$  при совпадении плоскости пильного диска с сечением реза на профиле (в этом состоит технологическая сущность целеуказания локальной СУ привода НО). При этом пильный диск и сечение реза должны находиться в начальной части зоны обработки. Точка  $l_{но}$ , в которой происходит совмещение плоскостей пильного диска и сечения реза в результате выполнения операции преследования, не должна выходить за допустимый предел  $l_{но\ max}$ , обусловленный скоростью движения профиля и временем распиловки. Окончание третьего этапа распознается по одновременному выполнению равенств  $V_2=V_1$  и  $l_2=l_1$  (полагаем, что опорная плоскость выбрана совпадающей с плоскостью пильного диска).

Этап 4. Продолжение движения НО в направлении перемещения сечения реза, выполнение реза. В течении данного этапа НО движется синхронно с сечением реза ( $V_2=V_1$  и  $l_2=l_1$ ). ИМ, размещенные на НО, выполняют требуемые технологические операции по порезке профиля. В самом начале этапа МС по команде из СУЛП зажимает профиль, осуществляя таким образом жесткую механическую связь НО с сечением реза. После зажима профиля СУЛП, во избежание подпора или чрезмерного натяжения, переводит ЛСУ приводом НО в режим регулирования силы  $F_2$  на уровне  $F_2=F_{2нат}$  (ее пределы могут определяться экспериментально), что приведет к незначительному натяжению движущегося профиля без его



повреждения. МП по команде СУЛП подает вращающийся пильный диск на зажатый профиль и после достижения диском крайнего положения (т.е. разрезания профиля) производится его возврат. По достижении диском исходного положения СУЛП дает команду МС на освобождение профиля. После разжима профиля, происходящего предельно быстро, МС выдает сигнал, свидетельствующий об окончании четвертого этапа.

Этап 5. Установка НО в исходное положение, переход ЛП в исходное состояние. На данном этапе производится перевод всех исполнительных механизмов ЛП в исходные состояния (если это не произошло раньше). Исходное состояние НО характеризуется нахождением его в положении с координатой  $l_2=l_0$  и скоростью  $V_2=0$ .

Моменты включения-выключения привода МВ пильного диска определяются по различным соображениям. Важно лишь, чтобы к началу его подачи и до отвода в исходное положение он вращался.

На рис.2.3 представлена упрощенная графическая интерпретация этапов рабочего цикла эталонной модели ЛП. Она составлена в предположении мгновенного изменения силы, действующей на НО со стороны привода, и равноускоренного движения НО. Моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_5$  соответствуют началам этапов Э1, Э2, ..., Э5 соответственно.

2.2.2 Ситуационный анализ рабочего цикла летучей пилы. После декомпозиции рабочего цикла эталонной модели ЛП (п.2.2.1) мы можем сформировать набор логических сигналов (переменных), необходимых для контроля текущего состояния ЛП в течение рабочего цикла и построить правила логического вывода для получения командных сигналов. Некоторые из этих сигналов формируются датчиками технологической информации (внешние переменные), а остальные формируются в СУЛП (внутренние переменные). При этом предварительно следует провести ситуационный анализ рабочего цикла эталонной модели ЛП, заключающийся в анализе последовательности технологических ситуаций рабочего цикла и выделении признаков их наступления. Результаты

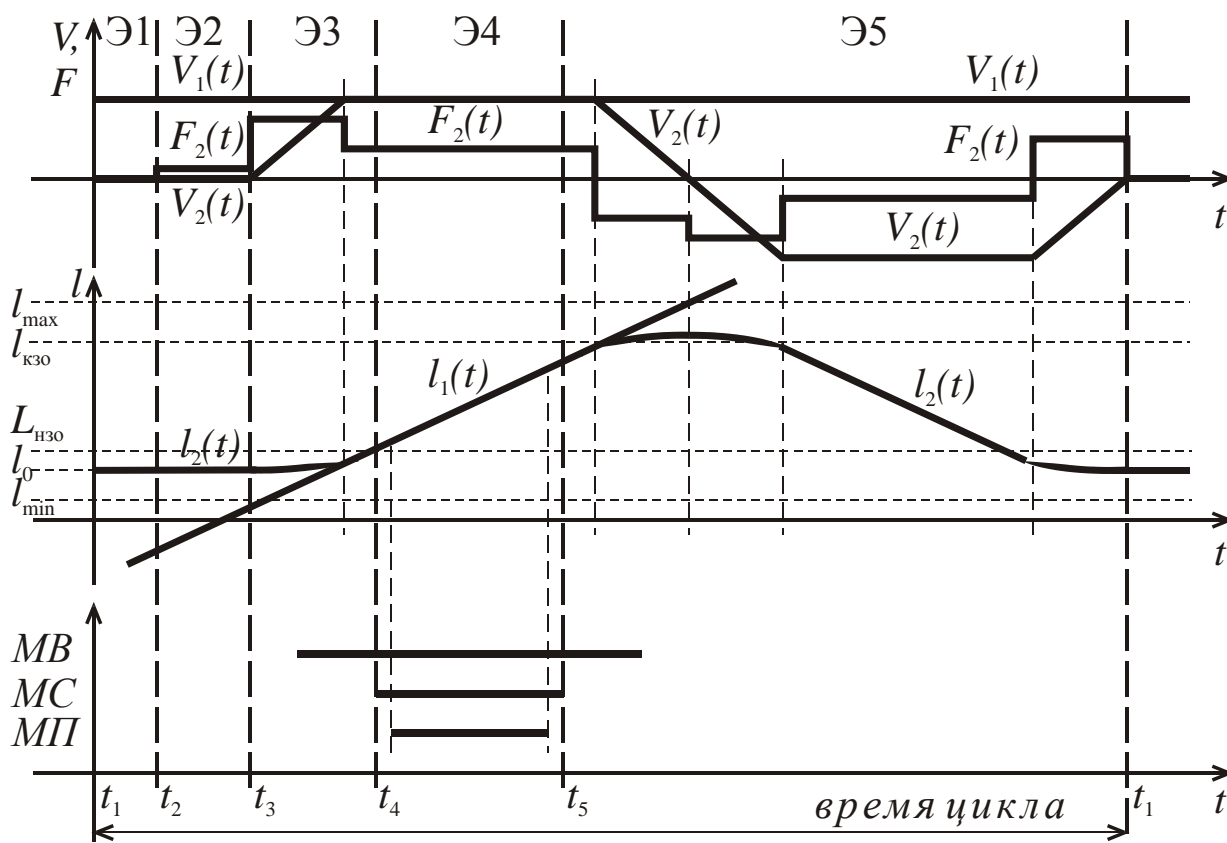


Рисунок 2.3 – Графическая интерпретация этапов рабочего цикла эталонной модели лущильной пилы

ситуационного анализа покажут требуемые логические переменные и правила формирования их значений. Декомпозицию рабочего цикла ЛП можно рассматривать как часть ситуационного анализа. Теперь мы должны четко выделить признаки этапов рабочего цикла и поставить им в соответствие логические переменные [86, 87].

Для контроля исполнения этапов рабочего цикла назначим логические переменные  $x_1, \dots, x_5$ . Работе ЛП на определенном этапе будет соответствовать значение 1 соответствующей по нумерации переменной. Назовем данную группу логических переменных ( $x_1, \dots, x_5$ ) переменными наблюдения. Если выполняется  $i$ -й этап цикла ( $i=1, \dots, 5$ ), то  $x_i=1$ , а остальные из этих переменных имеют значение  $x_j=0; j=1, \dots, 5; i=1, \dots, 5; j \neq i$ . Совокупность значений сигналов  $x_1, \dots, x_5$  определяет принципы управления исполнительными механизмами ЛП на соответствующих этапах рабочего цикла.

Для формирования значений переменных наблюдения необходимы вспомогательные логические переменные  $x_6, \dots, x_{10}$ , которые назовем переменными перехода. Они могут изменять свои значения в течение всего цикла работы ЛП с соблюдением одного условия: в течение  $i$ -го этапа переменная  $x_j, j=5+i$ , изменяет свое значение с 0 на 1 только в момент завершения этого этапа (моменты времени  $t_1 - t_5$  на рис.2.3), причем перед окончанием данного этапа на произвольном интервале времени имеет место равенство  $x_{5+i}=0$ . Изменение значения переменной  $x_{5+i}$  с 0 на 1 при исполнении  $i$ -го этапа цикла инициирует переход к очередному этапу с изменением значения переменной  $x_i$  с 1 на 0. Одновременно переменная  $x_{i+1}$ , если  $i=1, \dots, 4$ , или  $x_1$ , если  $i=5$ , изменяет свое значение с 0 на 1.

В свою очередь, для изменения значений переменных перехода введем следующую группу логических переменных – переменных ситуационного анализа  $x_{11}, \dots, x_{19}$ . Переменные  $x_{17}$  и  $x_{18}$  являются аналогами дискретных выходных сигналов устройств 12 и 8 (рис.2.2). Значение  $x_{17}=1$  является признаком вращения режущего инструмента. Значение  $x_{18}=1$  свидетельствует о том, что осуществляется процесс обработки изделия. Сигнал  $x_{18}$  формируется сигнализатором 8 срабатывания МС. Заметим, что при обработке изделий пилами, не оснащенными МС, переменная  $x_{18}$  будет относиться к категории внутренних переменных СУЛП и формироваться по специальному алгоритму.

Переменные  $x_{11}, \dots, x_{16}$  и  $x_{19}$  являются "внутренними" переменными СУЛП. Их значения формируются алгоритмически по следующим условиям. Переменная  $x_{11}$  имеет значение 1, когда двигатель привода НО создает движущую силу  $F_2(t)=F_{28}$  (рис.2.2), достаточную для выбора зазоров в передаточном механизме, но не достаточную для приведения НО в движение. Значение  $x_{12}=1$  формируется только при  $V_2=0$ . Переменная  $x_{13}$  формируется по специальному алгоритму и изменение ее значения с 0 на 1 является сигналом окончания второго этапа. Переменная  $x_{14}$  имеет значение 1 при равенстве скоростей  $V_2=V_1$ , в противном случае  $x_{14}=0$ . Значение  $x_{15}=1$  свидетельствует о совпадении опорной плоскости НО и сечения реза ( $l_2(t)=l_1(t)$ ). Переменная  $x_{16}$  имеет значение 1, когда опорная плоскость НО находится в начальной части зоны обработки, т.е.  $l_{н30} \leq l_2 \leq l_{но \max}$ , где  $l_{но \max}$  – допустимый предел,

за который не должна выходить точка начала обработки ( $l_{\text{НО}}$ ), в которой происходит совмещение опорной плоскости НО и сечения реза. Переменная  $x_{19}$  имеет значение 1 только при расположении опорной плоскости НО в исходном положении, когда  $l_2=l_0$  (с допустимой погрешностью).

Диаграммы сигналов  $x_1, \dots, x_{10}$  в течение рабочего цикла представлены на рис.2.4. Здесь же показан возможный вариант диаграмм изменения сигналов  $x_{11}, \dots, x_{19}$ . Сигналы  $x_6, \dots, x_{10}$  формируются в соответствии с уравнениями:

$$x_6 = (x_{11} \& x_{12}) \& x_{20}, \quad (2.1)$$

$$x_7 = (x_{13}) \& x_{21}, \quad (2.2)$$

$$x_8 = (x_{14} \& x_{15} \& x_{16} \& x_{17}) \& x_{22}, \quad (2.3)$$

$$x_9 = (\overline{x_{18}}) \& x_{23}, \quad (2.4)$$

$$x_{10} = (x_{19} \& x_{12}) \& x_{24}. \quad (2.5)$$

В приведенных уравнениях содержатся в качестве логических сомножителей переменные  $x_{20}, \dots, x_{24}$ , не упоминавшиеся в приведенных выше рассуждениях. На данном этапе разработки СУЛП информационный смысл этих логических переменных не определен. Они введены в связи с тем, что на последующих этапах разработки СУЛП могут быть вскрыты нюансы, уточняющие принципы формирования переменных перехода по каким-либо дополнительным условиям без изменения информационного смысла базовых логических сомножителей, заключенных в круглые скобки. Заметим, что это обстоятельство характерно для этапа концептуальной разработки любых объектно-ориентированных систем управления. В нашем случае с помощью переменных  $x_{20}, \dots, x_{24}$  может быть осуществлено, в частности, изменение значений переменных  $x_6, \dots, x_{10}$  с 0 на 1 перед окончанием соответствующего этапа рабочего цикла, если это не может быть достигнуто с помощью упомянутых базовых сомножителей. Введение в уравнения (2.1) – (2.5) сомножителей  $x_{20}, \dots, x_{24}$  позволяет также адаптировать СУЛП к конкретным приложениям. Если для формирования какой-либо из переменных  $x_6, \dots,$

$x_{10}$  достаточно только базового сомножителя, то соответствующая дополнительная переменная (из набора  $x_{20}, \dots, x_{24}$ ) переводится в разряд логических констант со значением 1. На данном этапе разработки СУЛП нами принято  $x_j=1, j=20, \dots, 24$ , чему соответствуют диаграммы, приведенные на рис.2.4.

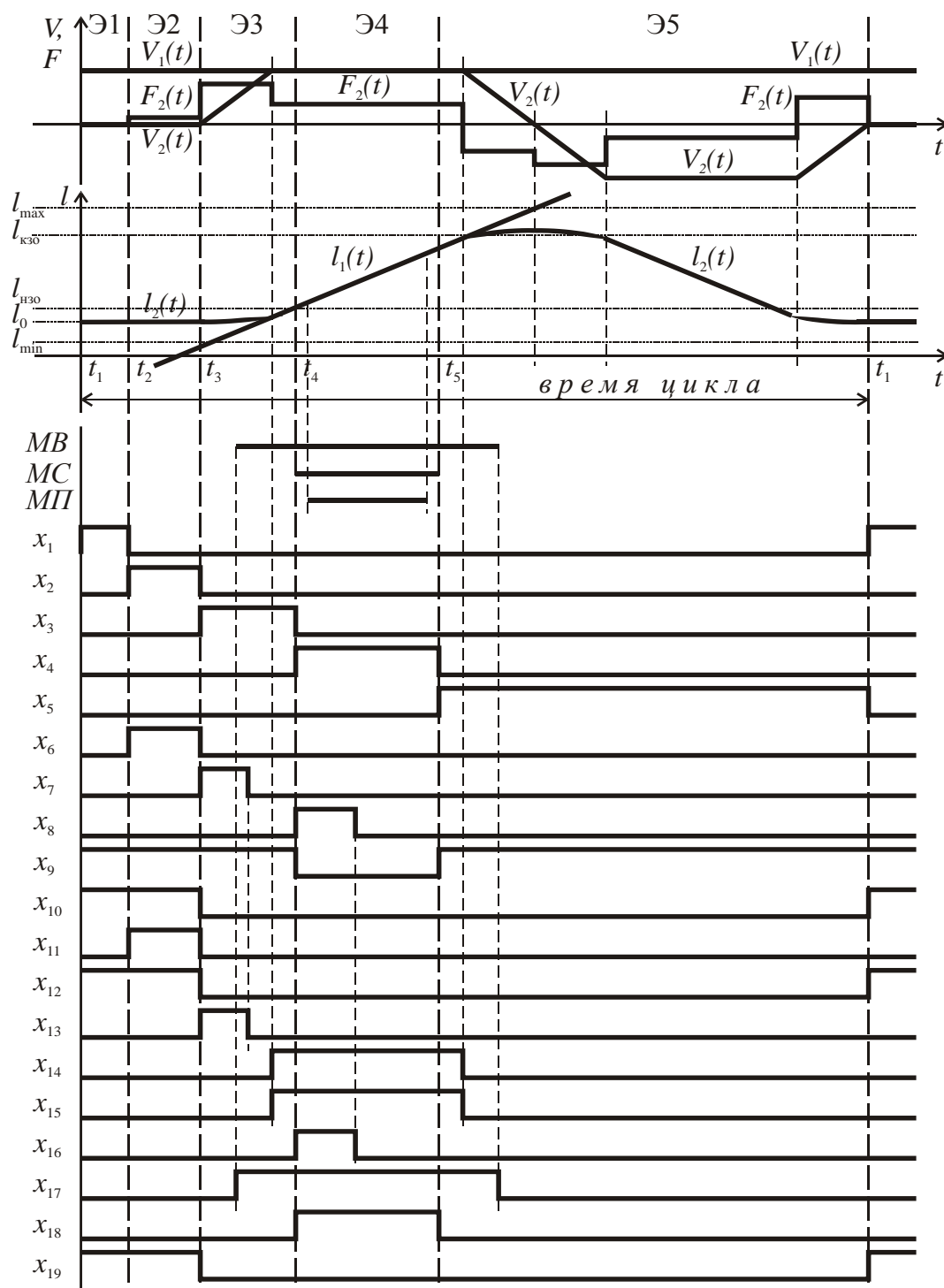


Рисунок 2.4 – Диаграммы сигналов системы управления летучей пилой

Итак, принятый в результате проведенного для эталонной ЛП сигнального анализа набор логических переменных  $x_1, \dots, x_{24}$  позволяет обеспечить полноценный ситуационный анализ рабочего цикла ЛП, адекватный требованиям технологии. Набор этих переменных и предложенные правила логического вывода могут служить концептуальной основой для последующих этапов разработки СУЛП.

### 2.3 Класс "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа как подкласс абстрактного суперкласса "Летучий механизм"

2.3.1 Пользуясь объектной моделью класса "Летучий механизм" (рис.2.1), выделим интересующий нас подкласс "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа (подкласс ЛП1 на рис.2.1). На сокращенной объектной модели (диаграмме классов) класса "Летучий механизм" (рис.2.5) представлены соответствующие классы и связи между ними, показаны существенные атрибуты и методы классов. На данном этапе исследования отсутствует возможность определения в полном объеме атрибутов и методов классов высших уровней, наследуемых разными классами нижнего уровня. Это станет возможным после проведения аналогичных исследований по разработке объектных моделей хотя бы двух-трех других видов летучих механизмов. С учетом рассмотрения модели рис.2.1 (см. п.2.1), опишем модель рис.2.5.

Класс ЛМ является абстрактным, так как он не может быть представлен своими экземплярами (объектами). Его атрибутами являются набор (перечень) ИМ, режим работы ЛМ (автоматический, ручной и т.п.). Методами класса ЛМ являются операции рабочего цикла (в автоматическом режиме), операции по изменению режима работы ЛМ. Указанные методы класса являются абстрактными, так как они подлежат уточнению в классах-потомках. В соответствии с правилами UML имена абстрактных классов и операций записываются курсивом, что отображено на рис.2.5.

В соответствии с определением ЛМ (см. п.1.2), он состоит из НО и размещенных на нем одного или нескольких ИМ, что показано соответствующим

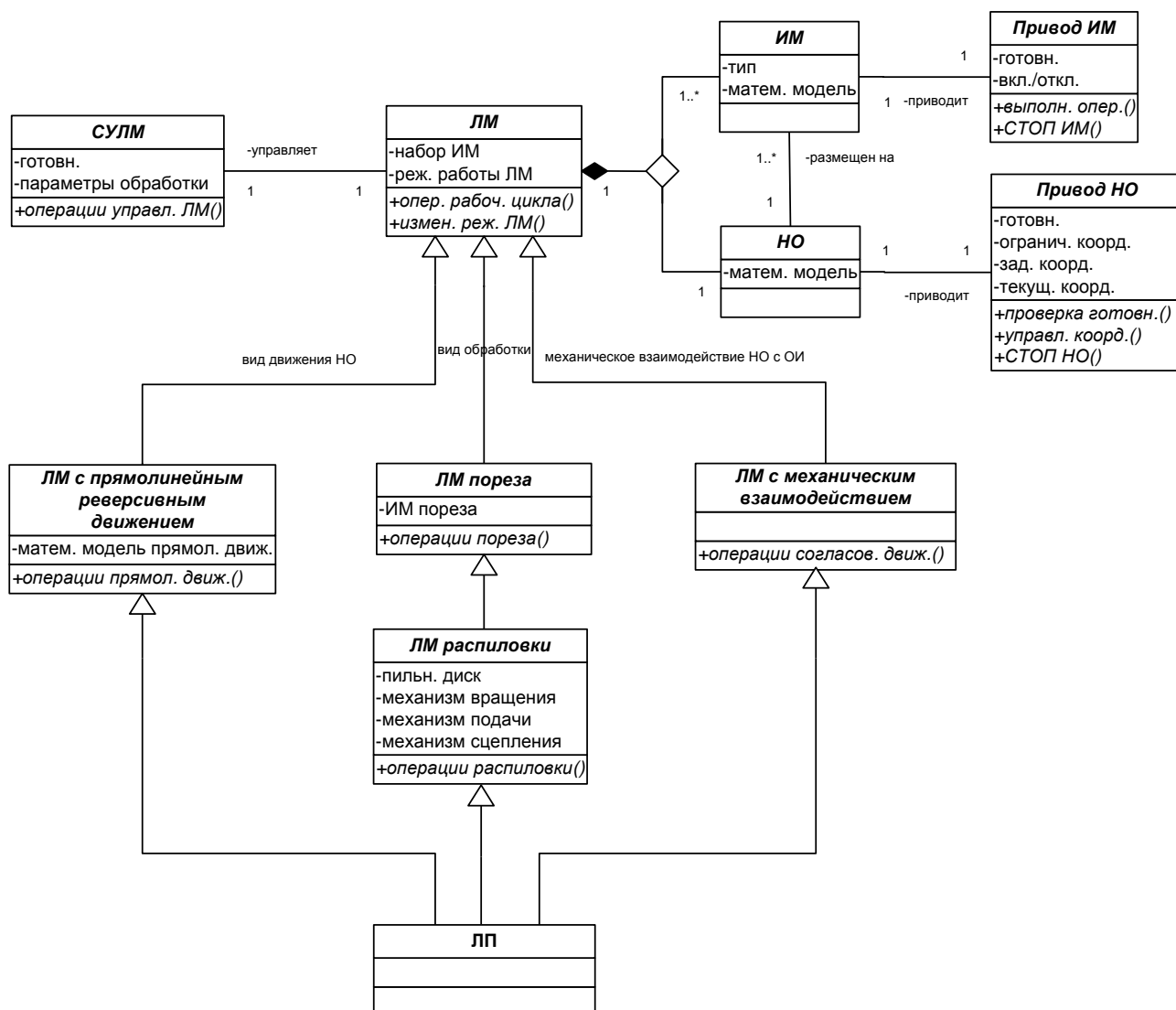


Рисунок 2.5 – Сокращенная объектная модель класса "Летучий механизм"

отношением – композицией. Класс ИМ имеет в качестве атрибутов обозначение конкретного типа ИМ и его математическую модель. Класс НО имеет своим атрибутом математическую модель.

Класс Привод ИМ имеет атрибуты "готовность" (индикация) и "вкл./откл." (индикация включенного состояния). Методами данного класса являются выполнение операций (по обработке ОИ) и операция аварийного останова СТОП ИМ. Как правило, законы движения ИМ и их приводы не отличаются высокой сложностью, чем и объясняется относительно простой набор атрибутов и методов класса Привод ИМ. Однако, в некоторых ЛМ могут применяться ИМ с относительно сложными законами управления (например, приводы подачи пильного

диска с оптимальными законами управления [88-91]). Для рассматриваемых нами моделей, в частности модели рис.2.5, такие случаи будут означать более сложную реализацию соответствующих методов и, возможно, добавление атрибутов. В любом случае методы, реализующие законы управления приводом ИМ любой сложности, инкапсулированы в соответствующих классах, что позволяет, при необходимости, не рассматривать подробно все случаи. Так как предмет нашего исследования связан с системой управления НО, то мы не будем подробно рассматривать приводы ИМ и ограничимся простыми методами.

Класс Привод НО имеет атрибуты "готовность" (индикация), "ограничения координат" (связанные с конструктивными особенностями ЛМ), "заданные координаты" (задания для регуляторов привода), "текущие координаты". К методам данного класса относятся проверка готовности, управление координатами, операция аварийного останова СТОП НО. Указанный набор атрибутов и методов объясняется относительно сложными законами управления приводом НО.

Набор ИМ и математические модели ИМ и НО, а также, соответственно, и операции, выполняемые приводами ИМ и НО, уточняются в классах-потомках в зависимости от вида обработки ОИ и конструкции ЛМ. Таким образом, рассмотренные классы ИМ, НО, Привод ИМ и Привод НО не имеют непосредственных экземпляров, т.е. они абстрактные.

Атрибутами абстрактного класса СУЛМ являются "готовность" (индикация) и набор "параметров обработки" ОИ. В методах класса показаны операции по управлению ЛМ, которые являются абстрактными и уточняются на нижних уровнях наследования в зависимости от технологического назначения конкретного ЛМ. Для исключения загромождения модели информацией, которая не относится к исследуемой предметной области, атрибуты и методы, относящиеся к управлению другими агрегатами технологической линии, здесь не показаны.

Класс "Летучая пила", который порождает соответствующие экземпляры (объекты), образуется путем множественного наследования начиная от суперкласса "Летучий механизм" через подклассы, вносящие соответствующие конструктивно-технологические признаки ЛП. Класс "ЛМ с прямолинейным реверсивным



движением", соответствующий линии наследования по виду движения НО, определяет в атрибутах соответствующих классов математическую модель прямолинейного реверсивного (возвратно-поступательного) движения, а в методах – конкретное описание соответствующих операций прямолинейного реверсивного (возвратно-поступательного) движения. Класс "ЛМ пореза", соответствующий линии наследования по виду обработки, определяет в наборе ИМ механизмы для осуществления пореза и методы, реализующие операции пореза. Из различных видов пореза нас интересует распиловка, чему соответствует линия наследования и соответствующий класс "ЛМ распиловки", определяющий набор ИМ: режущий инструмент – пильный диск, механизм вращения пильного диска, механизм подачи пильного диска, механизм сцепления НО с ОИ. Операции по распиловке ОИ определены в соответствующем методе данного класса. Класс "ЛМ с механическим взаимодействием" соответствует линии наследования по наличию механического взаимодействия НО с ОИ. Он определяет методы, реализующие операции согласования движения НО с ОИ. Описанные классы второго уровня наследования также являются абстрактными, т.к. они не порождают объектов.

Таким образом, экземпляр (объект) класса "Летучая пила" агрегирован экземплярами класса НО и классов ИМ – "Механизм вращения" (МВ), "Механизм подачи" (МП), "Механизм сцепления" (МС). Совокупность атрибутов и методов, представляемых в порождаемых данными классами объектах, наследуется из всех классов-предков.

2.3.2 Объектная модель класса "Летучая пила". Модель рис.2.5 отражает конструктивно-технологическую сущность ЛП как подкласса ЛМ. Она позволяет исследовать отношения между классом ЛП и абстрактным суперклассом ЛМ. Пользуясь моделью рис.2.5 и материалами п.2.2, построим объектную модель класса "Летучая пила", в которой отразим сущности, относящиеся к управлению ЛП.

Объектная модель класса Летучая пила представлена на рис.2.6. В данной модели ЛП агрегирована классами СУЛП (СУ летучей пилы), НО и набором исполнительных механизмов (ИМ): механизмы сцепления (МС), подачи (МП) и

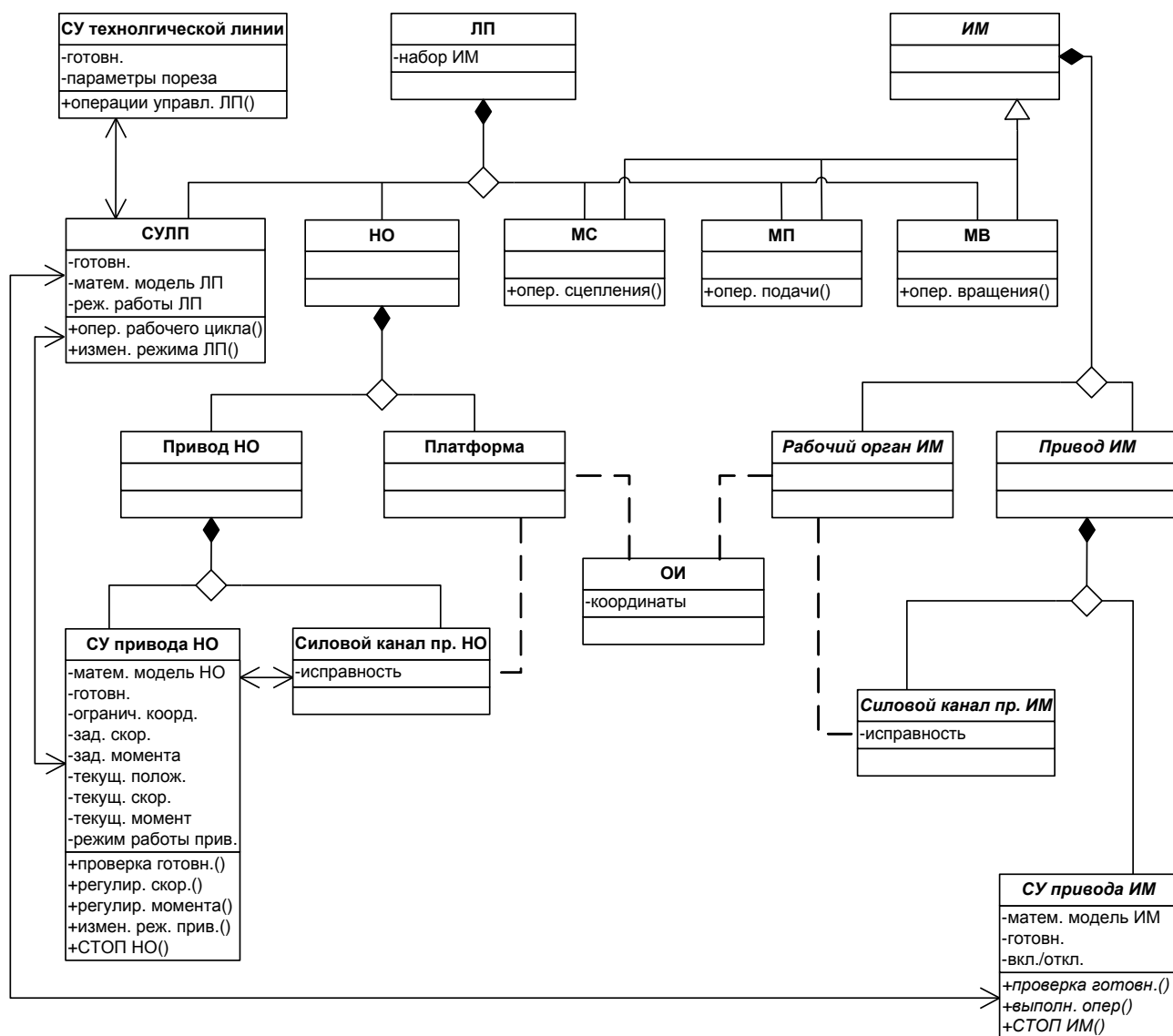


Рисунок 2.6 – Объектная модель класса "Летучая пила"

вращения (МВ) режущего инструмента. Общие признаки ИМ сведены в соответствующий наследуемый ими класс. НО движется возвратно-поступательно и приводится в движение соответствующим регулируемым приводом, с возможностью силового взаимодействия НО с ОИ. Классы НО и ИМ, в свою очередь, агрегированы классами Платформа и Привод НО, Рабочий орган ИМ и Привод ИМ соответственно. Классы Привод НО и Привод ИМ агрегированы классами Силовой канал и СУ привода НО и ИМ соответственно. Первый из них осуществляет преобразование энергии с реализацией заданных движений рабочего органа (входящего в состав механической части силового канала), а второй

(называемый в теории электропривода информационным каналом привода) выполняет функции управления силовым каналом. Данные СУ подчинены СУЛП, которая, в свою очередь, подчинена СУ технологической линии. Между классами различных СУ происходит информационный обмен сигналами разного назначения (обозначение  $\leftrightarrow$ ). Классы Силовой канал, Рабочий орган ИМ, Платформа и ОИ связаны отношениями механического взаимодействия (обозначение – – –). Объект класса СУЛП осуществляет свои функции путем наблюдения за состояниями ОИ, ИМ и НО, а также за командами систем управления верхнего уровня, и формирования управляющих воздействий на приводы ИМ и НО. Таким образом, в данной модели отражено иерархическое построение ЛП и входящих в ее состав ИМ, и соответствующее ему иерархическое соподчинение СУ. В соответствии с проведенной структуризацией, в модели разделены материально-энергетические и информационные отношения.

Класс СУЛП имеет атрибуты "готовность" (индикация готовности ЛП для СУ технологической линии), "режим работы ЛП", "математическая модель ЛП". Последняя включает в себе формализованные сведения о ЛП, в частности, о ее рабочем цикле. Методами данного класса являются операции по исполнению рабочего цикла ЛП (координация работы ИМ), операции по изменению режима работы ЛП.

Определение атрибутов класса СУ привода НО связано с разграничением функций управления между СУЛП и приводом НО. На данном этапе разработки, с учетом результатов анализа рабочего цикла ЛП и предложений по организации управления приводом НО (п.2.2), принимаем структуру управления, аналогичную принятой в станках с числовым программным управлением. При такой организации управления приводом НО все функции формирования задания скорости и момента переносятся на внешний уровень, т.е. в СУЛП. Последняя, в свою очередь, формирует эти задания в соответствии с особенностями конкретных этапов рабочего цикла ЛП.

Класс СУ привода НО имеет одним из атрибутов готовность к работе. Состояние готовности привода НО, т.е. способности выполнять все требуемые

функции, распознается по значению соответствующего логического сигнала, который формируется системой диагностики этого объекта. Особенности технологии требуют управления моментом, развиваемым приводом НО. Как один из вариантов решения данной проблемы в п.2.2 предложено двухрежимное управление приводом НО, заключающееся в переводе привода в режим регулирования момента или в режим регулирования скорости на определенных этапах рабочего цикла. Соответственно, среди атрибутов класса Привод НО должен быть такой, который индицирует текущий режим работы привода. Также имеются атрибуты, определяющие заданные скорость и момент, и атрибуты, определяющие отработанные приводом текущие положение, скорость и момент. Для эффективного формирования управляющих сигналов в течение рабочего цикла система управления верхнего уровня (СУЛП) должна получать информацию о свойствах привода НО. В качестве такой информации служит математическая модель привода. Параметры модели в простейшем случае могут быть определены заранее и считаться неизменными. В более сложном случае это могут быть параметры, постоянно идентифицируемые внутренней системой управления приводом НО и выдаваемые в СУЛП. Естественно при этом ожидать увеличения точности работы ЛП, соответственно и необходимость в разных методах будет зависеть от требований к конкретному объекту класса ЛП. Следует также заметить, что при изменении режима работы привода будет меняться и его математическая модель. Другими важными атрибутами СУ привода НО являются ограничения различных координат, фигурирующих в математической модели. Эти ограничения могут зависеть как от режима работы привода, так и от исполняемого этапа рабочего цикла.

Класс СУ привода НО имеет методы, позволяющие выдать в СУЛП сигнал готовности привода, отработать задание по скорости или моменту, перевести привод в режим регулирования скорости или момента. Следует отметить, что реализация указанных методов полностью относится к компетенции разработчиков привода. Для нас важна способность формирования им требуемых динамических и статических характеристик с целью изменения состояния, т.е. атрибутов объекта

класса СУ привода НО по командам из СУЛП. Таким образом, в терминах ООП (п.1.1.4) осуществляется абстрагирование, которое позволяет определить интерфейс класса, отражающий внешние проявления его объектов, их взаимодействие с объектами других классов, и ограничение доступа к внутренней реализации методов класса, скрывающее механизмы достижения желаемого поведения объекта и все детали, не имеющие отношения к процессу взаимодействия объектов разных классов. С другой стороны, мы физически разбиваем систему на модули, выделяя привод НО (СУ привода НО) в отдельный блок и поручая его разработку компетентным специалистам. В данной отрасли такое положение дел давно устоялось и основная проблема, стоящая перед нами – обоснованное разделение функций между СУ привода НО и СУЛП.

Для принятой нами концепции, при выполнении условия формирования приводом требуемых характеристик, его тип не имеет существенного значения. Однако, в дальнейшем при рассмотрении объектов класса Привод НО мы будем ориентироваться на электропривод, поскольку в настоящее время он характеризуется наиболее выгодным сочетанием таких свойств, как наблюдаемость, управляемость, энергоемкость, экологическая чистота, а также простота способа реализации двухрежимного управления.

Класс ИМ и агрегирующие его классы Рабочий орган ИМ, Привод ИМ, Силовой канал привода ИМ, СУ привода ИМ являются абстрактными. Классами, порождающими объекты, являются классы-потомки класса ИМ – классы МС и МВ. В дополнение к наследуемым атрибутам и методам класса ИМ они имеют свои методы, реализующие конкретные операции по порезу ОИ.

2.3.3 Объектная модель класса "Система управления летучей пилой".  
Функциональное назначение СУЛП (рис.2.6) заключается в управлении приводами НО и ИМ. Из модели рис.2.6 выделим классы, имеющие непосредственное отношение к СУЛП. Объектная модель СУЛП показана на рис.2.7. Эта схема в точности отражает физическое агрегирование СУЛП тремя структурными элементами: Управляющим устройством, Информационной системой и Пультом

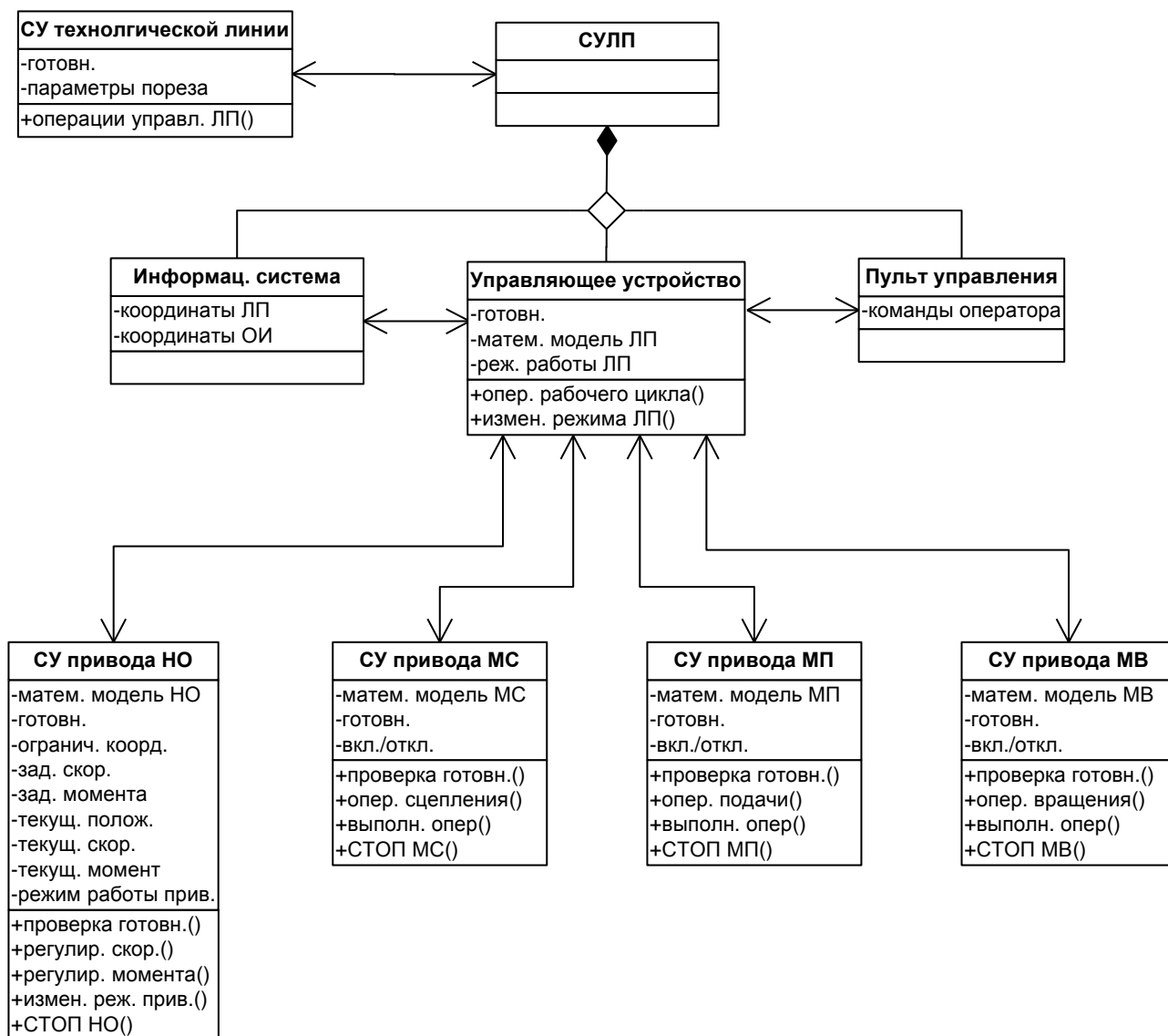


Рисунок 2.7 – Объектная модель класса "Система управления летучей пилы"

управления. Обращая внимание на статью [92], можем заметить, что агрегируемые в классе СУЛП информационная система, управляющее устройство и пульт управления в совокупности реализуют верхний уровень управления приводами НО и ИМ, а последние сами, являясь автоматизированными системами, реализуют нижний уровень управления соответствующими механизмами.

Управляющее устройство является центральным звеном, реализующим алгоритм управления мерным порезом. Класс Информационная система абстрагирует устройства (датчики), предоставляющие информацию о текущем состоянии ЛП (ОИ, Платформы, рабочих органов остальных ИМ). Посредством

класса Пульт управления в модели представлена взаимосвязь СУЛП с человеком-оператором. Классы СУ технологической линии и СУЛП, Управляющее устройство и Информационная система, Пульт управления, СУ приводов НО и рабочих органов других ИМ связаны отношениями информационного обмена. СУЛП осуществляет координационное управление всеми механизмами ЛП путем выдачи соответствующей командной информации в СУ их приводов.

Использование объектно-ориентированной методологии дало возможность построить объектную модель системы управления электроприводом НО ЛП, т.е. выполнить, по существу, этап концептуального проектирования. Нетрудно заметить, что объектная модель рис.2.7 легко может быть преобразована в структурную схему системы управления и служит достаточным основанием для разработки функциональной схемы. При этом не происходит "потери" классовообразующих признаков, наследуемых от классов высших уровней иерархии. Последнее особенно важно для проектной практики, в отношении затрат на проектирование систем смежных классов. Изложенная процедура построения иерархически подчиненных объектных моделей может найти применение для решения задач концептуального проектирования систем управления другими классами технологических машин и процессов.

## 2.4 Выводы

В данном разделе рассмотрены вопросы построения объектных моделей ключевых абстракций класса летучих механизмов и классов предметной области летучих пил с возвратно-поступательным движением несущих органов. По итогам проведенного исследования можем сделать следующие **выводы**.

2.4.1 Построена объектная модель класса "Летучий механизм". Она позволяет отразить всю совокупность наиболее существенных признаков и отношений, структурные аспекты суперкласса ЛМ, дает возможность установить состав и характер конструктивно-технологических признаков, передаваемых путем множественного наследования экземплярам классов нижнего уровня, которым

соответствуют конкретные ЛМ (ЛП, ЛН и т.п.). Использование линий наследования с целью обобщения и распространения удачных решений позволяет обеспечить общность элементов разработок для разных подклассов ЛМ. Указанное обстоятельство обеспечивает снижение ресурсоемкости летучих механизмов, в частности, их систем управления, на этапе проектирования.

2.4.2 Составлена технологическая схема классообразующей летучей пилы с возвратно-поступательным движением несущего органа, описан ее рабочий цикл, состоящий из пяти последовательно исполняемых этапов. Произведены ситуационный анализ рабочего цикла летучей пилы и сигнальный анализ в системе управления летучей пилы. Это позволило сформировать набор логических сигналов (переменных), необходимых для контроля текущего состояния ЛП в течение рабочего цикла, и построить правила логического вывода для получения командных сигналов. Полученный набор логических переменных и предложенные правила логического вывода могут служить концептуальной основой для последующих этапов разработки СУЛП.

2.4.3 Представлена объектная модель класса "Летучий механизм", имеющая в своем составе классы, относящиеся к подклассу "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа. В данной модели отражены связи между классами, существенные атрибуты и методы классов. Данная модель является фрагментом полной модели класса ЛМ, для классов которой в рамках данного исследования отсутствует возможность определения в полном объеме атрибутов и методов. Представленная модель отражает конструктивно-технологическую сущность ЛП как подкласса ЛМ, определяет состав ИМ и их характеристики, позволяет исследовать отношения между классом ЛП и абстрактным суперклассом ЛМ. Последнее обстоятельство придает ценность данной модели с точки зрения ресурсосбережения на этапе проектирования в рамках класса ЛМ. Данная модель служит основой при построении объектной модели класса "Летучая пила".

2.4.4 Построена объектная модель класса "Летучая пила", в которой в виде соответствующих классов и отношений между ними отражены сущности,



относящиеся к управлению ЛП. Отличительной особенностью данной модели является введение дополнительных связей между классами, отражающих информационные и энергосиловые взаимодействия, что позволило разделить соответствующие отношения. В модели отражено иерархическое построение ЛП и входящих в ее состав ИМ, и соответствующее ему иерархическое соподчинение СУ. Данная модель служит основой при построении объектной модели класса "Система управления летучей пилой".

2.4.5 Построена объектная модель класса "Система управления летучей пилой", в которой отражены классы, имеющие непосредственное отношение к СУЛП. Данная модель может быть легко преобразована в структурную схему СУ и служит достаточным основанием для разработки функциональной схемы. Непосредственная связь указанных структурной и функциональной схем с объектными моделями обеспечивает ресурсосбережение при проектировании соответствующих систем.

2.4.6 Поставленная задача 1 исследования (см. п.1.4) выполнена с соблюдением требований к результатам ее решения. Сопутствующим результатом является предложенная технологическая схема классообразующей летучей пилой с возвратно-поступательным движением несущего органа.

Перечисленные в пп.2.4.1-2.4.5 результаты характеризуют научную новизну и практическую ценность проведенных в данном разделе исследований. Они опубликованы в научных статьях [86, 87, 93].

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ "ВЕНТИЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ" В РЕЖИМЕ КВАЗИЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

#### 3.1 Предпосылки построения и структура модели асинхронного двигателя, питаемого от регулятора напряжения

Электротехнический комплекс, представляющий объект исследования, состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и тиристорного регулятора напряжения, включенного в цепь его статора. Исследование процессов в этом объекте в режиме квазичастотного электропитания асинхронного двигателя (АД) рационально выполнить на основе математического и компьютерного моделирования объекта исследования.

Аналитическое моделирование асинхронного двигателя базируется на исследованиях Ковача и Раца и предполагает векторно-матричную запись уравнений модели АД [94]. Расчетная схема замещения одной фазы АД представлена на рис. 3.1. Построение модели предполагает ввод алгебраических векторов-столбцов, составленных из мгновенных значений напряжений, токов и потокосцеплений фазных обмоток статора и ротора:

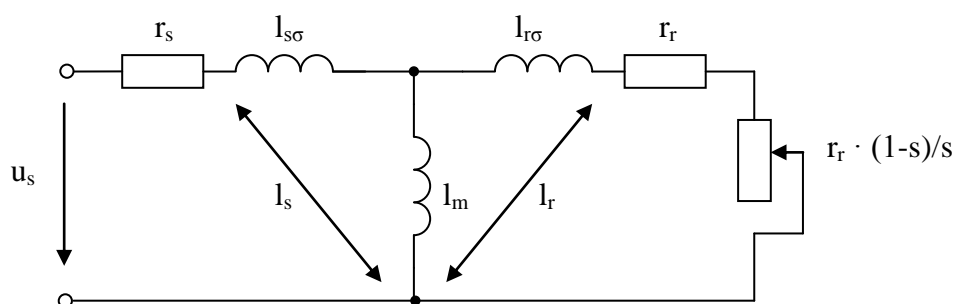


Рисунок 3.1 – Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_s^{Fs} &= [u_A \quad u_B \quad u_C]^T \\
\mathbf{U}_r^{Fr} &= [u_a \quad u_b \quad u_c]^T = [0 \quad 0 \quad 0]^T \\
\mathbf{I}_s^{Fs} &= [i_A \quad i_B \quad i_C]^T \\
\mathbf{I}_r^{Fr} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\
\mathbf{\Psi}_s^{Fs} &= [\psi_A \quad \psi_B \quad \psi_C]^T \\
\mathbf{\Psi}_r^{Fr} &= [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^T
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Приведенные выше векторы статорных переменных состояния, представленные в базисе  $F_s$ , неподвижном относительно статора (рис. 3.2, а), а векторы роторных - в базисе  $F_r$ , фиксированном относительно ротора (рис. 3.2, б). Тогда уравнение равновесия ЭДС на обмотках статора и ротора в соответствии с вторым законом Кирхгофа в матричной форме имеют вид [94]:

для статора –

$$\mathbf{U}_s^{Fs} = r_s \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + p \cdot \mathbf{\Psi}_s^{Fs}; \tag{3.2}$$

для ротора –

$$\mathbf{U}_r^{Fr} = r_r \cdot \mathbf{I}_r^{Fr} + p \cdot \mathbf{\Psi}_r^{Fr}, \tag{3.3}$$

где  $r_s$ ,  $r_r$  - активные сопротивления соответственно обмоток статора и ротора, Ом;

$p = d/dt$  - оператор дифференцирования переменных по времени.

Взаимосвязь потокосцеплений обмоток с протекающими по ним токами определяется согласно [94, 95]. В частности, для фазы А статора:

$$\psi_A = L_s i_A + M_s i_B + M_s i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c \tag{3.3}$$

где  $L_s$ , - собственная индуктивность обмоток статора;

$M_s$  - взаимная индуктивность между обмотками статора;

$M_{Aa}, M_{Ab}, M_{Ac}$  - взаимные индуктивности между фазной обмоткой статора и обмотками соответствующих фаз ротора.

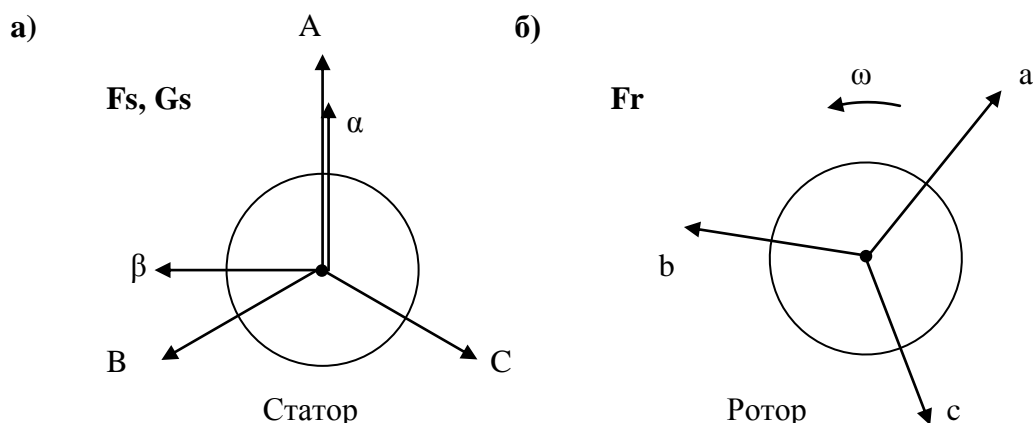


Рисунок 3.2 – Координаты для представления векторов переменных состояния асинхронного двигателя

Потокосцепления для других обмоток статора и ротора записываются аналогично. С целью исключения периодических коэффициентов переменные состояния АД приводятся к единой системе координат  $F_s$ , неподвижной относительно статора (рис. 3.2, а). Соответствующие уравнения относительно ЭДС и потокосцеплений АД в базисе  $F_s$  будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_s^{Fs} &= \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + p \cdot \Psi_s^{Fs} \\ \mathbf{U}_r^{Fs} &= \mathbf{r}_r \cdot \mathbf{I}_r^{Fs} + p \cdot \Psi_r^{Fs} - z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_3 \cdot \Psi_r^{Fs} \\ \Psi_s^{Fs} &= l_s \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + l_m \cdot \mathbf{I}_r^{Fs} \\ \Psi_r^{Fs} &= l_m \cdot \mathbf{I}_s^{Fs} + l_r \cdot \mathbf{I}_r^{Fs} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где  $z_p$  - число пар полюсов обмотки статора;

$\omega$  - угловая скорость ротора АД, рад/с;

$\mathbf{B}_3$  - матрица ортогонального поворота;

$l_s, l_r$  - полная индуктивность, соответственно, обмоток статора и ротора;

$l_m$  - взаимная индуктивность между статорными и роторными обмотками.

Уравнение электромеханического преобразования энергии в АД [95, 96]:

$$M = \frac{3 \cdot z_p \cdot l_m \cdot \text{mod}(\Psi_r \times \Psi_s)}{2 \cdot k}, \quad (3.5)$$

где  $M$  - электромагнитный момент АД;  $k = l_s l_r - l_m^2$ .

Таким образом, система уравнений модели АД, пригодная для компьютерного моделирования, в системе координат, жестко связанной со статором, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= r_s \cdot I_s + p \cdot \Psi_s \\ U_r &= r_r \cdot I_r + p \cdot \Psi_r - z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r \\ \Psi_s &= l_s \cdot I_s + l_m \cdot I_r \\ \Psi_r &= l_m \cdot I_s + l_r \cdot I_r \\ M &= \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} \\ p \cdot \omega &= (M - M_c) / J_\pi \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где  $\mathbf{B}_2$  - матрица ортогонального поворота двухмерного вектора [94]:

$$\mathbf{B}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

После подстановки выражения электромагнитного момента в уравнения механического равновесия и преобразования полученных уравнений к виду, удобному для решения численными методами, получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} p \cdot \Psi_s &= U_s - \frac{r_s \cdot l_r}{k} \Psi_s + \frac{r_s \cdot l_m}{k} \Psi_r \\ p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r - \frac{l_s \cdot r_r}{k} \Psi_r + \frac{l_m \cdot r_r}{k} \Psi_s \\ p \cdot \omega &= \left( \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_\pi \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Выражения для нахождения токов статора и ротора по значениям потокосцеплений - следующие:

$$\mathbf{I}_s = \frac{l_r}{k} \cdot \Psi_s - \frac{l_m}{k} \cdot \Psi_r, \quad (3.8)$$

$$\mathbf{I}_r = \frac{l_s}{k} \cdot \Psi_r - \frac{l_m}{k} \cdot \Psi_s. \quad (3.9)$$

При рассмотрении процесса отключения АД в предположении, что разъединение цепи электропитания всех фаз статора происходит одновременно, принимаем во внимание, что в этом случае существенное влияние на процессы оказывает потокосцепление ротора после отключения АД [97]:

$$\Psi_{r1} = \Psi_{r0} - r_r \cdot \int_0^{t_1} \mathbf{I}_r dt, \quad (3.10)$$

где  $\Psi_{r0}$ ,  $\Psi_{r1}$  - векторы потокосцепления ротора до и после коммутации цепи статора;

$t_1$  - продолжительность коммутации цепи статора.

Из допущения, что отключение АД происходит мгновенно, а величина активного сопротивления ротора – незначительна, следует, что вторым членом правой части (3.10) можно пренебречь:  $\Psi_{r1} = \Psi_{r0}$ ,

По окончании выключения ток статора равняется нулю, а потокосцепления описываются системой [94]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{s1} &= l_m \cdot \mathbf{I}_{r1} \\ \Psi_{r1} &= l_r \cdot \mathbf{I}_{r1} \end{aligned} \right\}. \quad (3.11)$$

Таким образом,  $\Psi_{s1} = k_r \Psi_{r0} = k_r \Psi_{r1}$ , где  $k_r$  - коэффициент связи ротора:  $k_r = \frac{l_m}{l_r}$ .

Система уравнений относительно состояния асинхронного двигателя после его отключения от сети, адаптированная для компьютерного моделирования процессов, имеет вид [94, 95]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_s &= k_r \cdot \Psi_r \\ p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r - \frac{r_r}{l_r} \Psi_r \\ p \cdot \omega &= \left( \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_n \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Особенностью электропитания АД от ТРН в режиме квазичастотного управления является то, что силовая цепь АД вследствие переключения групп тиристоров периодически меняет структуру, что отражается на структуре систем уравнений [98]. Фактически уместно составить четыре разных структурных схемы для моделирования четырех разных состояний режима электропитания работы асинхронной машины, моделирующие АЭП в трехфазном и двухфазных режимах работы (при отключении одной из фаз статора). Наличие четырех разных структурных схем существенно увеличивает размеры модели, кроме этого необходимо предусмотреть соответствующие переключения между отдельными моделями с сохранением при этом предыдущих начальных условий, что затруднительно. Поэтому целесообразно составить одну структурную схему, предусмотрев в ней необходимые изменения и переключения между блоками.

Общая структурная схема компьютерной модели асинхронного электропривода с ТРН представлена на рис.3.3. Основными составными частями схемы являются: блок модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (AD), блок модели тиристорного преобразователя (thyristor) и блок управления тиристорным преобразователем (control system). Вспомогательные блоки структурной схемы модели – это подсистемы, предназначенные:

- для организации вывода данных "SubSystem1";

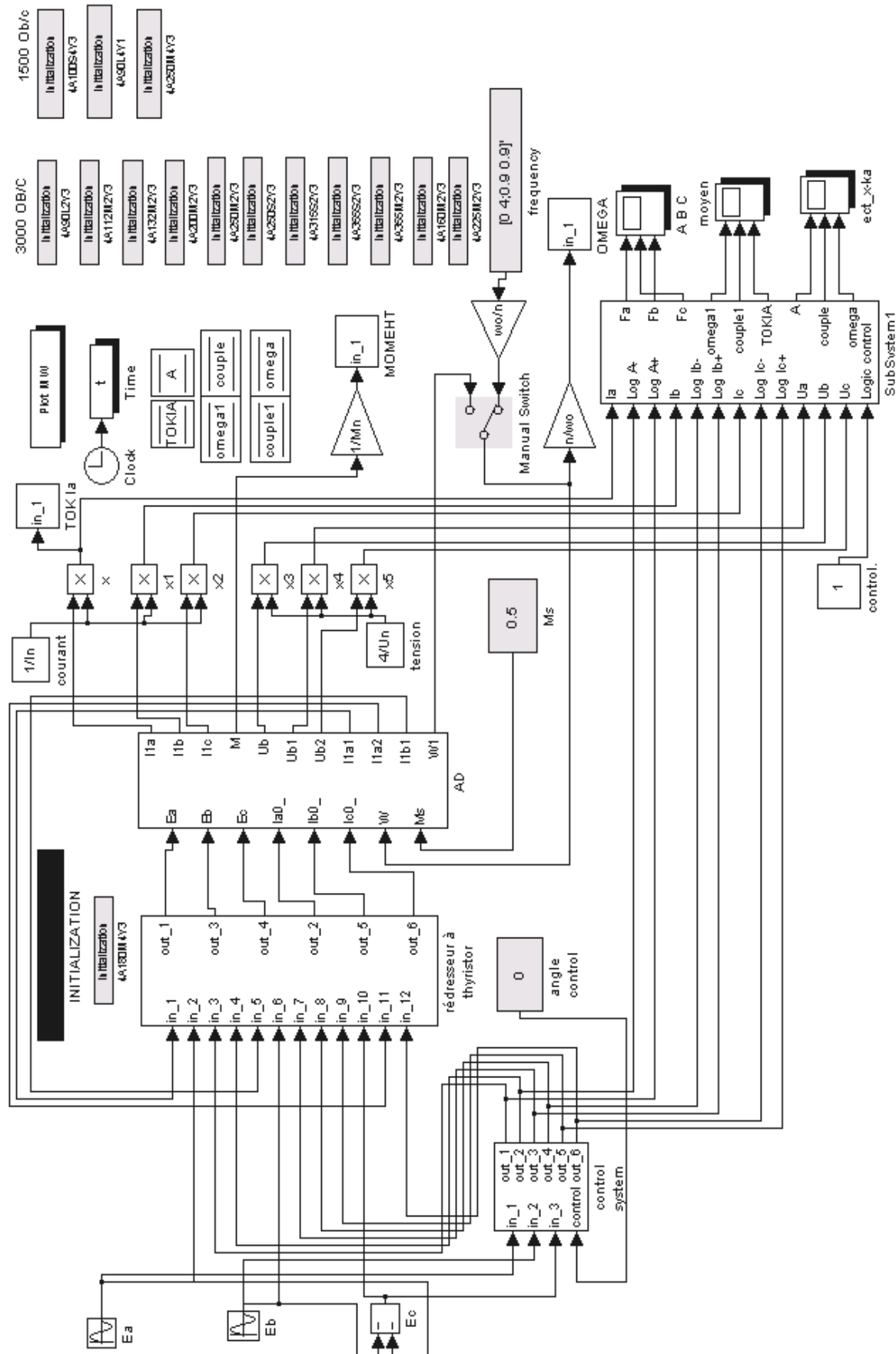


Рисунок 3.3 – Общая структурная схема модели асинхронного электропривода с ТРН



– для расчета среднего (за заданный промежуток времени) значения момента, развиваемого электродвигателем "МОМЕНТ";

– для расчета среднего (за заданный промежуток времени) значения частоты вращения вала электродвигателя "ОМЕГА",

– для расчета действующего значения тока статора электродвигателя "ТОК Ia".

Кроме этого, в структуру модели привода необходимо ввести:

– блок задания статического момента нагрузки на вале электродвигателя (Ms);

– блок задания величины угла управления тиристорным регулятором напряжения (angle control).

Следует предусмотреть также возможность задания частоты вращения вала электродвигателя (блок "frequency").

Структура компьютерной модели АД, питаемого от ТРН, применительно к пакету MATLAB, может быть составлена на основании использования приведенных выше матричных уравнений, для чего раскроем их строки:

$$\begin{aligned}
 & (R_s + pL_{s\sigma}) \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + pM \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{3}{2}M & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}M \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} = \\
 & = \begin{vmatrix} R_s i_A^S & pL_{s\sigma} i_A^S \\ R_s i_B^S & pL_{s\sigma} i_B^S \\ R_s i_C^S & pL_{s\sigma} i_C^S \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S - 0.5 pMi_C^S \\ pMi_B^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_C^S \\ pMi_C^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S \end{vmatrix} = \\
 & = \begin{vmatrix} R_s i_A^S + pL_{s\sigma} i_A^S + pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S - 0.5 pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{ra} \\ R_s i_B^S + pL_{s\sigma} i_B^S + pMi_B^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{rb} \\ R_s i_C^S + pL_{s\sigma} i_C^S + pMi_C^S - 0.5 pMi_A^S - 0.5 pMi_B^S + \frac{3}{2} pMi'_{rc} \end{vmatrix} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

$$pM \times \begin{vmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & -1/2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + \omega_r M \times \begin{vmatrix} i_A^S \\ i_B^S \\ i_C^S \end{vmatrix} + (R_r + pL_r) \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} + \frac{2}{3} \omega_r L_r \times$$

$$\times \begin{vmatrix} 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}/2 & 0 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} pMi_A^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_C^S \\ pMi_B^S - 0.5pMi_A^S - 0.5pMi_C^S \\ pMi_C^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_A^S \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_C^S \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_C^S \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_B^S \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_r i'_{ra} + pL_r i'_{ra} \\ R_r i'_{rb} + pL_r i'_{rb} \\ R_r i'_{rc} + pL_r i'_{rc} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} pMi_A^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_B^S - \\ pMi_B^S - 0.5pMi_A^S - 0.5pMi_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S + \\ pMi_C^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S - \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_C^S + R_r i'_{ra} + pL_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_C^S + R_r i'_{rb} + pL_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_B^S + R_r i'_{rc} + pL_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{vmatrix} . \quad (3.14)$$

Таким образом, получаем систему уравнений, описывающую асинхронный электродвигатель через фазные величины токов и напряжений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A^S = R_s i_A^S + p L_{\sigma s} i_A^S + p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{ra} \\ u_B^S = R_s i_B^S + p L_{\sigma s} i_B^S + p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{rb} \\ u_C^S = R_s i_C^S + p L_{\sigma s} i_C^S + p M i_C^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S + \frac{3}{2} p M i'_{rc} \\ 0 = p M i_A^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\ \quad + R_r i'_{ra} + p L_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S - 0.5 p M i_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\ \quad + R_r i'_{rb} + p L_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = p M i_C^S - 0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \\ \quad + R_r i'_{rc} + p L_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Полученная система уравнений справедлива только для трехфазного режима работы АД. При работе от ТРН происходит неоднократное отключение различных фаз статора от сети и, следовательно, чередование трехфазного, двухфазного режимов работы АД и бестоковых пауз. При изменении структуры силовой цепи меняется и система уравнений, описывающих двигатель. Поэтому, необходимо получить уравнения для двухфазных режимов работы АД при отключении каждой из фаз статора, и предусмотреть соответствующие переключения в модели.

С этой целью приемлемо в модели двигателя предусмотреть не статорные напряжения, а фазные ЭДС ( $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$ ) питающей сети. С целью имитации состояний тиристорных ключей регулятора напряжения в модели предусмотрены ключи к1, к2, к3. В модели так же предусмотрены:  $e_r$  – ЭДС вращения электродвигателя (условно они обозначены одинаково во всех трех фазах);  $Z_n$  – полное сопротивление фазы

электродвигателя. Согласно законам Кирхгофа для данной схемы при трехфазном режиме работы можем записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} i_a + i_b + i_c = 0, \\ u_A^S - u_B^S = E_a - E_b, \\ u_B^S - u_C^S = E_b - E_c. \end{cases} \quad (3.16)$$

Перепишем последние два уравнения (3.16) в несколько ином виде, получим:

$$\begin{aligned} 0 &= E_a - E_b - u_A^S + u_B^S \\ 0 &= E_b - E_c - u_B^S + u_C^S. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Подставив в (3.17) напряжения из (3.15), получим для симметричного режима окончательные выражения, положенные в основу модели в среде MATLAB:

$$\begin{aligned} \frac{(M + L_{s\sigma})pi_C^S}{R_s} &= \frac{1}{R_s} \left( 0.5 pMi_A^S + 0.5 pMi_B^S - \frac{3}{2} pMi_{rc}' - R_s i_C^S + E_c - E_b - \right. \\ &\left. - \left( -0.5 pMi_A^S + R_s i_B^S + ((M + L_{s\sigma})pi_B^S) - 0.5 pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi_{rb}' \right) \right), \end{aligned} \quad (3.18)$$

где  $i_B^S = -(i_A^S + i_C^S)$ .

Для двухфазного режима работы следует рассмотреть три варианта включения АД - при отсутствии тока, соответственно, в фазах "А"; "В"; "С".

Соответствующие схемы замещения изображены на рис.3.4. Уравнения (3.16) принимают вид :

при отключении фазы С

$$E_a - E_b = u_A^S - u_B^S,$$

при отключении фазы В

$$E_a - E_c = u_A^S - u_C^S,$$

при отключении фазы А

$$E_b - E_c = u_A^S - u_C^S.$$

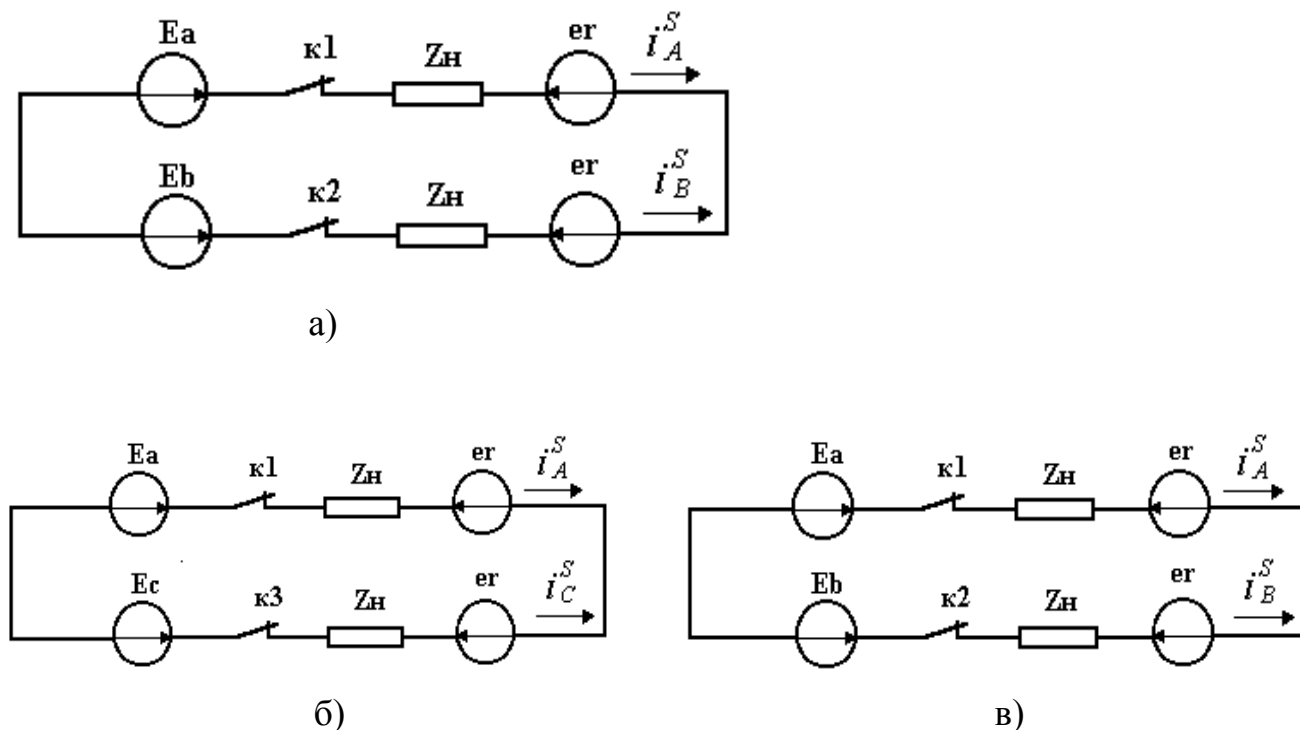


Рисунок 3.4 – Схемы замещения АД в несимметричном режиме работы

а) – отключена фаза С, б) – отключена фаза В, в) – отключена фаза А

Для получения уравнений АД в двухфазном режиме работы из системы уравнений (3.15) следует исключить те слагаемые, в которых присутствуют токи отключенных фаз. После такого исключения получим для каждой схемы включения АД следующие системы уравнений:

1) для схемы рис. 3.4,а

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A^S = R_s i_A^S + pL_{\sigma s} i_A^S + pMi_A^S - 0.5pMi_B^S - 0.5pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{ra} \\ u_B^S = R_s i_B^S + pL_{\sigma s} i_B^S + pMi_B^S - 0.5pMi_A^S - 0.5pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{rb} \\ u_C^S = 0 \\ 0 = pMi_A^S - 0.5pMi_B^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_B^S + \\ \quad + R_r i'_{ra} + pL_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = pMi_B^S - 0.5pMi_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S + \\ \quad + R_r i'_{rb} + pL_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = -0.5pMi_B^S - 0.5pMi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_B^S + \\ \quad + R_r i'_{rc} + pL_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{array} \right. , \quad (3.19)$$

2) для схемы рис. 3.4,б

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A^S = R_s i_A^S + pL_{\sigma s} i_A^S + pMi_A^S - 0.5pMi_C^S + \frac{3}{2} pMi'_{ra} \\ u_B^S = 0 \\ u_C^S = R_s i_C^S + pL_{\sigma s} i_C^S + pMi_C^S - 0.5pMi_A^S + \frac{3}{2} pMi'_{rc} \\ 0 = pMi_A^S - 0.5pMi_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_C^S + \\ \quad + R_r i'_{ra} + pL_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = -0.5pMi_A^S - 0.5pMi_C^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_C^S + \\ \quad + R_r i'_{rb} + pL_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = pMi_C^S - 0.5pMi_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r Mi_A^S + R_r i'_{rc} + pL_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{array} \right. \quad (3.20)$$

3) для рис.3.4.с.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A^S = 0 \\ u_B^S = R_s i_B^S + p L_{\sigma s} i_B^S + p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{3}{2} p M i'_{rb} \\ u_C^S = R_s i_C^S + p L_{\sigma s} i_C^S + p M i_C^S - 0.5 p M i_B^S + \frac{3}{2} p M i'_{rc} \\ 0 = -0.5 p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \\ \quad + R_r i'_{ra} + p L_r i'_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = p M i_B^S - 0.5 p M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + R_r i'_{rb} + p L_r i'_{rb} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ 0 = p M i_C^S - 0.5 p M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + R_r i'_{rc} + p L_r i'_{rc} + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{array} \right. \quad (3.21)$$

Аналитические выражения для вычисления потребляемой мощности и электромагнитного момента реальной трехфазной машины могут быть получены из уравнений (3.15) при записи их в виде матричного уравнения

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{X}_p \mathbf{i} + \mathbf{G}_p \omega \mathbf{i} \quad , \quad (3.22)$$

где  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_A^S & u_B^S & u_C^S & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,

$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_A^S & i_B^S & i_C^S & i'_{ra} & i'_{rb} & i'_{rc} \end{bmatrix}$ ,

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

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} L_s & -0.5M & -0.5M & \frac{3}{2}M & 0 & 0 \\ -0.5M & L_s & -0.5M & 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ -0.5M & -0.5M & L_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M \\ M & -0.5M & -0.5M & L_r & 0 & 0 \\ -0.5M & M & -0.5M & 0 & L_r & 0 \\ -0.5M & -0.5M & M & 0 & 0 & L_r \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}M & -\frac{\sqrt{3}}{2}M & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}L_r & -\frac{\sqrt{3}}{3}L_r \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}M & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}M & -\frac{\sqrt{3}}{3}L_r & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}L_r \\ \frac{\sqrt{3}}{2}M & -\frac{\sqrt{3}}{2}M & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}L_r & -\frac{\sqrt{3}}{3}L_r & 0 \end{pmatrix}.$$

Умножим выражение (3.22) на  $\mathbf{i}_t$ , в результате получим

$$\mathbf{i}_t \times \mathbf{u} = \mathbf{i}_t \times \mathbf{Ri} + \mathbf{i}_t \times \mathbf{Xpi} + \mathbf{i}_t \times \mathbf{Gp}\omega_r \mathbf{i} \quad (3.23)$$

Левая часть выражения (3.23) представляет собой полную мгновенную мощность трехфазной машины. Первый член правой части представляет собой суммарную мощность потерь АД. Второй член - мгновенная мощность в индуктивности, характеризующая запасаемую энергию магнитного поля машины.



Третий член представляет собой мгновенную мощность, определяющую механическую энергию и электромагнитный момент двигателя:

$$\begin{aligned}
 M_S &= \frac{1}{\omega_r} \times \begin{vmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_b \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i'_{ra} \\ i'_{rb} \\ i'_{rc} \end{vmatrix} = \\
 &= \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \right) \times i'_{ra} + \\
 &+ \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S + \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_C^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \right) \times i'_{rb} + \\
 &+ \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_A^S - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_r M i_B^S + \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_a - \frac{\sqrt{3}}{3} \omega_r L_r i'_c \right) \times i'_{rc} = \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ (i_B^S - i_A^S) i'_{ra} + (i_C^S - i_A^S) i'_{rb} + (i_A^S - i_B^S) i'_{rc} \right]
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Модель АЭП построена как единая структура, а переключение режимов работы осуществляется с помощью стандартных в среде MATLAB блоков переключения – ключей Switch по сигналам состояния тиристоров, поступающим из подсистемы моделирования ТРН.

На основании приведенного выше математического описания построена модель асинхронного электродвигателя в среде MATLAB–AD. Ее структурная схема приведена на рис. 3.5. Структура модели адаптирована к решению задачи имитации состояний фазных проводимостей ключей ТРН. Так, при отключении фазы А или С имитируется ключом Switch5 или ключом Switch подсистемы Su3 (см. рис 3.6, а.). С целью моделирования отключения фазы В уравнения, полученные для двухфазного режима следует упростить:

$$\begin{aligned}
 0 &= E_a - E_c - i_A^S R_s - (M + L_{s\sigma}) p i_A^S - 0.5 M p i_A^S - \frac{3}{2} M p i'_{ra} + \\
 &+ i_C^S R_s + (M + L_{s\sigma}) p i_C^S + 0.5 M p i_C^S - \frac{3}{2} M p i'_{rc}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

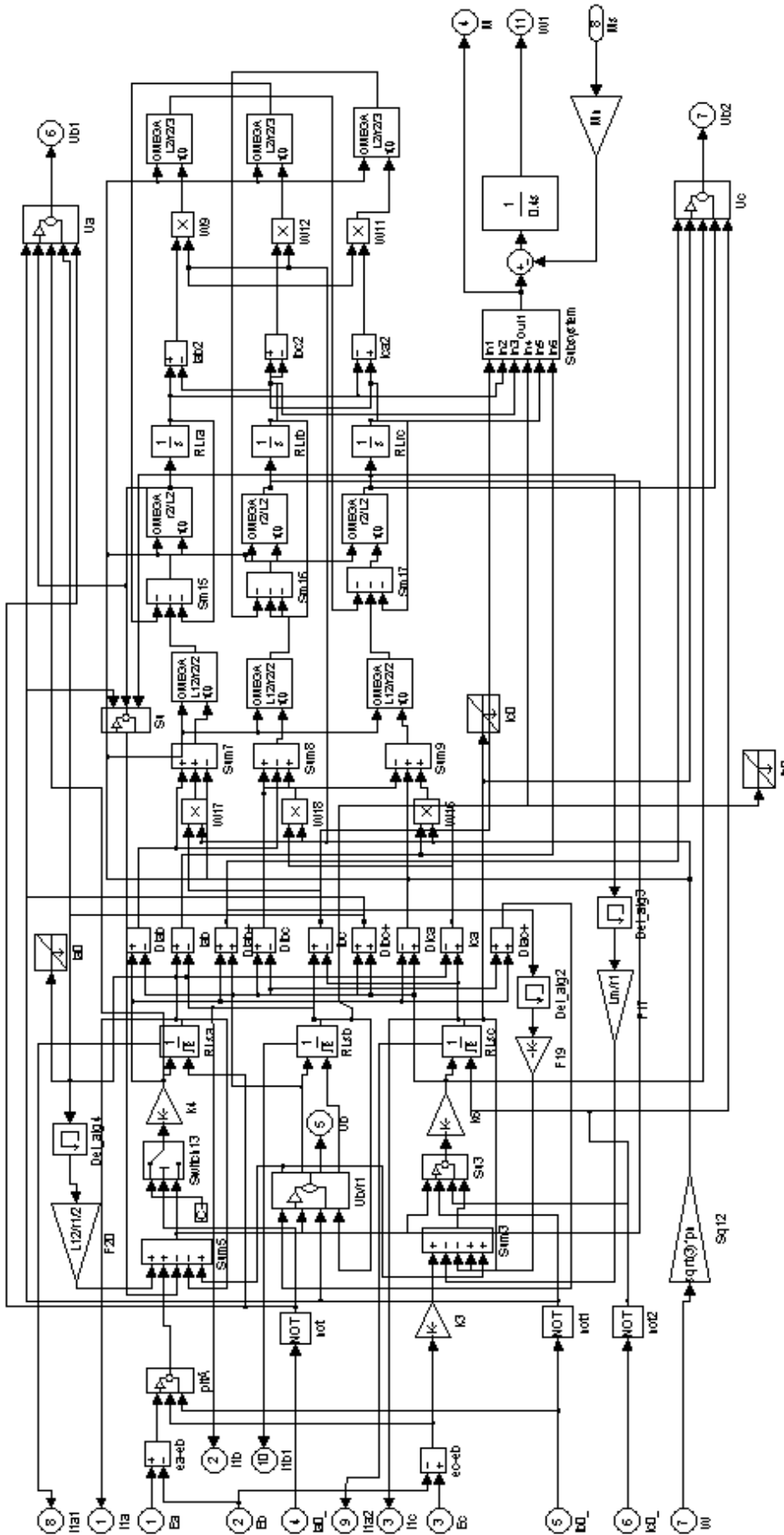


Рисунок 3.5 – Структурная схема блока модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором AD

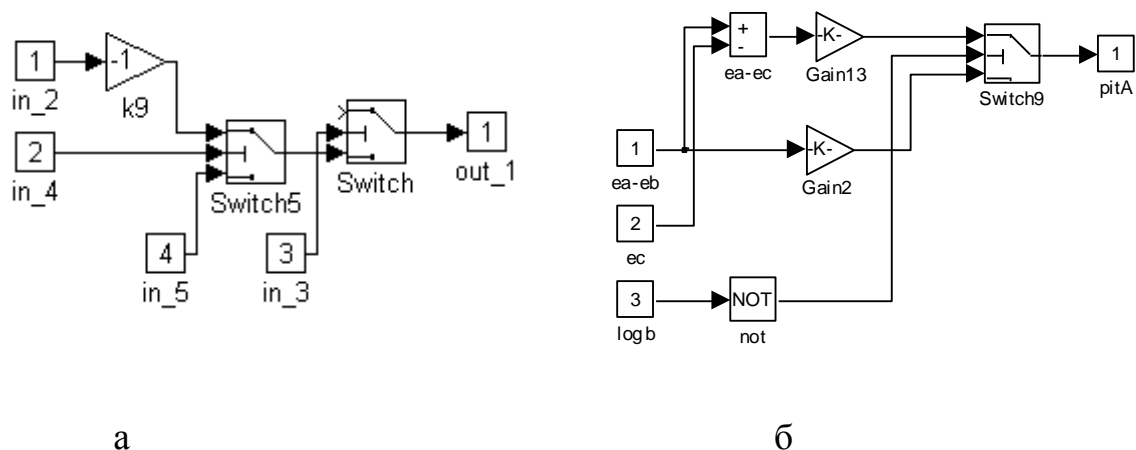


Рисунок 3.6 – Схемы подсистем «Su3»(а) и «питА» (б)

Так как  $i_A^S = -i_C^S$ , то подставив  $i_C^S$  и приведя подобные слагаемые, имеем

$$\frac{(M + L_{s\sigma})i_A^S p}{R_s} = \frac{E_a - E_c}{2R_s} - i_A^S - \frac{0.5Mi_A^S p}{R_s} - \frac{3}{4}i_{ra}' Mp + \frac{3}{4}i_{rc}' Mp . \quad (3.26)$$

Такое упрощение позволяет с помощью подсистем pitA (рис. 3.6, б.), Su и Su3 реализовать заданный режим работы асинхронной машины.

С помощью подсистемы Su (рис. 3.7) на сумматор Sum подается разность

$$\frac{3}{4}i_{ra}^{\circ} Mp - \frac{3}{4}i_{rc}^{\circ} Mp .$$

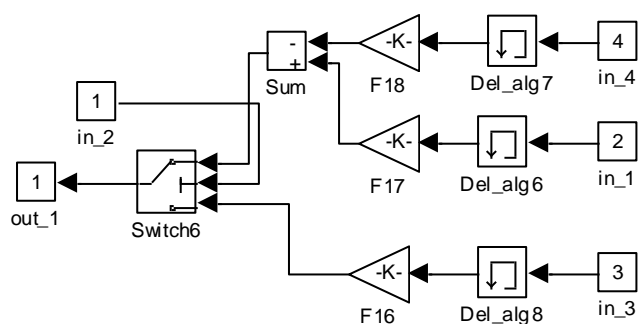


Рисунок 3.7 – Схема подсистемы Su

На ее вход in\_2 поступает сигнал о наличии напряжения в фазе В, на входы in\_1 и in\_4 поступают производные токов ротора  $i_a$  и  $i_c$ , а на вход in\_3 производная по току  $i_a$ . Для подачи тока  $i_c$  в роторную часть, а также для сохранения начальных условий при включении (отключении) фазы В. Ток  $i_A$  инвертируется и подается через интегратор RLsc (рис.3.5.) с помощью подсистемы Su3. При наличии на входе in\_4 единичного сигнала колюч Switch5 замыкается на первый вход и на интегратор поступает инвертированный ток  $i_A$ . Коммутация фаз статора АД ключами Switch производится единичными сигналами на соответствующих входах "in\_".

### 3.2 Предпосылки построения и структура модели тиристорного регулятора напряжения

В модели регулятора напряжения (рис. 3.7) тиристоры, коммутирующие положительную (индекс "+") и отрицательную (индекс "-") полуволну тока, представлены блоками Th+ , Th-, Th+1 , Th-1, Th+2, Th-2. Каждый из блоков имеет два входа (силовой анодный и вход управления) и один выход. Этим решается задачи имитации реальной коммутации (включения – отключения) тиристоров регулятора напряжения.

Структурная схема модели тиристора, представлена на рис. 3.8. Блок "реле+1" служит для формирования на выходе "единичного" логического сигнала при наличии на входе положительной (для Th...+), либо отрицательной (для Th...-) полуволны тока. Импульсы с обоих входов, проходя через мультиплексор, поступают на логический блок, формируя на его выходе параметр, величина которого изменяется в соответствии с таблицей истинности (табл. 3.1).

Таблица 3.1 - Таблица истинности мультиплексора модели тиристора

in_1	in_2	out_1
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

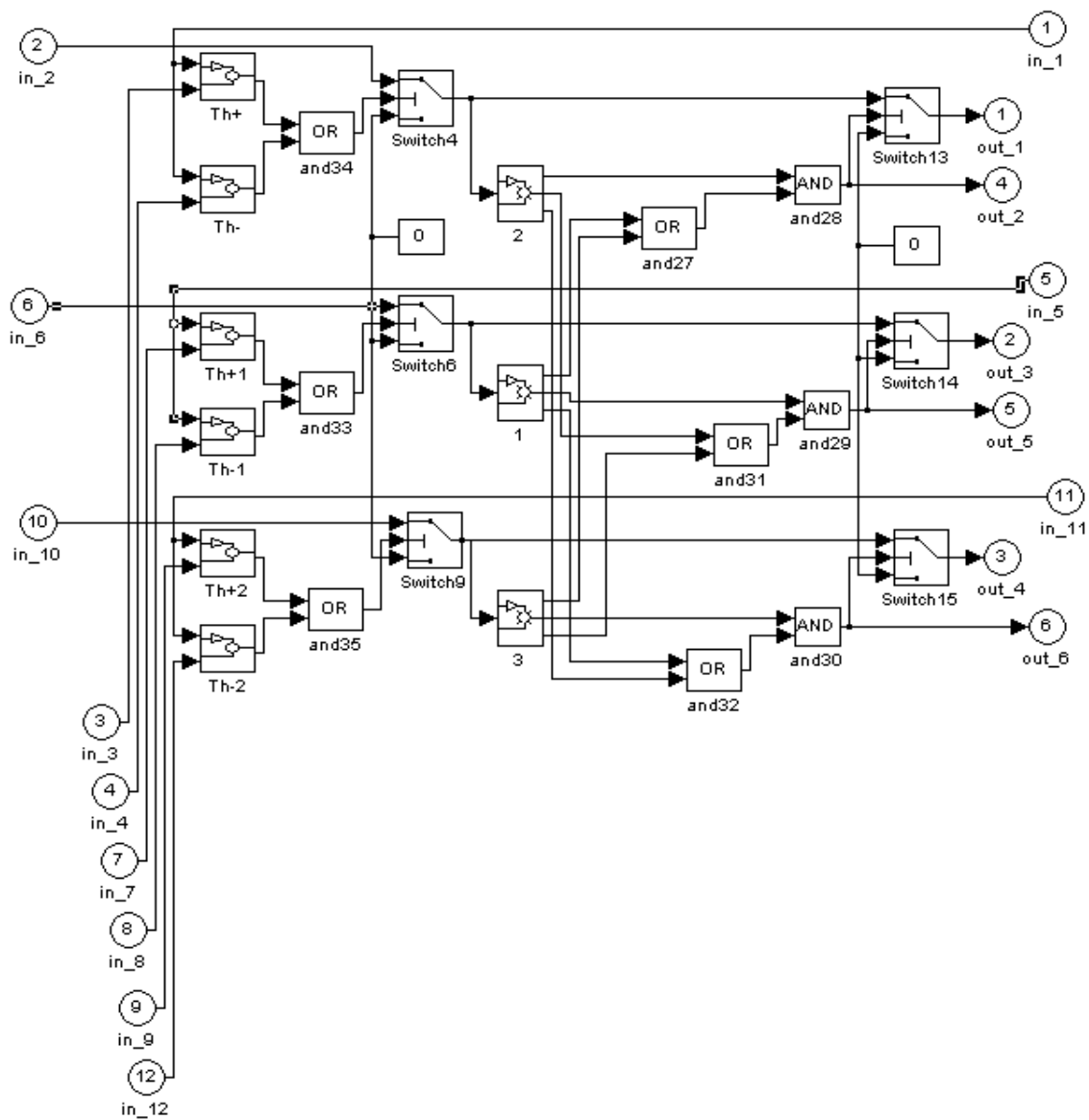


Рисунок 3.8 – Структурная схема блока модели тиристорного преобразователя

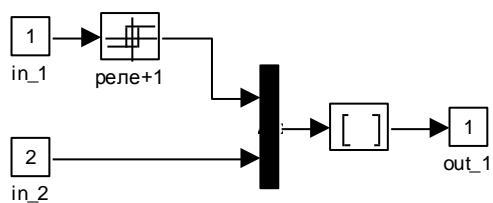


Рисунок 3.9 – Структурная схема модели тиристора thyristor

Логический сигнал с выхода модели каждого тиристора поступает на соответствующий блок логического сложения OR (рис. 3.8), а результат выполнения операции поступает на блоки ключей Switch4, Switch6, Switch9 соответственно фаз А, В и С. При наличии на втором входе этих блоков единичного импульса ключ переходит в проводящее состояние и на выходе появляется сигнал с первого входа (ЭДС питания соответствующей фазы).

Поскольку "звезда" статорной обмотки асинхронного двигателя изолирована от "звезды" обмотки питающего трансформатора, обособленное отпирание тиристора (и протекание тока) только в одной фазе АД невозможно. Для корректной работы модели ТРН необходимо предусмотреть условие протекания тока в силовой цепи ТРН и статора АД при наличии проводящего состояния тиристорov трёх или любых двух фаз. Для этого в модели предусмотрены переключатели Switch13, Switch14, Switch15, а так же блоки логического управления и специальные подсистемы 1, 2, 3 для определения наличия ЭДС на выходах ключей. В зависимости от уровня входного напряжения ( $u$ ) блок Sign1 (рис. 3.10.) формирует сигналы следующих уровней:

$$\begin{cases} -1 & \text{при } u < 0 \\ 0 & \text{при } u = 0 \\ 1 & \text{при } u > 0 \end{cases} .$$

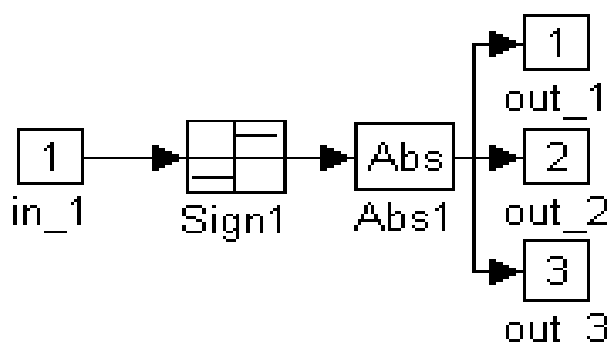


Рисунок 3.10 – Схема подсистемы определения наличия ЭДС на выходе тиристорov

Выходной сигнал блока Sign1 поступает на логический оператор AND соответствующей фазы, а так же на операторы OR остальных двух фаз. На управляющий вход каждого из ключей Switch13, Switch14, Switch15 подается логический сигнал, который формируется блоками AND и OR соответственно фазы А, В или С. При единичном уровне сигнала ключ открывается и на выходе ТРН формируется ЭДС питания данной фазы.

Логические сигналы управления ключами Switch13, Switch14, Switch15 каждой фазы модели ТРН, кроме того, используются в модели АД при формировании трехфазного и двухфазного режимов работы двигателя.

### 3.3 Обоснование структуры модели блока управления тиристорным регулятором напряжения “control system”

Подсистема моделирования системы управления предназначена для формирования импульсов управления виртуальными тиристорами подсистемы моделирования ТРН. Входы модели (рис. 3.11) предназначены для подключения следующих сигналов:

- in\_1, in\_2, in\_3 – синхронизирующих ЭДС фаз А, В, С сети (те же сигналы, что подаются на входы in\_2, in\_6, in\_10 модели на рис. 3.8.);
- control – сигнала сдвига по фазе (задается в электрических градусах).

Функция фазового регулирования предусмотрена шестью соответствующими блоками (рис. 3.12). На их выходах «out\_1 - out\_6» формируются импульсы, синхронизированные с сетью и подаваемые с заданными задержками на входы «in\_3, in\_4, in\_7, in\_8, in\_9, in\_12» подсистемы моделирования ТРН.

В модели подсистемы (рис. 3.11) реализован принцип координированного квазичастотного управления [99], который заключается в том, что управляющие импульсы подаются на тиристоры тех фаз, знаки напряжений которых совпадают со знаками модулирующих напряжений.

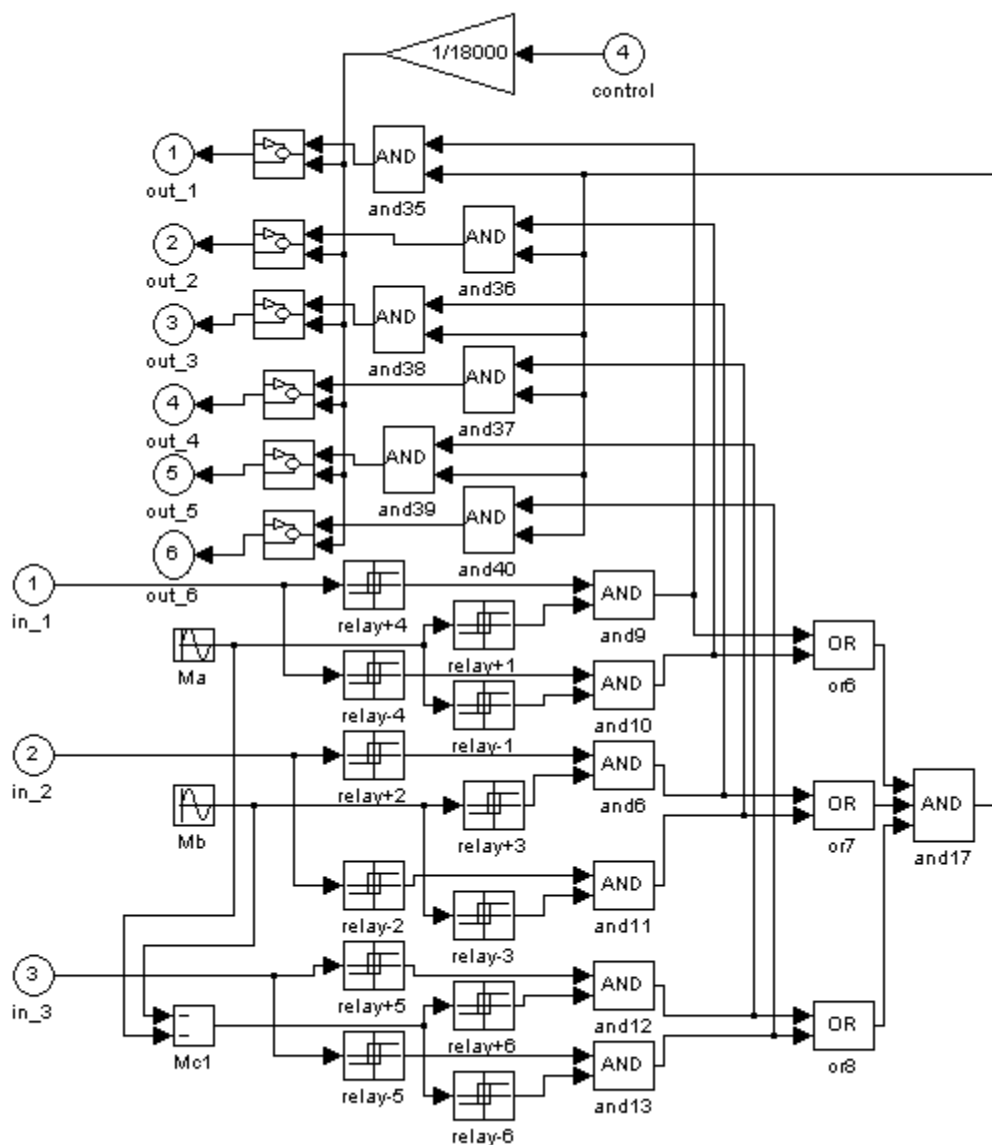


Рисунок 3.11 – Структурная схема модели системы управления

В соответствии с выводами и рекомендациями исследования [99], практический интерес представляют соотношения частоты напряжения сети и частоты модуляции квазичастотного напряжения:

$$n = f_c / f_m = 3(k-1) + 1, \quad (3.27)$$

где  $k$  – число натурального ряда (номер ступени регулирования).

Поэтому приемлемо исследовать процессы в объекте при указанных соотношениях частот. Источниками модулирующих напряжений в подсистеме



являются блоки Ма, Мв, Мс1, выходными сигналами которых являются синусоиды с частотой в  $n$  раз меньшей частоты сети.

Таким образом, подсистема моделирования системы управления имеет два канала задания режима работы АЭП с ТРН: ступенчатое изменение  $n$  и плавное изменение угла регулирования (вход control) внутри выбранной ступени квазичастоты. При  $n=1$  получаем модель АЭП с ТРН при фазовом регулировании на статоре АД напряжения частоты сети.

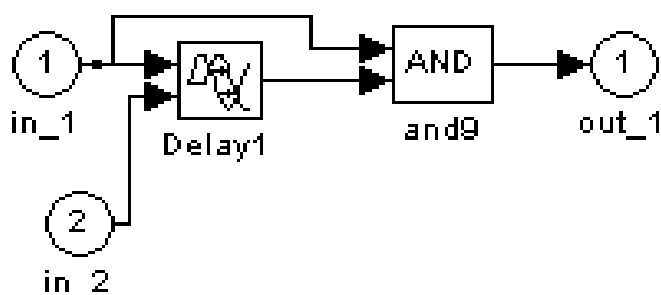


Рисунок 3.12 – Структура блока фазового управления

В модели также предусмотрен блок усреднения момента АД. Вычисление среднего значения производится по формуле:

$$F_{cp} = \frac{1}{T_u} \int_{t_1}^{t_1+T_u} f(t) dt, \quad (3.28)$$

где  $f(t)$  - функция времени, среднее значение которой необходимо вычислить на интервале времени от  $t_1$  до  $t_1 + T_u$ ;  $T_u$  - период усреднения.

Построение блока предполагает осуществление сброса интегратора в нулевое состояние в начале каждого интервала усреднения. С целью адаптации этого положения к возможностям программного пакета MATLAB применено построение блока на основе следующего преобразования функции (3.28):

$$F_{cp} = \int_0^{t_1+T_u} \frac{1}{T_u} f(t) dt - \int_0^{t_1} \frac{1}{T_u} f(t) dt . \quad (3.29)$$

Структурная схема усредняющего блока, приведенная на рис.3.13, представляет собой систему с отрицательной обратной связью.

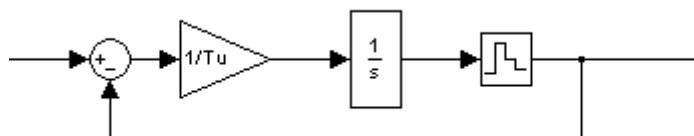


Рисунок 3.13 – Структурная схема модели блока средних значений

Структура блока действующих значений параметров представлена на рис.3.14 и предполагает вычислительную операцию в соответствии с соотношением

$$F_d = \sqrt{\frac{1}{T_u} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T_u} f(t)^2 dt} , \quad (3.30)$$

где  $f(t)$  - функция времени, действующее значение которой необходимо вычислить на интервале времени  $T_u$ .

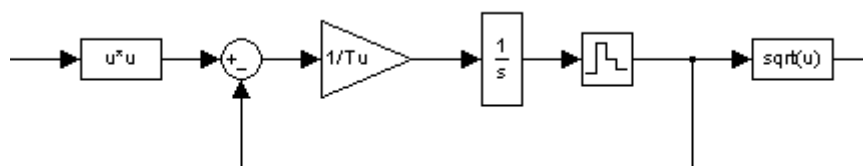


Рисунок 3.14 – Структурная схема модели блока действующих значений

Блок формирует действующее значение периодического параметра с задержкой на период  $T_u$ . Модель блока средних значений входит в модель блока действующих значений как составная часть.

### 3.4 Анализ результатов исследования параметров асинхронного двигателя в режиме квазичастотного электропитания

К числу параметров асинхронного двигателя, которые представляют практический интерес при исследовании системы ТРН–АД в режиме квазичастотного электропитания следует отнести частоту вращения вала ротора, электромагнитный момент, напряжение статора и потребляемый ток. Данная система исследована методами математического моделирования посредством прикладного пакета MATLAB с применением моделей, описанных выше и в [100, 101].

Рассмотрим два типа алгоритма управления АД – координированное квазичастотное управление [99] и комбинированный способ, предусматривающий введение фазовых задержек на включение каждой комбинации тиристоров при формировании квазисинусоидального напряжения [102]. Предусматриваем применение в системе ТРН–АД асинхронного двигателя серии 4А315S4У3 синхронной частоты вращения 1500 об/мин ( $P_n = 160$  кВт;  $\omega_n = 1479$  об/мин.;  $M_n = 1034$  Нм;  $J=3,10$  кг·м<sup>2</sup>). При этом рассмотрим два из известных, рекомендуемых алгоритмов (в отношении выражения 3.27) переключения комбинаций тиристоров регулятора ( $k=2; n=4$ ) и ( $k=3; n=7$ ).

На рисунках 3.15 – 3.18. приведены диаграммы тока  $I_a$ , момента, развиваемого электродвигателем  $M$  и частоты вращения его вала  $\omega$  в абсолютных единицах при номинальном моменте сопротивления.

Для представления диаграмм процессов выбрана следующая их оцифровка по оси ординат: масштабы (по осям) параметров работы одного и того же двигателя в результате управляющих воздействий по различным алгоритмам и на различных ступенях регулирования приняты одинаковыми с целью удобства сравнения характеристик. При таком подходе неизбежно либо измельчение изображений, либо выход фиксируемых величин за пределы оцифровки.

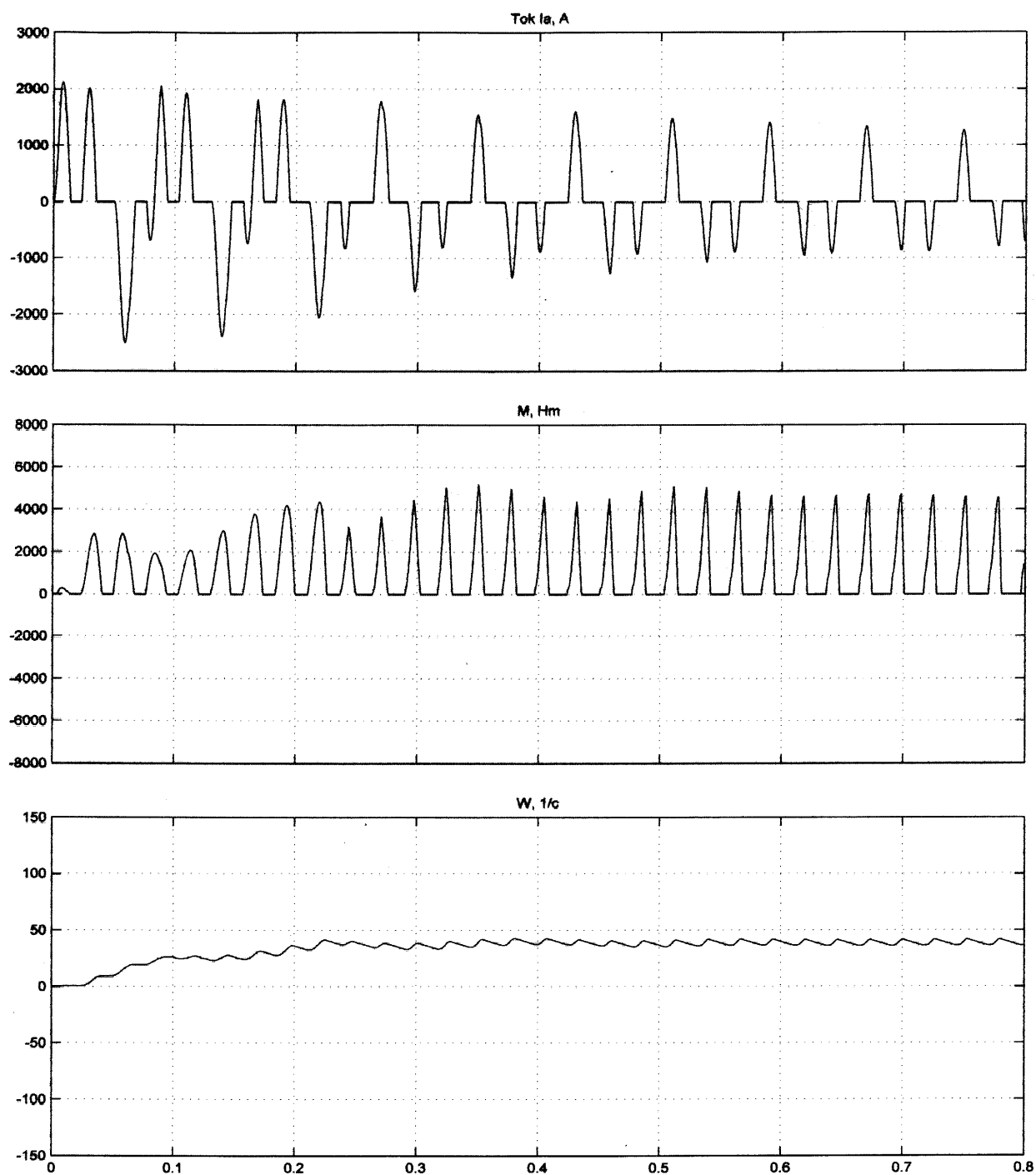


Рисунок 3.15 – Диаграммы процессов при пуске двигателя 4А315S4У3 на первой ступени квазичастоты ( $k=2$ ;  $n=4$ ;  $f_m=12,5$  Гц) при координированном способе управления ТРН

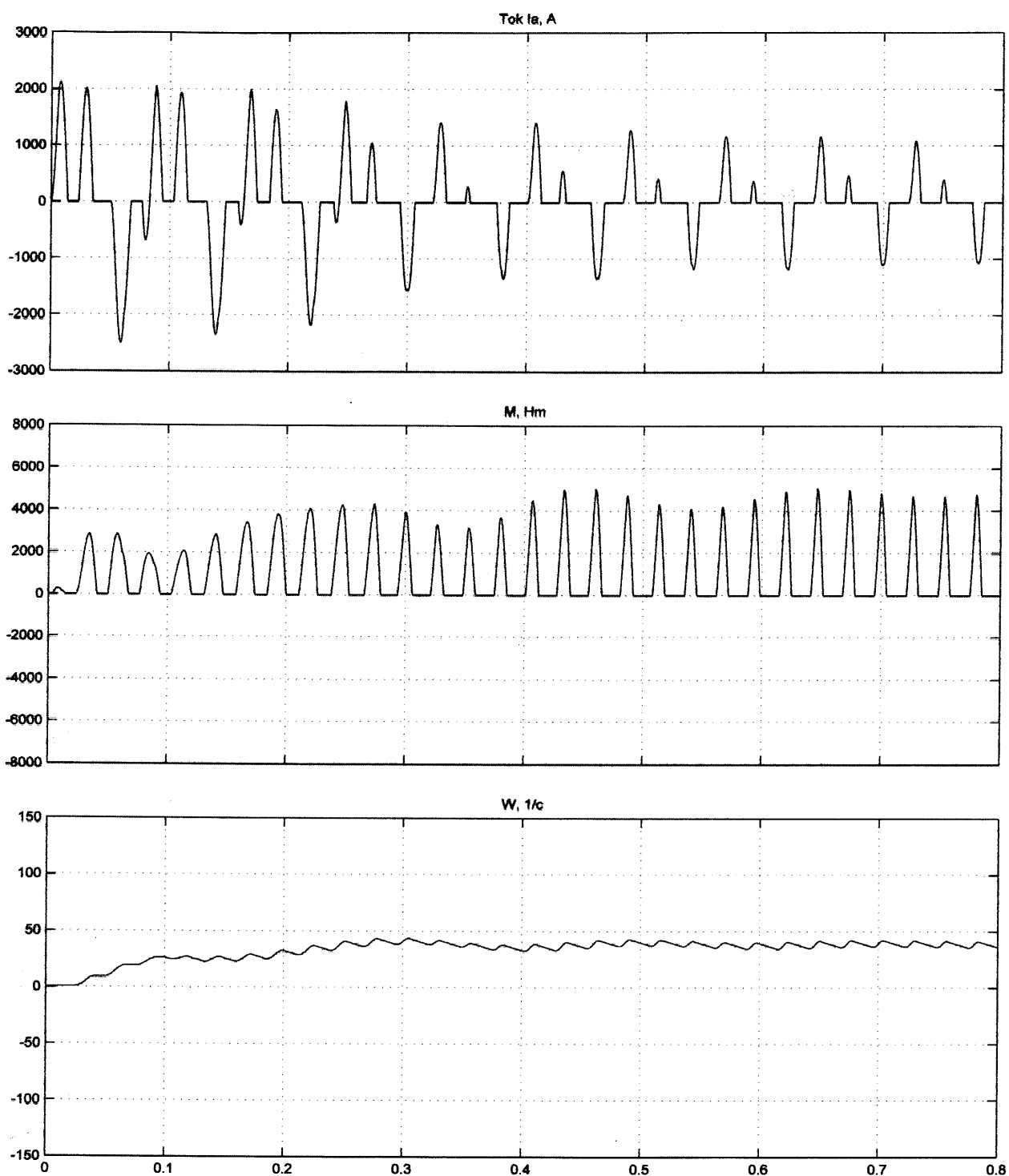


Рисунок 3.16 – Диаграммы процессов при пуске двигателя 4А315S4У3 на первой ступени квазичастоты ( $k=2$ ;  $n=4$ ;  $f_m=12,5$  Гц) при комбинированном способе управления ТРН

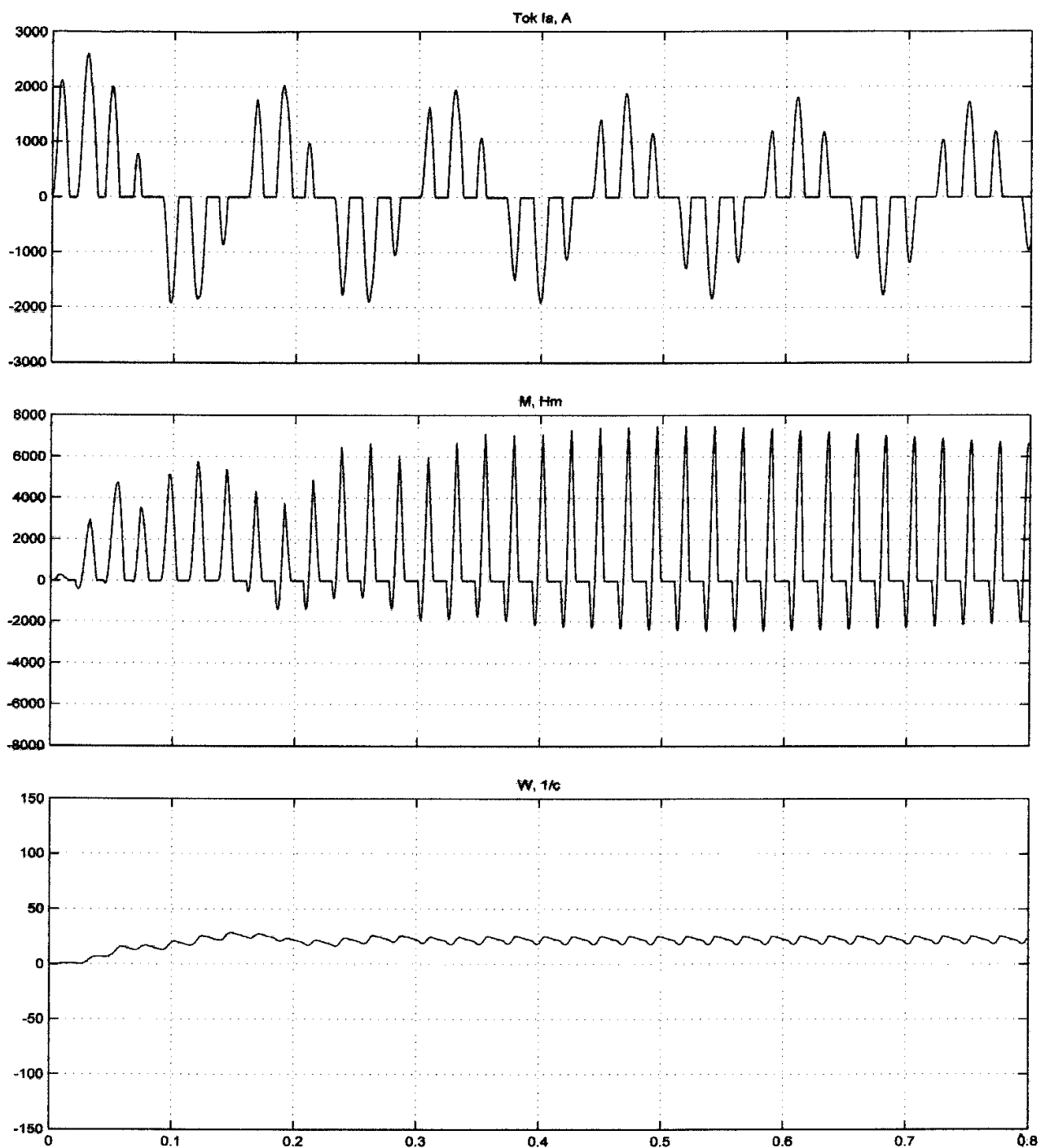


Рисунок 3.17 – Диаграммы процессов при пуске двигателя 4А315S4У3 на второй ступени квазичастоты ( $k=3$ ;  $n=7$ ;  $f_m=7,14$  Гц) при координированном способе управления ТРН

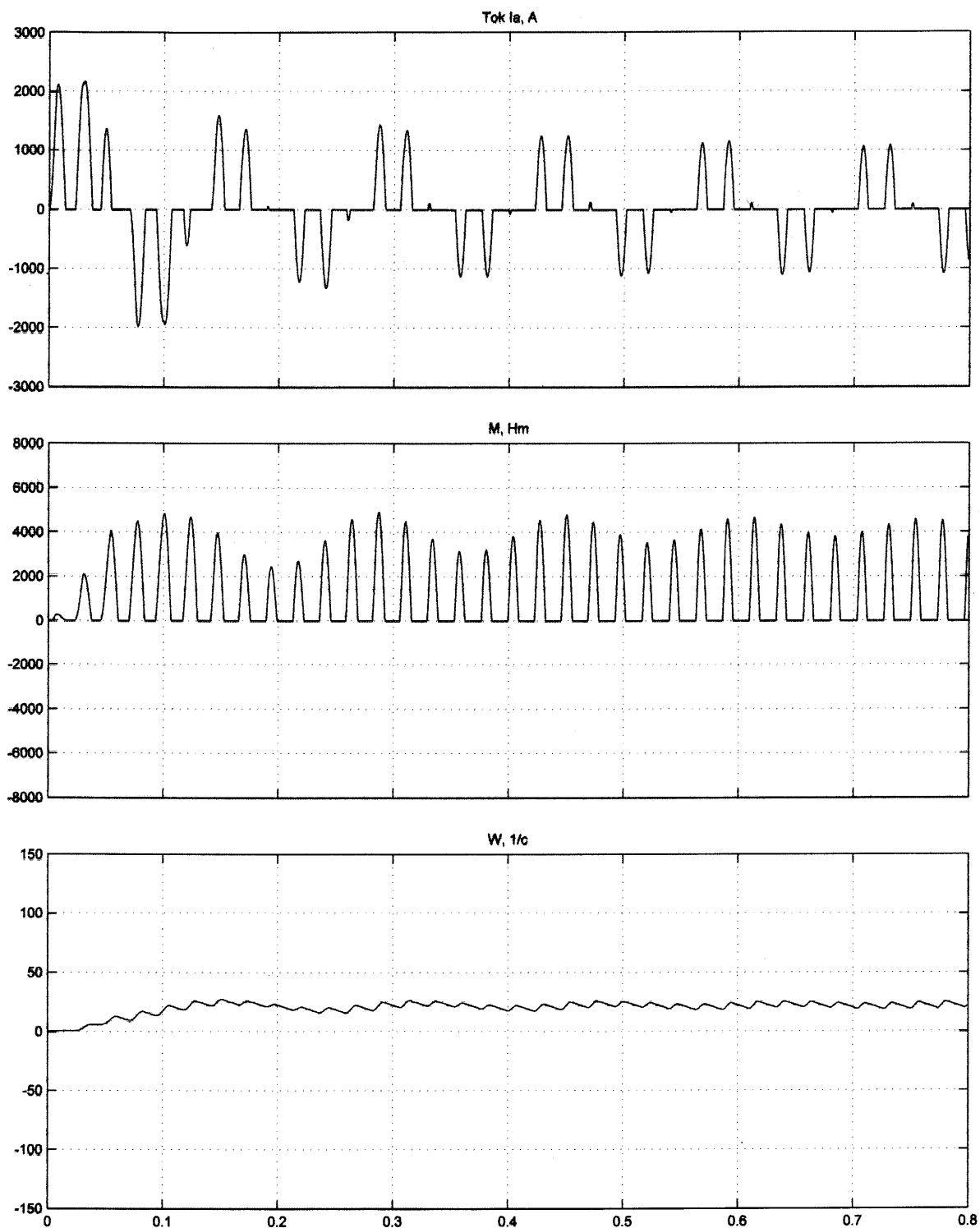


Рисунок 3.18 – Диаграммы процессов при пуске двигателя 4А315S4У3 на второй ступени квазичастоты ( $k=3$ ;  $n=7$ ;  $f_m=7,14$  Гц) при комбинированном способе управления ТРН

Анализ приведенных диаграмм, а так же аналогичных диаграмм, полученных применительно к другим типам асинхронных двигателей средней мощности показывает следующие факты и тенденции:

- механический момент, развиваемый АД, имеет пульсирующий характер, что обуславливает наличие пульсирующей составляющей уровня частоты вращения ротора АД;

- при комбинированном способе управления вследствие снижения амплитуд и продолжительностей фрагментов напряжения сети в полуволнах квазисинусоидальных напряжений наблюдается тенденция к общему снижению момента АД и появлению колебательной составляющей амплитуд импульсов момента;

- с увеличением мощности АД снижается величина пульсирующей составляющей уровня частоты вращения ротора АД (вследствие увеличения момента инерции ротора (J)).

Исследованиями так же установлено, что частота вращения ротора АД определяется величиной частоты модуляции квазисинусоидального напряжения. При этом, на ряде частот модуляции (при  $k=2$ ) не возможно получить симметрии форм квазисинусоидальных напряжений в фазах и полуволнах ни при координированном, ни при комбинированном способах управления. Это исключает данные уровни частот из числа практически актуальных.

С целью установления уровня энергетических показателей при моделировании переходных и установившихся процессов в системе выполнен расчет средней потребляемой электроприводом мощности  $S$  и средней полезной механической мощности  $P_m$  по формулам:

$$S = \frac{1}{t_{nn}} \int_0^{t_{nn}} [i_a(t) \cdot u_a(t) + i_b(t) \cdot u_b(t) + i_c(t) \cdot u_c(t)] dt; \quad (3.31)$$

$$P_m = \frac{1}{t_{nn}} \int_0^{t_{nn}} [M(t) \cdot \omega_r(t)] dt, \quad (3.32)$$



где  $i_a(t), u_a(t), i_b(t), u_b(t), i_c(t), u_c(t)$  - мгновенные значения токов и напряжений фаз электродвигателя;

$M(t), \omega_r(t)$  - мгновенные значения механического момента, развиваемого электродвигателем, и круговая частота вращения его вала;

$t_{nn}$  - время переходного процесса.

Значения полученных средних мощностей сведены в табл. 3.2. Сюда же внесены значения коэффициентов мощности  $\chi = P_m/S$ , характеризующих энергетические показатели координированного ( $\chi_k$ ) и комбинированного ( $\chi_m$ ) алгоритмов управления тиристорами квазичастотного преобразователя.

Анализ данных табл. 3.2. показывает, что при переходе от координированного к комбинированному алгоритму управления ТРН коэффициент мощности АЭП может быть повышен до 0.4...0.5, т.е., на 40 – 60%.

Однако важным недостатком результатов моделирования следует считать несоответствие характера изменения квазисинусоидального фазного тока, потребляемого АД в процессе разгона известным результатам теоретических и экспериментальных исследований [103-105]. В формах фазных квазисинусоидальных токов отсутствует влияние ЭДС вращения АД, что существенно влияет на точность полученных данных моделирования. Поэтому требуется коррекция модели системы "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель".

### 3.5 Обоснование структуры скорректированной модели

#### "вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель"

Проведенным выше моделированием процессов достигается принципиальная возможность получения диаграмм изменения параметров электротехнического комплекса при реализации заданного алгоритма переключения тиристоров ТРН (квазичастотного преобразователя).

Таблица 3.2 - Результаты сравнения характеристик электропривода  
при различных алгоритмах регулирования

Тип электродвига теля	$n$	Координированное управление			Комбинированное управление			$\frac{\chi_m}{\chi_k}$
		$S$ , кВт	$P_m$ , кВт	$\chi_k$	$S$ , кВт	$P_m$ , кВт	$\chi_m$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4A132M2У 3	4	7.30	2.20	0.30	6.00	2.20	0.36	1.22
	7	17.0	1.55	0.09	4.20	1.23	0.23	2.63
4A132M4У 3	4	10.9	0.84	0.07	5.60	2.10	0.37	4.90
	7	10.7	1.29	0.12	5.27	1.13	0.21	1.78
4A200L2У3	4	23.4	10.3	0.44	21.6	10.3	0.48	1.14
	7	26.0	5.98	0.23	14.6	5.84	0.39	1.73
4A200L4У3	4	25.2	10.5	0.41	23.0	10.5	0.45	1.10
	7	31.4	6.10	0.19	16.2	5.91	0.36	1.88

4A315S2Y3	4	93.0	34.1	0.36	89.8	33.4	0.37	1.01
		6	4	7	8	1	1	
	7	78.4	19.4	0.24	49.5	19.0	0.38	1.55
		7	8	8	6	2	4	
4A315S4Y3	4	74.5	34.6	0.46	72.4	34.2	0.47	1.02
		2	1	4	9	6	3	
	7	68.4	21.3	0.31	46.6	20.6	0.44	1.42
		5	1	1	4	6	3	
4A355M2Y 3	4	209.	66.0	0.31	211.	63.5	0.30	1.05
		1	7	6	8	1	0	
	7	160.	39.6	0.24	103.	39.8	0.38	1.56
		2	2	7	3	1	5	
4A355M4Y 3	4	137.	67.3	0.48	131.	68.1	0.51	1.05
		9	4	8	2	8	2	
	7	124.	37.6	0.30	84.8	35.2	0.41	1.38
		9	3	1	2	2	5	

В зависимости от вводимых параметров нагрузки прослеживается тенденция изменения параметров исследуемой системы. Однако структура предложенной компьютерной модели объективно сложна, что вызвано необходимостью совмещения модели источника, модели системы управления переключением комбинаций тиристорov, модели функции фазовых задержек включения тиристорov и модели самого двигателя. В результате совместной работы моделей отдельных

функций подавляется учет влияния на процессы в системе ЭДС вращения АД, (со стороны статора АД – на элементы ТРН). Практически отсутствует результат влияния ЭДС вращения на полученные параметры системы. Это следует и из анализа диаграмм квазисинусоидальных токов двигателей, изменение амплитуд которых в процессе пуска не согласуется с результатами известных исследований [103, 104].

Таким образом, область использования предложенной модели рационально ограничить системой "квазичастотный преобразователь – активно-реактивная нагрузка". В то же время, рационально сохранив обоснованные ранее предпосылки и допущения при формировании математической модели асинхронного двигателя, изменить подход к построению самой компьютерной модели исследуемой системы. А именно – представить ТРН в качестве полупроводникового коммутатора фазных полуволн токов нагрузки. Интервалы проводимости и интервалы непроводящего состояния отдельных ключей определить соответствующим алгоритмом, а начальным состоянием системы для каждого последующего интервала состояния группы ключей принимать конечное состояние системы для соответствующего предыдущего интервала состояния группы ключей.

Изложенное определяет структуру компьютерной модели системы (рис. 3.19), где 1 – блок синхронизации квазичастотного управления; 2, 3, 4 – блоки формирования квазичастотного фазного напряжения; 5, 6, 7 – блоки сопряжения; 8 – асинхронный двигатель; 9 – модель нагрузки асинхронного двигателя; 10 – система измерения линейного напряжения; 11 – система измерения электромеханических параметров. Блок синхронизации квазичастотного управления предназначен для синхронизации блоков формирования квазичастотного напряжения и напряжения питающей сети. В блоках 2 смоделирован квазичастотный коммутатор. На выходах этих блоков формируются соответствующие формы напряжений. Для согласования выходного сигнала с блоков формирования квазичастотного напряжения с напряжением питания асинхронного двигателя применяются управляемые источники питания (5,6,7). Блок 8 представляет стандартную модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

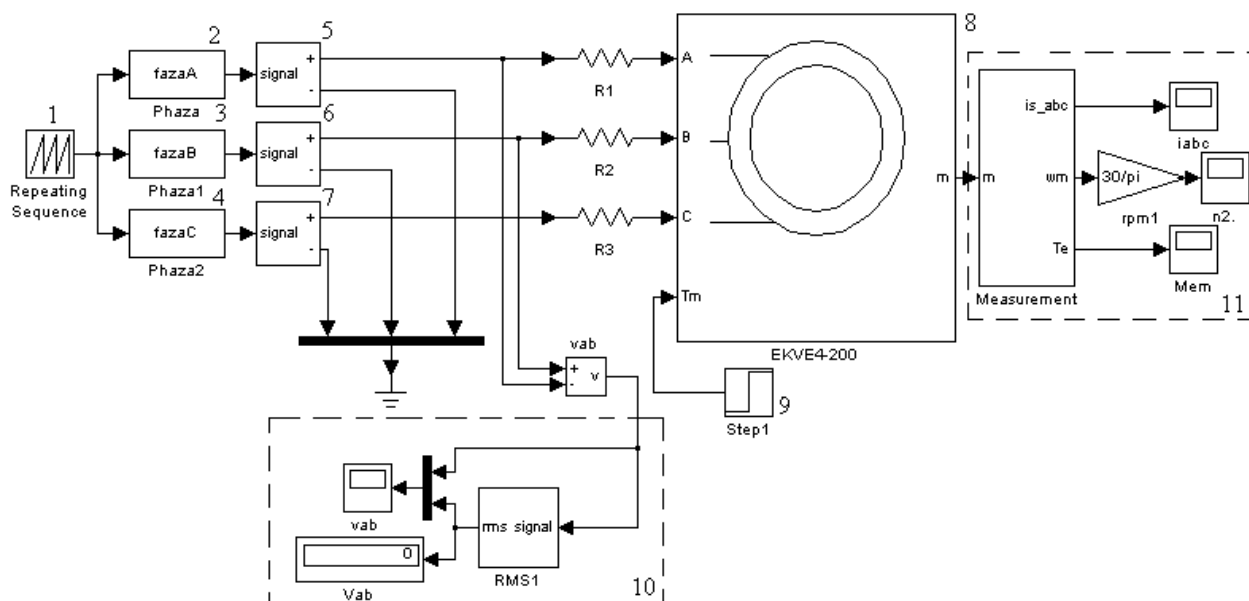


Рисунок 3.19 – Полная модель системы «Квазичастотный преобразователь – асинхронный двигатель»

Для создания уровня момента сопротивления предназначен блок 9, который в определенный момент времени подключает нагрузку к электродвигателю. Для измерения текущих параметров АД и получения осциллограмм применяются измерительные блоки 8 и 10. Измерительный блок выдает на показывающие приборы ток электродвигателя, скорость вращения ротора и крутящий момент. Блок 10 измеряет фазные напряжения источника питания АД.

Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и обмотками, выполненными по схеме "звезда", описана соотношениями (3.1-3.12) и поясняется схемами на рис. 3.1 и 3.3. При этом, с целью полноты описания электромеханических процессов в АД уравнение (3.4) и выражение коэффициента  $k = 1_{s1r} - 1_m^2$  дополняем уравнением механического равновесия моментов на валу АД:

$$p \cdot \omega = (M - M_c) / J_{\Pi} \quad (3.33)$$

где  $M_c$  – приведенный к валу ротора суммарный момент сопротивления привода;

$J_n$  – приведенный к валу ротора момент инерции элементов привода.

Дальнейшее преобразование модели АД предусматривает переход от трехмерного базиса  $F_s$  к двумерному базису  $G_s$ , что лежит в плоскости поперечного сечения АД (рис. 3.2, а). В базисе  $G_s$  вектора раскладываются по оси  $\alpha$ , что совпадает с магнитной осью фазы а, и ортогональной ей оси  $\beta$ . Преобразование координат векторов осуществляем умножением их на матрицу преобразования  $\mathbf{A}_{FG}$  [95]:

$$\mathbf{A}_{FG} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Вектор напряжения статора в базисе  $G_s$ :

$$\mathbf{U}_s^{G_s} = \mathbf{A}_{FG} \cdot \mathbf{U}_s^{F_s} = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} & u_{s\beta} & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (3.35)$$

Обратное преобразование осуществляем с помощью матрицы  $\mathbf{A}_{GF} = \mathbf{A}_{FG}^{-1}$ :

$$\mathbf{U}_s^{F_s} = \mathbf{A}_{GF} \cdot \mathbf{U}_s^{G_s} \quad (3.36)$$

Аналогично осуществляем прямое и обратное преобразования координат векторов других сменных состояний АД.

В дальнейшем будем оперировать двумерными векторами переменного вида:

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Указанные положения принципиально важны для обеспечения полноты информации при моделировании процессов в системе с учетом электромагнитных составляющих параметров асинхронного двигателя и обуславливают структуру соотношений (3.6 - 3.9).

Начальные условия для системы уравнений (3.7) при пуске двигателя:

$$\begin{aligned}\Psi_r|_{t=0} &= \Psi_{r0}; \\ \Psi_s|_{t=0} &= \Psi_{s0}; \\ \omega|_{t=0} &= \omega_0,\end{aligned}\tag{3.38}$$

где  $\Psi_{r0}, \Psi_{s0}, \omega_0$  - параметры АД, что отвечают предшествующему включенному режиму.

При пуске асинхронного двигателя:

$$\Psi_{r0} = [0 \ 0]^T, \Psi_{s0} = [0 \ 0]^T, \omega_0 = 0\tag{3.39}$$

При выборе уровня идеализации свойств АД принимаем следующие допущения:

не учитываются потери в стали;

рабочее поле электрической машины считается плоскопараллельным;

не учитываются насыщение путей рассеяния и взаимного влияния потоков рассеивания и главного магнитного потока.

Поскольку квазичастотное электропитание АД характеризуется наличием интервалов непроводящего состояния вентилях (НСВ) между фрагментами синусоид напряжений сети в полуволнах квазисинусоидальных напряжений, при рассмотрении процессов в системе "Квазичастотный преобразователь – асинхронный двигатель" следует учесть математическую модель АД на интервалах НСВ.

Потокосцепление ротора после отключения АД от сети [95]:

$$\Psi_{r1} = \Psi_{r0} - r_r \cdot \int_0^{t_1} \mathbf{I}_r dt, \quad (3.40)$$

где  $\Psi_{r0}$ ,  $\Psi_{r1}$  – векторы потокосцеплений ротора до и после коммутации цепи статора;

$t_1$  – продолжительность коммутации цепи статора, с.

Благодаря тому, что отключение АД происходит очень быстро, а величина активного сопротивления ротора незначительна, вторым членом правой части уравнения (3.40) можно пренебречь. Таким образом, принимаем:

$$\Psi_{r1} = \Psi_{r0}, \quad (3.41)$$

По окончании выключения ток статора равняется нулю, тогда из уравнений (3.7) получаем:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{s1} &= l_m \cdot \mathbf{I}_{r1} \\ \Psi_{r1} &= l_r \cdot \mathbf{I}_{r1} \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

При этом выражение для потокосцепления статора после отключения АД будет иметь вид

$$\Psi_{s1} = k_r \Psi_{r0} = k_r \Psi_{r1}, \quad (3.43)$$

где  $k_r$  – коэффициент связи ротора:

$$k_r = \frac{l_m}{l_r} \quad (3.44)$$

Таким образом, система уравнений математической модели АД после его отключения от сети записывается выражениями:



$$\left. \begin{aligned} \Psi_s &= k_r \cdot \Psi_r \\ p \cdot \Psi_r &= z_p \cdot \omega \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \Psi_r - \frac{r_r}{l_r} \Psi_r \\ p \cdot \omega &= \left( \frac{3z_p l_m (\Psi_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{s\alpha} \Psi_{r\beta})}{2k} - M_c \right) / J_{\Pi} \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

Начальные условия для этой системы уравнений

$$\begin{aligned} \Psi_r \Big|_{t=0} &= \Psi_{r0}; \\ \Psi_s \Big|_{t=0} &= k_r \cdot \Psi_{r0}; \\ \omega_r \Big|_{t=0} &= \omega_{r0} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Дифференциальные уравнения АД совместно с блоком численного решения дифференциальных уравнений оформлены в виде стандартного блока 8 библиотеки пакета SIMULINK.

### 3.6 Моделирование процессов в системе «вентильный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» в режиме квазичастотного электропитания

Из анализа результатов предварительного моделирования процессов (п.3.4) следует что из перечня дискретных величин частот модуляции только некоторые позволяют получить квазисинусоидальные напряжения, симметричный в фазах и полуволнах. В частности, это условие выполняется при коррекции выражения (3.27) к виду:

$$n = f_c / f_m = 3(k-1) \pm 1 \quad (3.47)$$

при  $k = 3$ .

Тогда формирование периода квазисинусоидальных трёхфазных напряжений будет характеризоваться совокупностью состояний полупроводниковых ключей  $K_i$  квазичастотного преобразователя (табл. 3.3).

Как отмечалось в [103], на каждом интервале коммутации имеются состояния одновременной проводимости в двух фазах (А и В, или А и С, или В и С), а так же состояния трехфазной проводимости вентильных ключей (рис. 3. 20). В последнем случае справедливы соотношения:

Таблица 3.3 – Диаграмма состояний полупроводниковых ключей при формировании периода квазисинусоидального напряжения  $f_c/f_m = 3(k-1)+1$ ;  $k = 3$

Интервалы коммутации	Включенные полупроводниковые ключи					
	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>K3</i>	<i>K4</i>	<i>K5</i>	<i>K6</i>
1						
2						
3						
4						
5						
6						

$$U_a = U_{\max} \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t);$$

$$U_b = U_{\max} \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t - 2 \cdot \pi / 3); \quad (3.48)$$

$$U_c = U_{\max} \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t + 2 \cdot \pi / 3).$$

Введем промежуточные переменные для удобства записи фазных напряжений полученных в результате коммутации фаз при помощи вентильного коммутатора:

$$U_{ab} = (U_a - U_b) / 2; \quad U_{ba} = -U_{ab};$$

$$U_{bc} = (U_b - U_c) / 2; \quad U_{cb} = -U_{bc}; \quad (3.49)$$

$$U_{ac} = (U_a - U_c) / 2; \quad U_{ca} = -U_{ac};$$

$$\varphi = 100 \cdot t \cdot 6;$$

где  $U_{ab}$ ,  $U_{ba}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{ca}$  – выражения для мгновенных значений напряжений на обмотках статора АД для различных состояниях коммутации полупроводниковых вентилей квазичастотного преобразователя в соответствии с [103];

$\varphi$  – переменная, учитывающая изменения угла фазных напряжений во времени.

Это позволяет на каждом из шести интервалов коммутации выделить состояния коммутатора, определяющие наличие на его выходе соответствующих мгновенных напряжений (рис. 3.20).

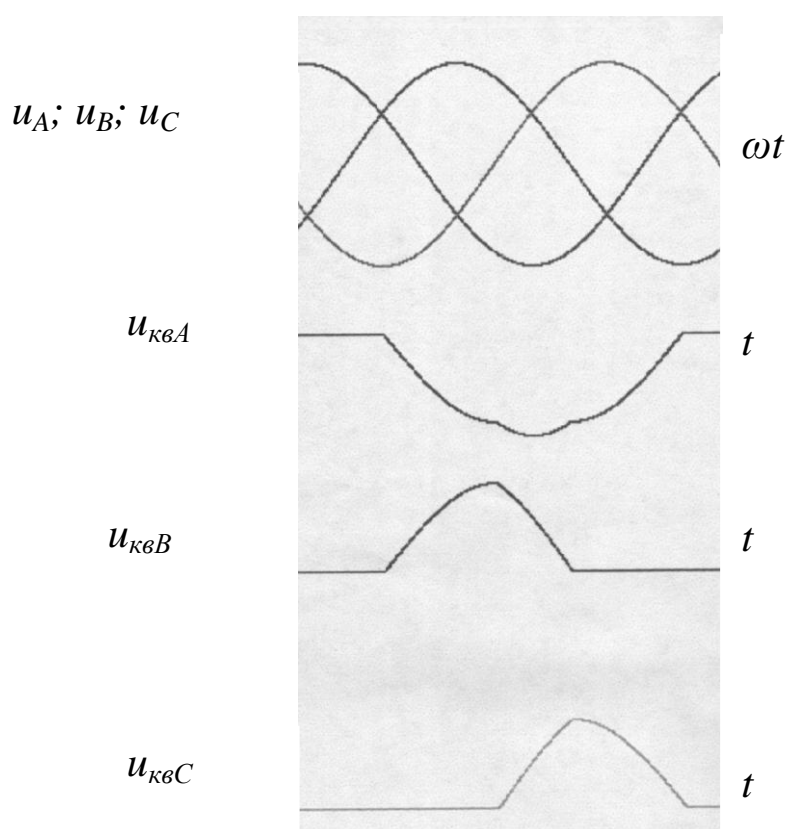


Рисунок 3.20 – Диаграммы формирования фрагментов трехфазного квазисинусоидального напряжения на одном интервале коммутации

Применительно к рис. 3.20 определены следующие состояния:

- при  $\varphi \leq 5$   $U_{ka}=0$ ;  $U_{kb}=0$ ;  $U_{kc}=0$ ;
- при  $\varphi > 5$   $U_{ka}=U_{ab}$ ;  $U_{kb}=U_{ba}$ ;  $U_{kc}=0$ ;
- при  $\varphi \geq 8$   $U_{ka}=U_a$ ;  $U_{kb}=U_b$ ;  $U_{kc}=U_c$ ;
- при  $\varphi \geq 10$   $U_{ka}=U_{ac}$ ;  $U_{kb}=0$ ;  $U_{kc}=U_{ca}$ ;

при  $\varphi \geq 13$   $U_{ka}=0; U_{kb}=0; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 19$   $U_{ka}=U_{ac}; U_{kb}=0; U_{kc}=U_{ca};$   
 при  $\varphi \geq 22$   $U_{ka}=U_a; U_{kb}=U_b; U_{kc}=U_c;$   
 при  $\varphi \geq 24$   $U_{ka}=0; U_{kb}=U_{bc}; U_{kc}=U_{cb};$   
 при  $\varphi \geq 27$   $U_{ka}=0; U_{kb}=0; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 33$   $U_{ka}=0; U_{kb}=U_{bc}; U_{kc}=U_{cb};$   
 при  $\varphi \geq 36$   $U_{ka}=U_a; U_{kb}=U_b; U_{kc}=U_c;$   
 при  $\varphi \geq 38$   $U_{ka}=U_{ab}; U_{kb}=U_{ba}; U_c=0;$   
 при  $\varphi \geq 41$   $U_{ka}=0; U_{kb}=0; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 47$   $U_{ka}=U_{ab}; U_{kb}=U_{ba}; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 50$   $U_{ka}=U_a; U_{kb}=U_b; U_{kc}=U_c;$   
 при  $\varphi \geq 52$   $U_{ka}=U_{ac}; U_{kb}=0; U_{kc}=U_{ca};$   
 при  $\varphi \geq 55$   $U_{ka}=0; U_{kb}=0; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 61$   $U_{ka}=U_{ac}; U_{kb}=0; U_{kc}=U_{ca};$   
 при  $\varphi \geq 64$   $U_{ka}=U_a; U_{kb}=U_b; U_{kc}=U_c;$   
 при  $\varphi \geq 66$   $U_{ka}=0; U_{kb}=U_{bc}; U_{kc}=U_{cb};$   
 при  $\varphi \geq 69$   $U_{ka}=0; U_{kb}=0; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 75$   $U_{ka}=0; U_{kb}=U_{bc}; U_{kc}=U_{cb};$   
 при  $\varphi \geq 78$   $U_{ka}=U_a; U_{kb}=U_b; U_{kc}=U_c;$   
 при  $\varphi \geq 80$   $U_{ka}=U_{ab}; U_{kb}=U_{ba}; U_{kc}=0;$   
 при  $\varphi \geq 83$   $U_{ka}=0; U_{kb}=0; U_{kc}=0;$

На основании данных зависимостей разработана программа модели квазичастотного коммутатора на языке MATLAB и оформлена в виде блоков S-функций (блок 2,3,4).

Полученная модель позволяет исследовать электромеханические параметры асинхронного электропривода в режиме квазичастотного электропитания. В частности, для  $f_m = 7,14$  Гц получены диаграммы изменения параметров системы. На рис. 3.21 - 3.24 представлены зависимости отношений мгновенного значения квазисинусоидального фазного тока  $I_{кв.ф.}$  к действующему значению пускового тока АД  $I_n$ .

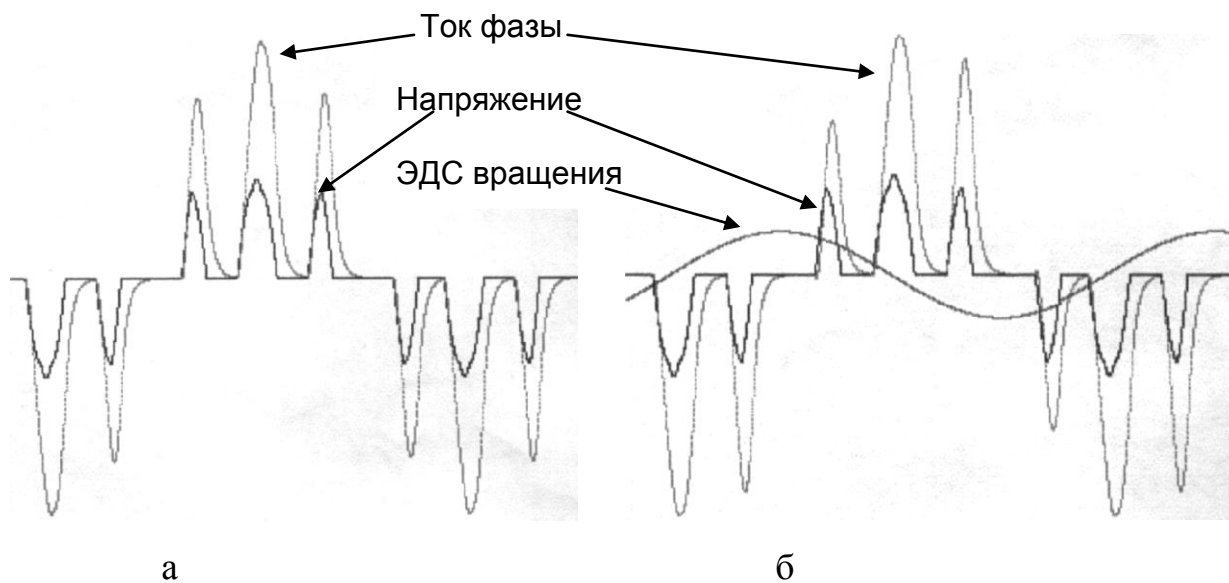


Рисунок 3.21 - Диаграммы фазных токов, напряжения и ЭДС вращения АД: а – ротор неподвижен; б – ротор вращается

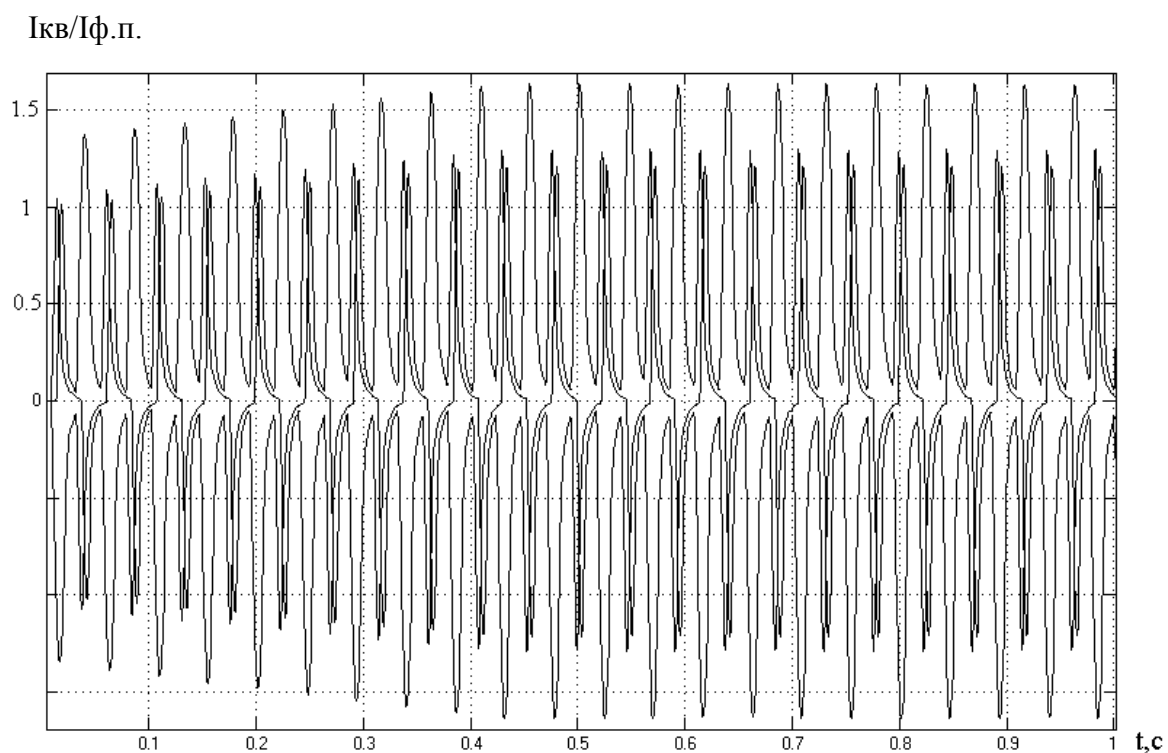


Рисунок 3.22 – Осциллограмма фазных токов АД при пуске

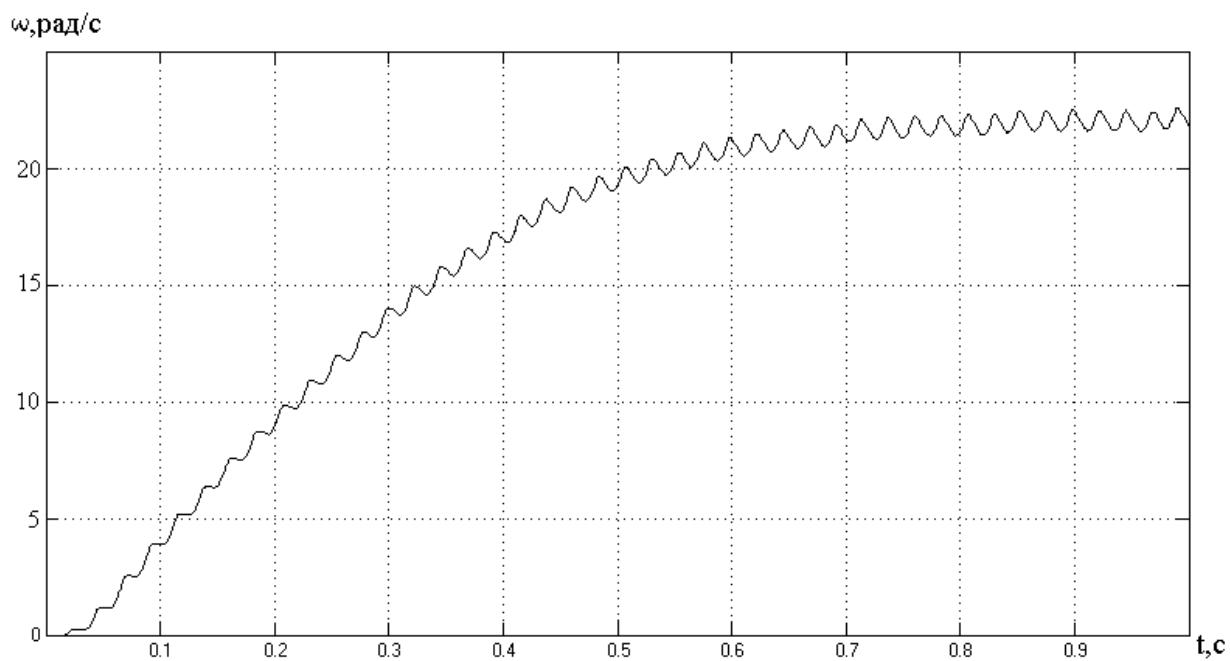


Рисунок 3.23 - Тахограмма разгона ротора АД при  $f_m = 7,14$  Гц

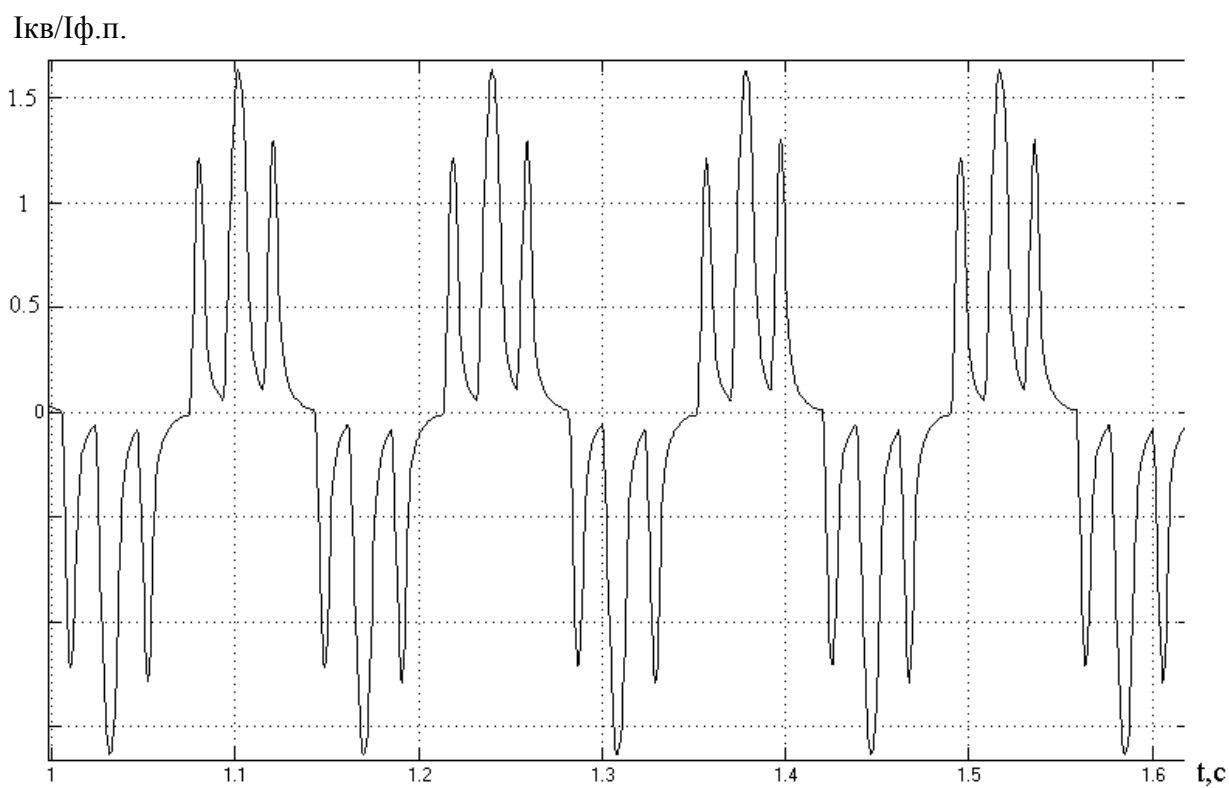


Рисунок 3.24 - Осциллограмма установившегося фазного тока

Из осциллограмм видно, что процесс работы характеризуется повышенными рабочими токами, вследствие наличия составляющих вращающегося магнитного поля, направление движения которых противоположно направлению вращения ротора АД [104].

Составляющие МДС двигателя, представленные в двухмерной системе координат как функции статорных токов (рис.3.25), рассчитаны по зависимостям [106, 107]:

$$I_{wx} := I_b * \omega * \cos(\pi/6) - I_c * \omega * \cos(\pi/6); \quad (3.50)$$

$$I_{wy} := I_a * \omega - I_b * \omega * \cos(\pi/3) - I_c * 3 * \cos(\pi/3); \quad (3.51)$$

где  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  – фазные токи,  $\omega$  – количество витков статорной обмотки.

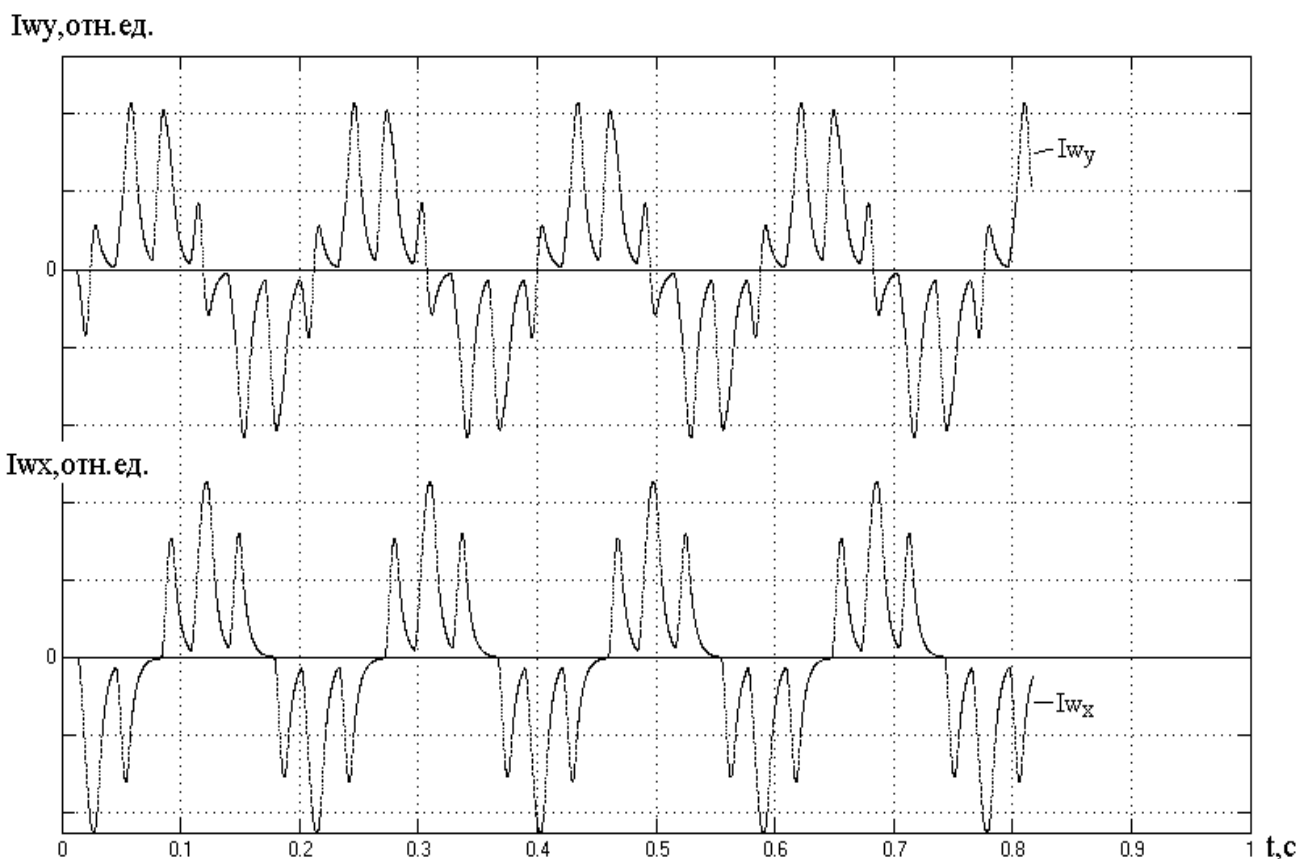


Рисунок 3.25 – Осциллограммы МДС асинхронного двигателя при квазичастотном управлении.

Траектория вектора МДС, модуль которого равен:  $I_w = \sqrt{(I_w)_y^2 + (I_w)_x^2}$ , а угол равен:  $\alpha = \arctg(I_w)_y / (I_w)_x$  показан на рис. 3.26.

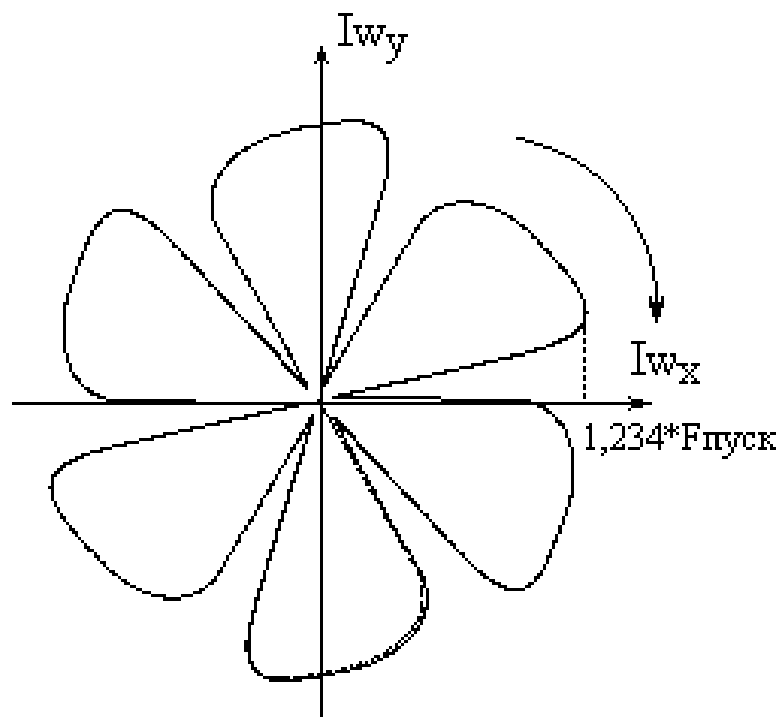


Рисунок 3.26 – Траектория вектора результирующей МДС АД в установившемся режиме квазичастотного управления

Из диаграммы видно, что величина модуля вращающейся МДС подвержена значительным колебаниям. Это отрицательно сказывается на равномерности вращающего момента двигателя и выражается в виде возмущающей переменного момента на валу двигателя. Выявленный характер колебаний момента в результате исследования модели системы (рис. 3.19) оказывает воздействие на уровень стабильности величины частоты вращения ротора (рис. 3.23), что коррелируется с результатами предварительных исследований процессов (рис.3.15-3.18).

Важной преградой промышленному распространению квазичастотного способа управления асинхронным электроприводом является повышенный потребляемый ток. Из результатов моделирования следует, что его действующее значение превышает в 1,2 раза величину пускового квазичастотного тока АД и в



1,2576 раза превышает величину номинального пускового тока двигателя (при  $f_m=7,14$  Гц).

Возможными решениями в этом случае могут быть:

- подключение дополнительных реактивных токоограничивающих элементов в цепь статора АД;
- автоматическая стабилизация потребляемого тока путем коррекции продолжительности проводящего состояния вентилях квазичастотного преобразователя.

В последнем случае заявленная функция может быть реализована не путем задержки момента включения вентилях, а посредством их принудительного отключения в заданный момент времени, определяемый достижением действующим значением тока двигателя заданного значения. Поэтому в качестве силовых полупроводниковых приборов квазичастотного преобразователя целесообразно использовать силовые транзисторы (в частности, IGBT-структуры).

С целью изучения возможностей статических реактивных элементов дополним расчетную схему модели исследуемой электротехнической системы имитаторами последовательных индуктивностей, а так же соединённых в "звезду" и подключенных к статору АД конденсаторов (рис. 3.27). В зависимости от цели конкретного исследования индуктивности могут быть зашунтированы, а ёмкости – отключены. Модель позволяет варьировать параметры указанных реактивных элементов.

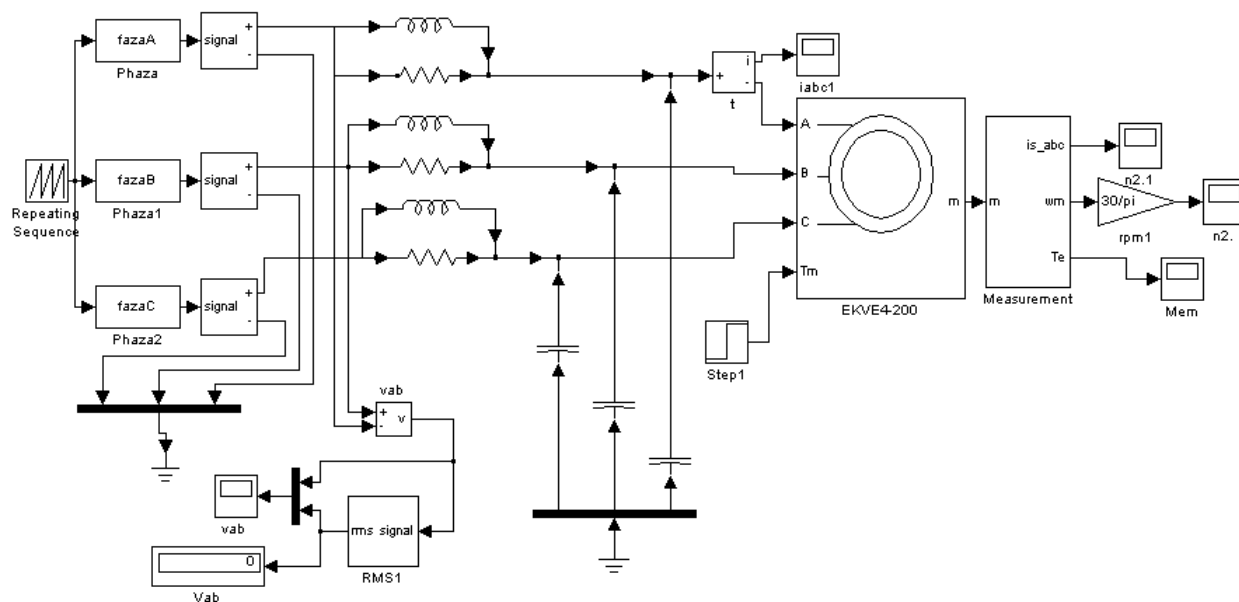


Рисунок 3.27 – Модель исследования влияния дополнительных индуктивностей и емкостей в фазных цепях

Полученные диаграммы процессов представлены на рис. 3.28 – 3.37.

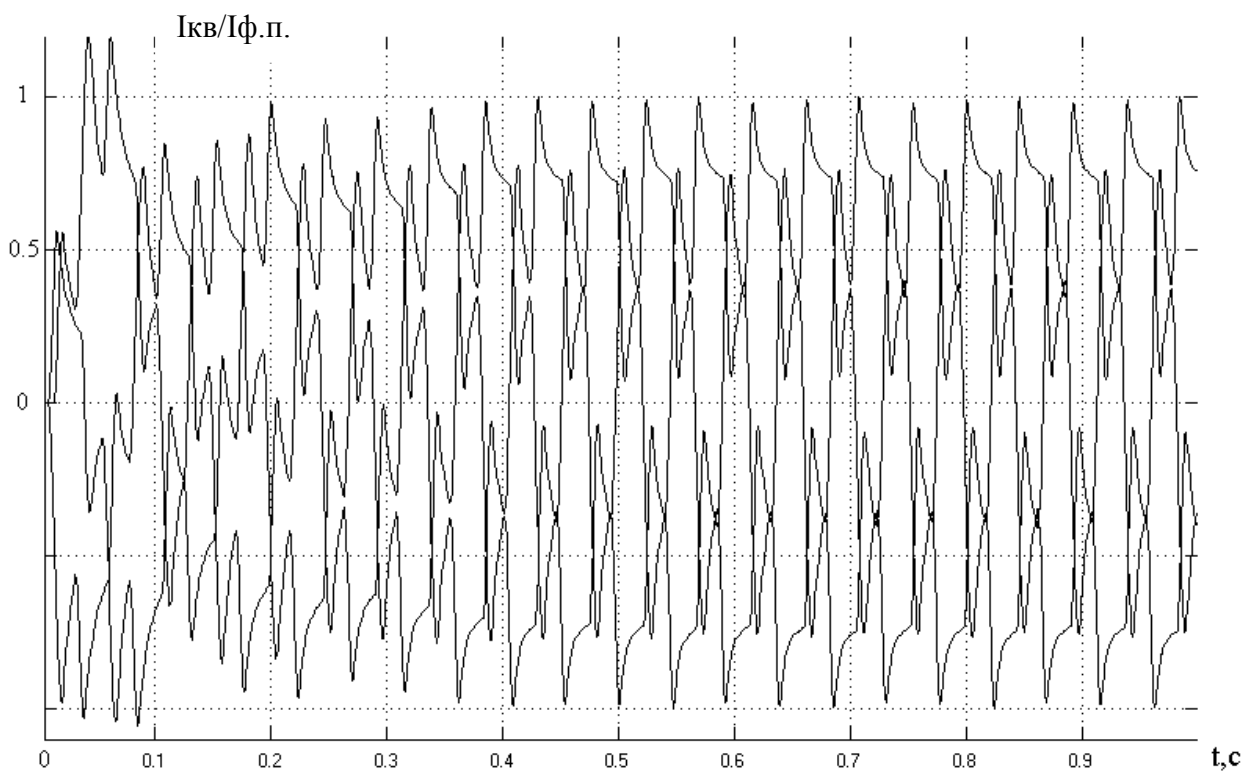


Рисунок 3.28 – Трехфазный ток при пуске ( $I_{kv}/I_{ф.п.}$ )  $L=0.003$  Гн,  $C=0$  мкФ,  $R=1000$  Ом

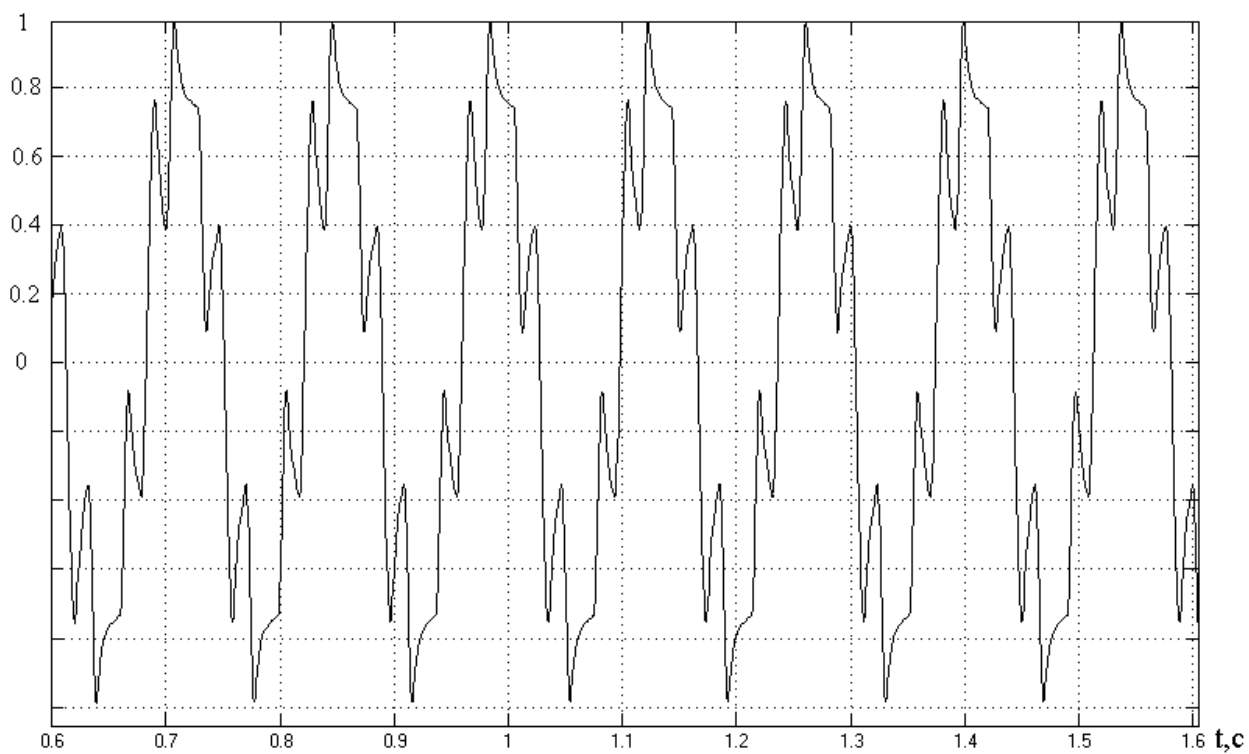


Рисунок 3.29 – Установившийся фазный ток ( $I_{kv}/I_{\phi.p}$ ):  $L=0.003$  Гн,  $C=0$  мкФ,  
 $R=1000$  Ом

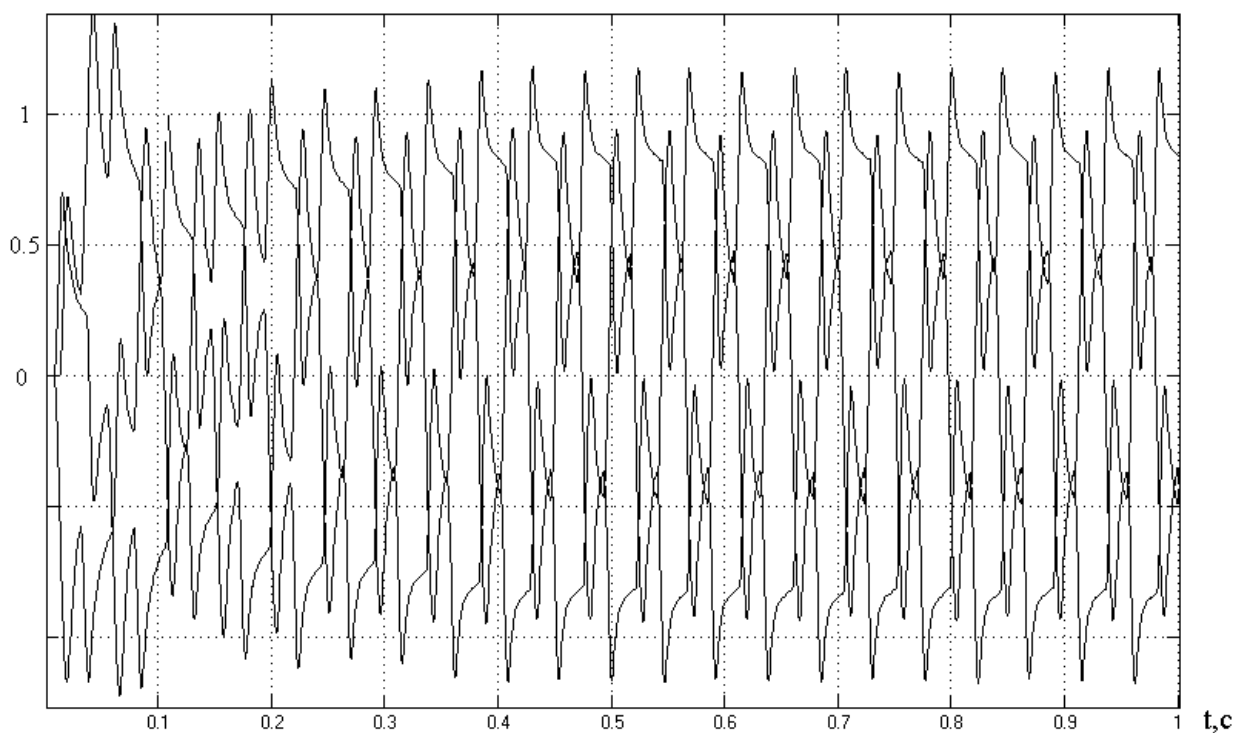


Рисунок 3.30 – Трехфазный ток при пуске ( $I_{kv}/I_{\phi.p}$ ):  $L=0.002$  Гн,  $C=0$  мкФ,  
 $R=1000$  Ом

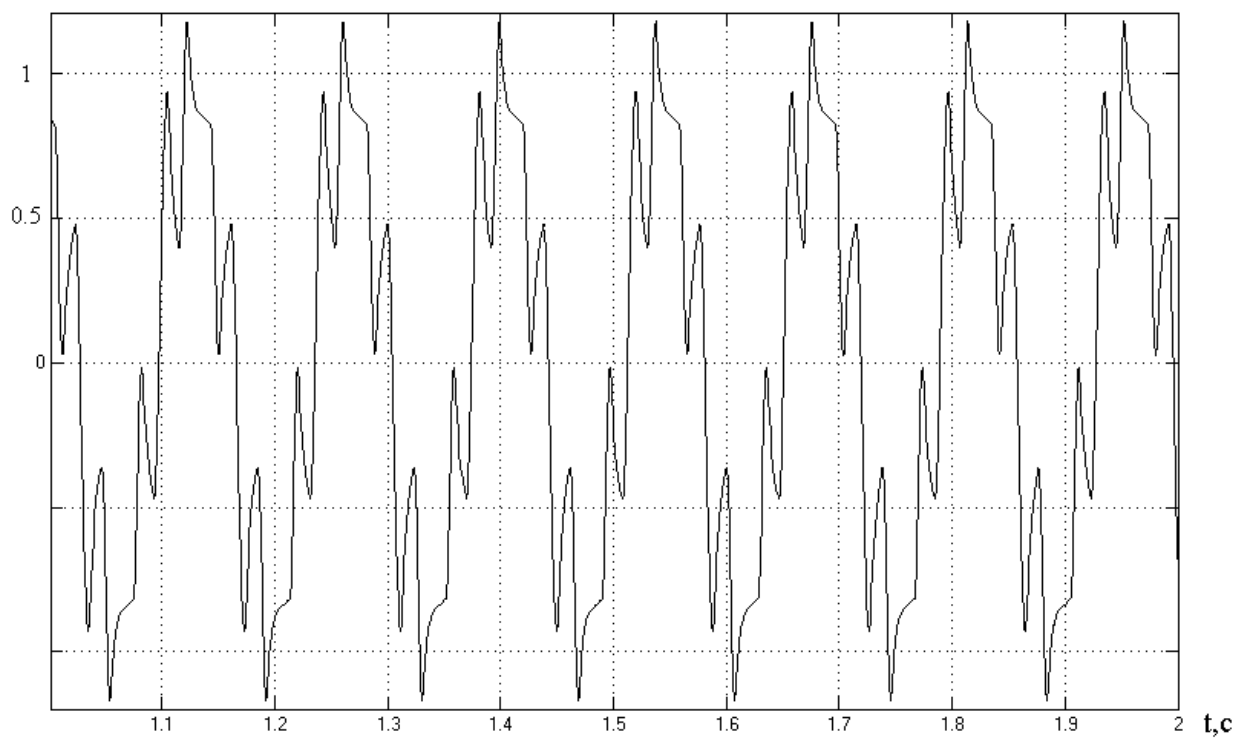


Рисунок 3.31 – Установившийся фазный ток ( $I_{kv}/I_{\phi.n}$ ):  $L=0.002$  Гн,  $C=0$  мкФ,  
 $R=1000$  Ом

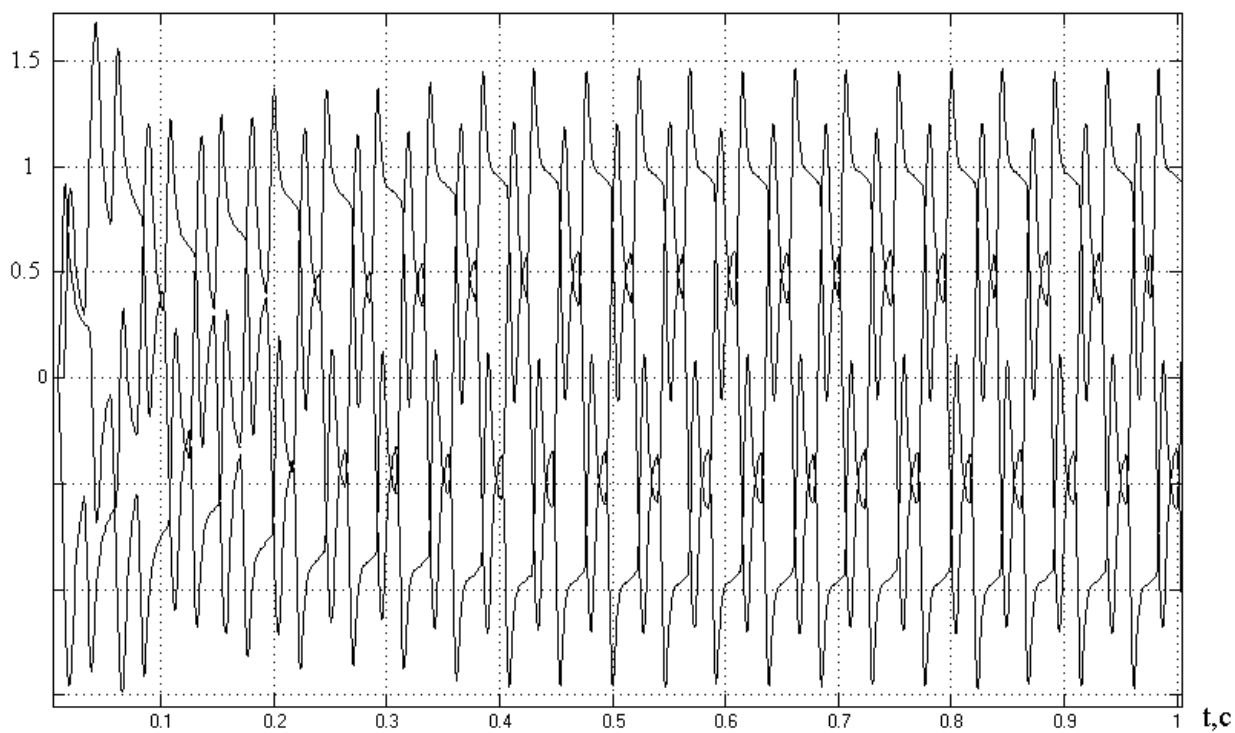


Рисунок 3.32 – Трехфазный ток при пуске ( $I_{кв}/I_{ф.п}$ ):  $L=0.001$  Гн,  $C=0$  мкФ,  
 $R=1000$  Ом

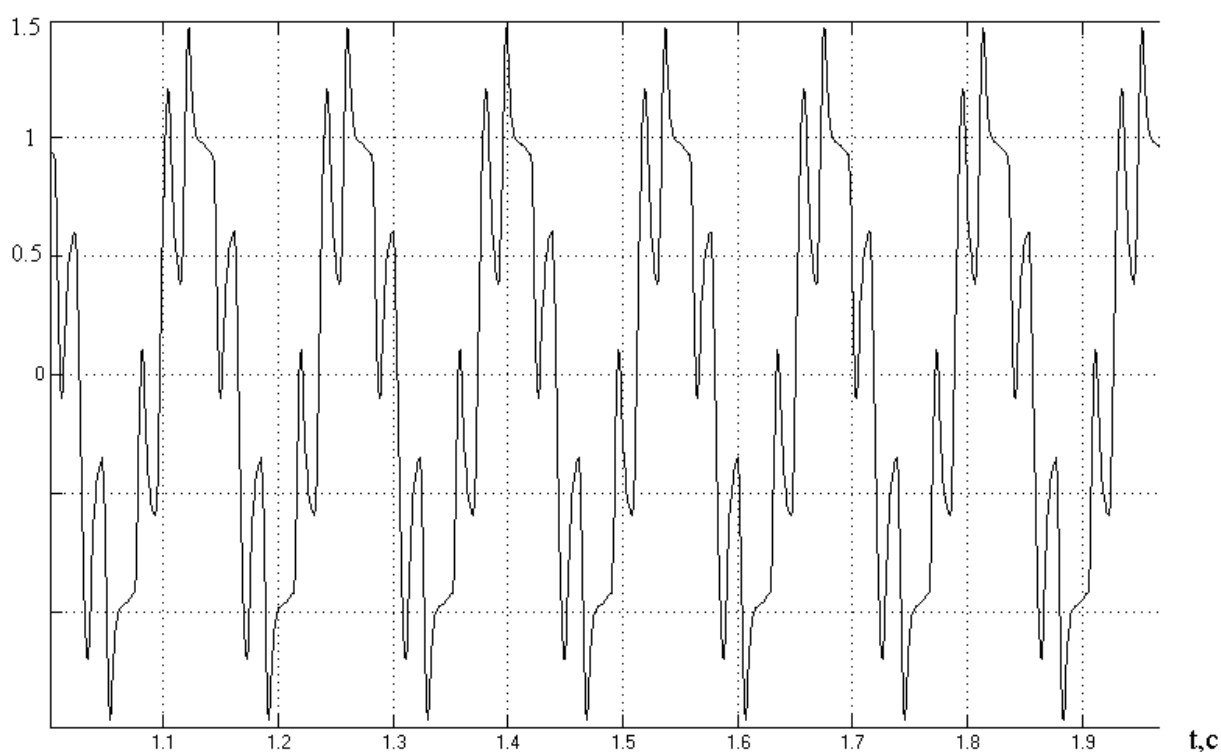


Рисунок 3.33 – Установившийся фазный ток ( $I_{кв}/I_{ф.п}$ ):  $L=0.001$  Гн,  $C=0$  мкФ,  
 $R=1000$  Ом

Данные обработки полученных диаграмм приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Зависимость отношения действующего значения фазного квазичастотного тока к действующему значению пускового тока от добавочной индуктивности

L, Гн	0	0.001	0.002	0.003
$I_{кв.д}/I_{кв.п}$	1.234	0.893	0.721	0.62

Из анализа данных табл.3.4 следует, что добавочная индуктивность существенно снижает действующее значение фазного тока электродвигателя (до 38%), а следовательно, уменьшается и нагрев последнего.

Как показали дальнейшие исследования, добавочная емкость не дает существенного снижения действующего значения фазного тока электродвигателя (рис.3.34, 3.35).

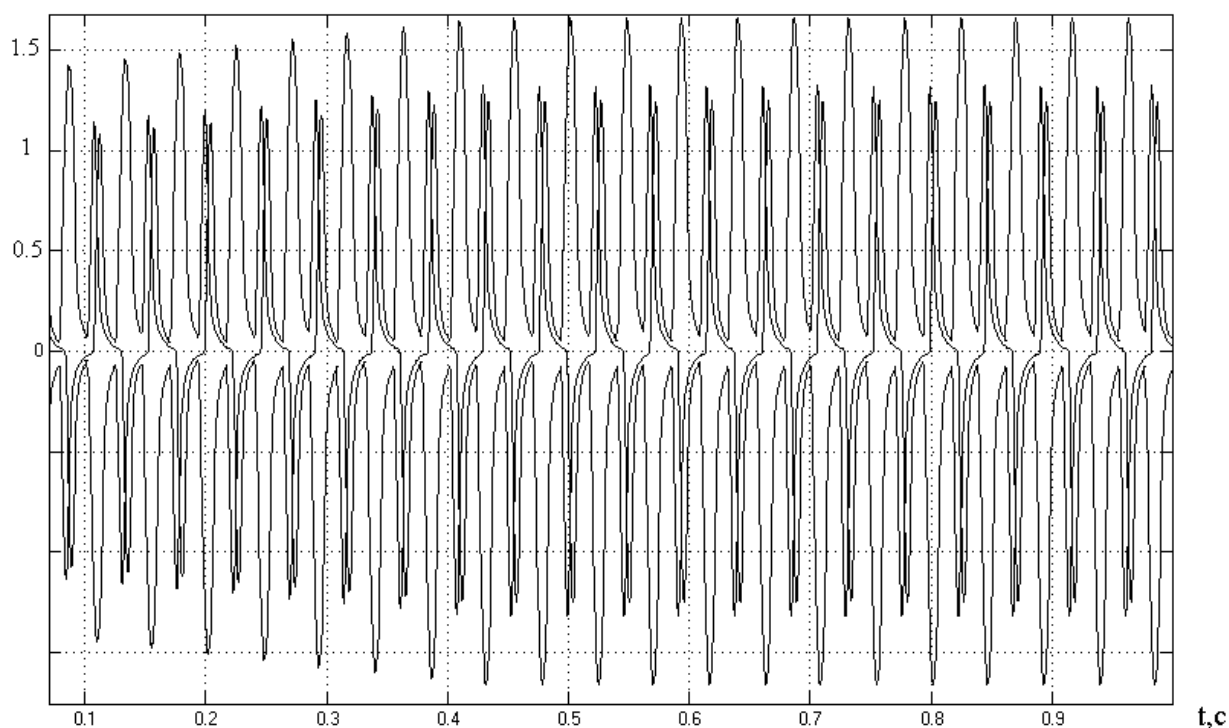


Рисунок 3.34 – Трехфазный ток при пуске ( $I_{кв}/I_{ф.п}$ ):  $L=0$  Гн,  $C=1000$  мкФ,  
 $R=0.3$  Ом

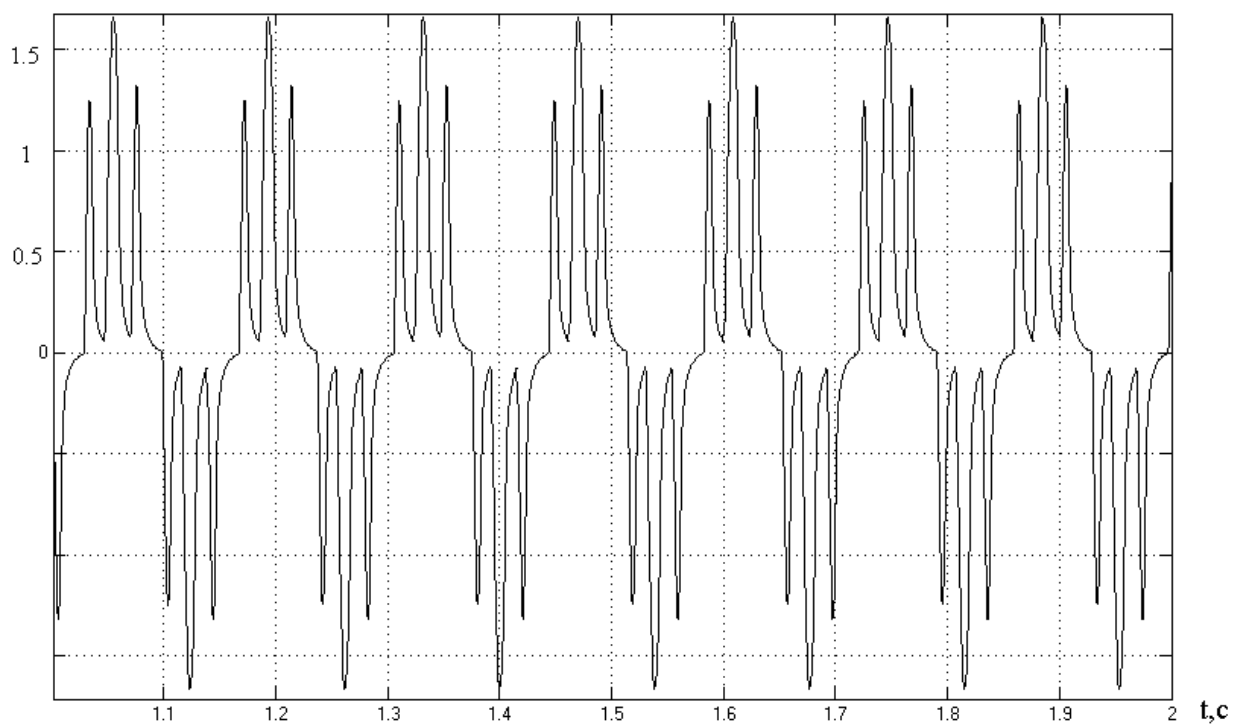


Рисунок 3.35 – Установившийся фазный ток ( $I_{кв}/I_{ф.п}$ ):  $L=0$  Гн,  $C=1000$  мкФ,  
 $R=0,3$  Ом

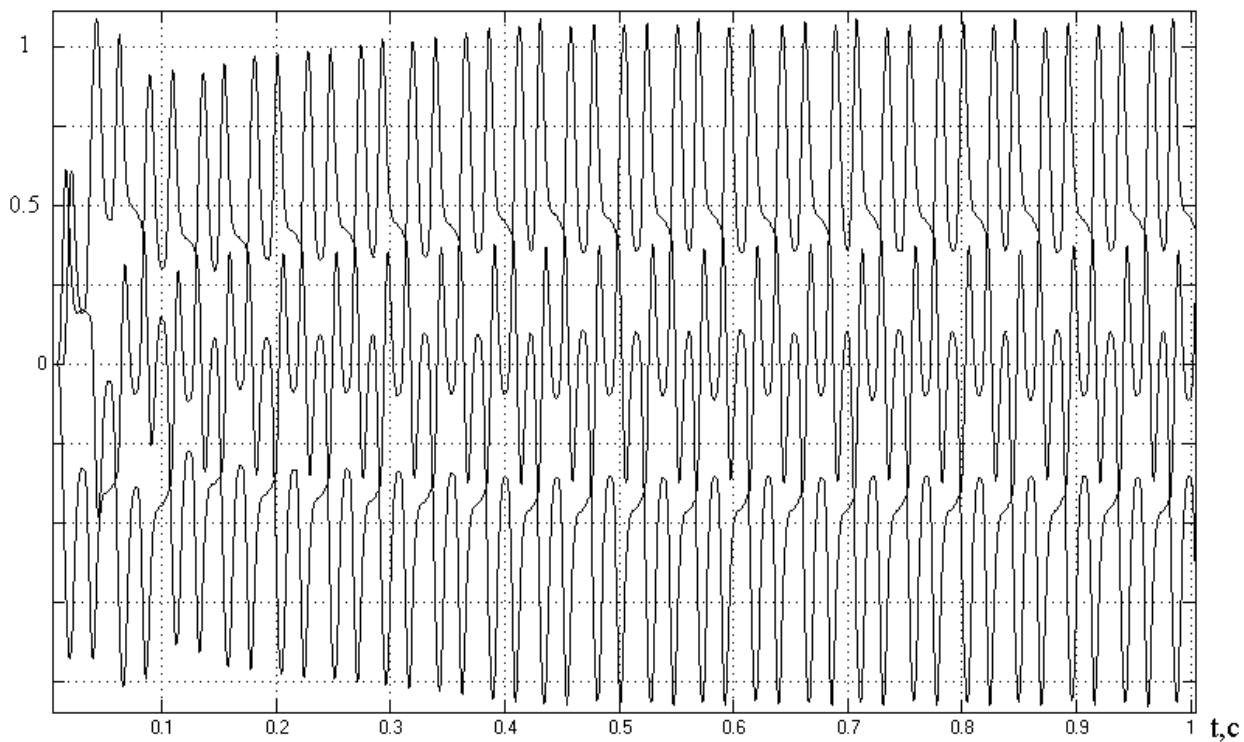


Рисунок 3.36 – Трехфазный ток ( $I_{кв}/I_{φ.п}$ ) при пуске:  $L=0.003$  Гн,  $C=10000$  мкФ,  
 $R=0.3$  Ом

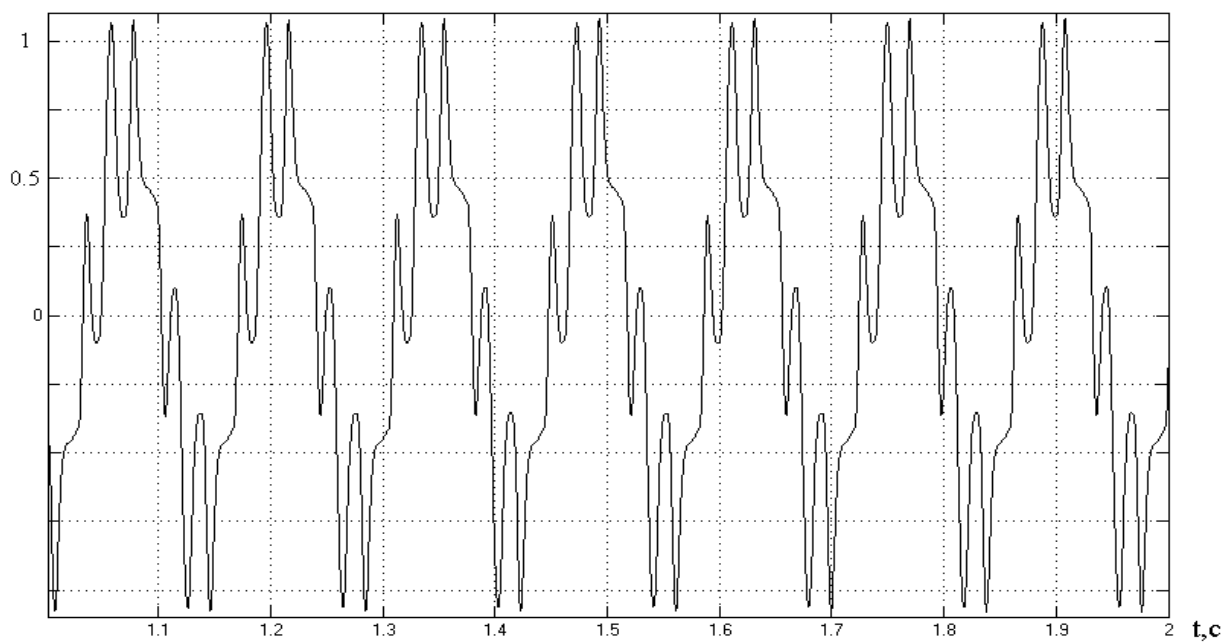


Рисунок 3.37 – Установившийся фазный ток ( $I_{кв}/I_{ф.п}$ ):  $L=0.003$  Гн,  $C=10000$  мкФ,  $R=0.3\Omega$

Принудительное отключение вентилях квазичастотного преобразователя моделируется путем обнуления фазных напряжений в определенные моменты времени на каждом интервале коммутации вентилях (табл. 3.3), в соответствии с диаграммой рис.3.38, откуда следует, что изменяя величину времени коммутации  $t_k$  можно регулировать действующее значение фазного напряжения.

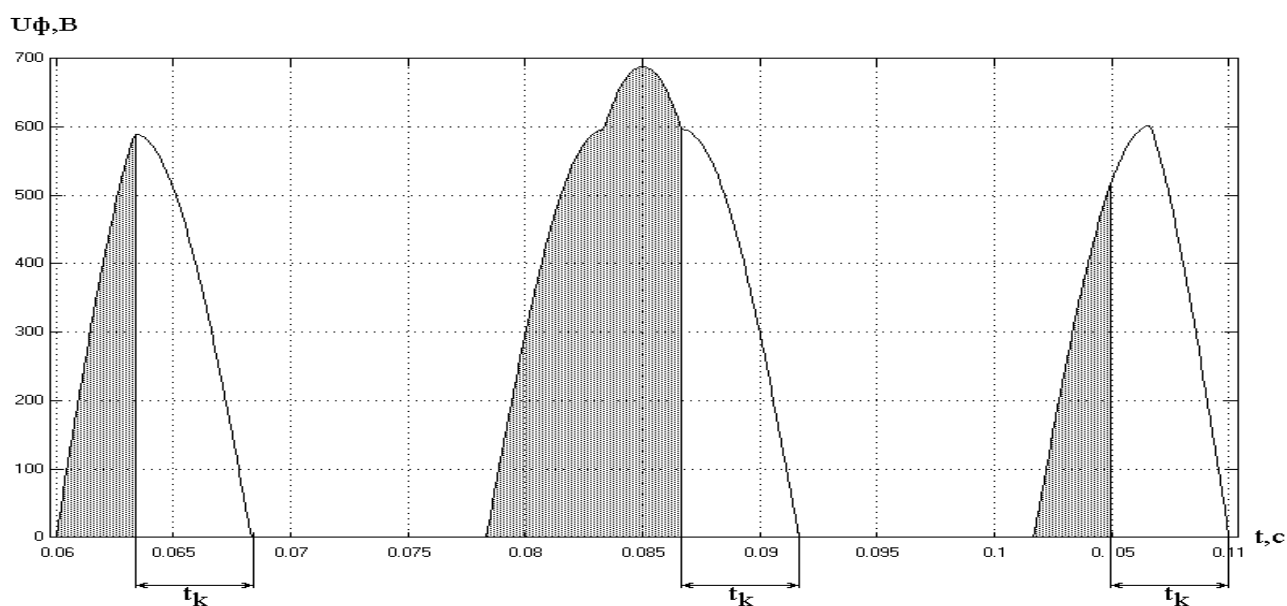


Рисунок 3.38 – Фрагмент фазного напряжения при принудительном отключении групп транзисторов квазичастотного преобразователя



На рис.3.39 – 3.42 представлены диаграммы, полученные при моделировании процесса принудительной коммутации тиристоров квазичастотного преобразователя.

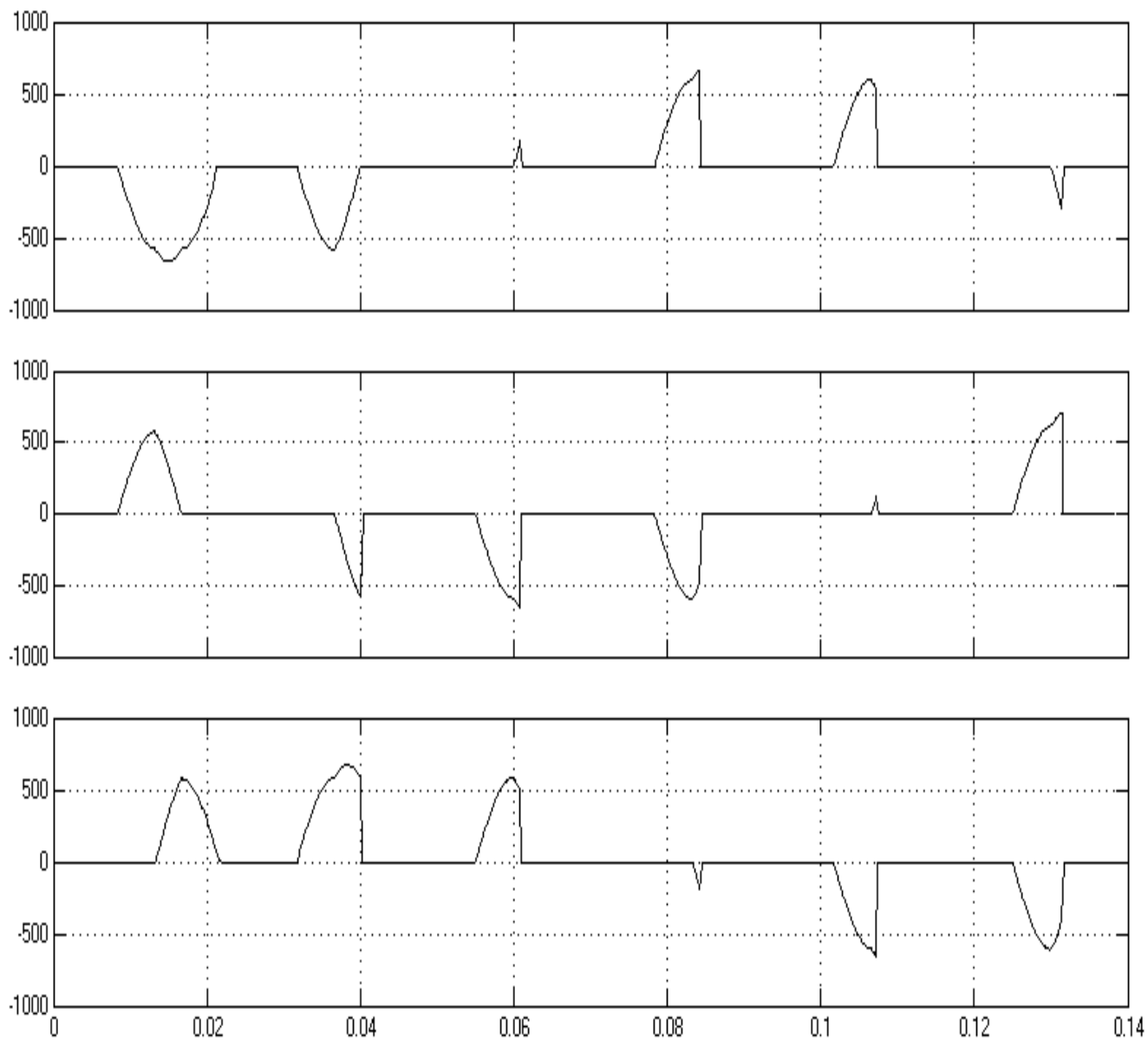
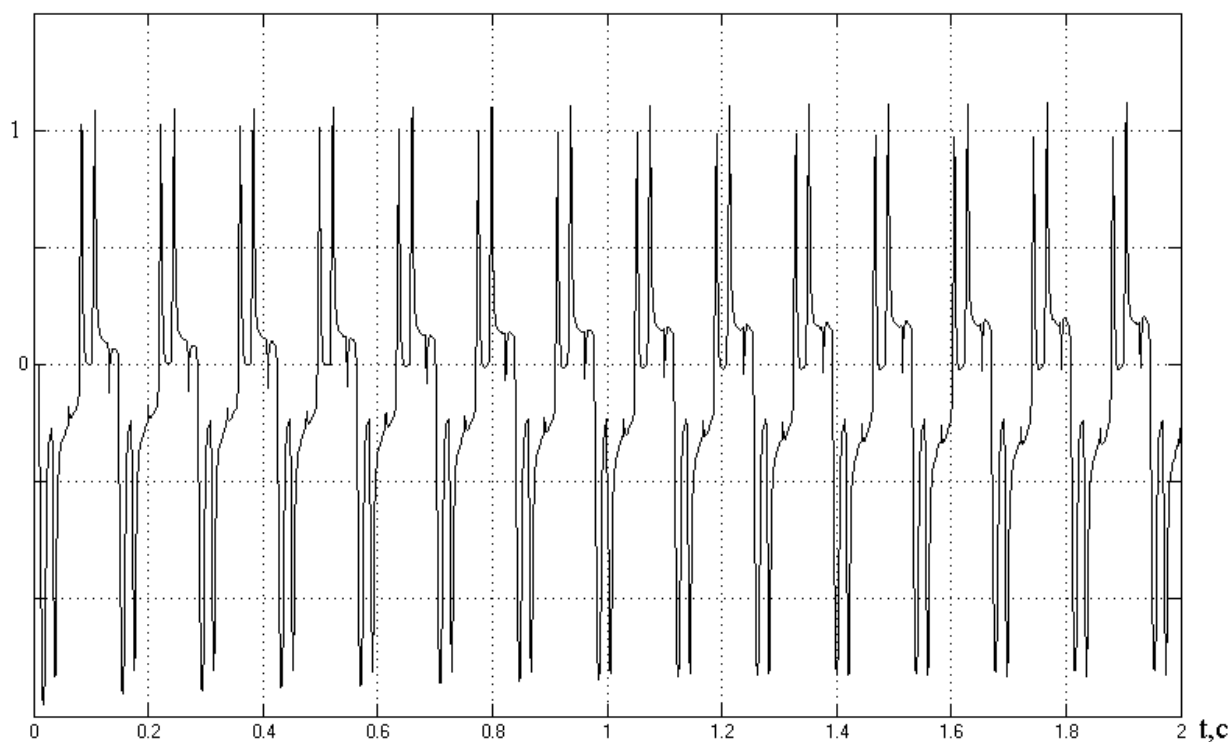
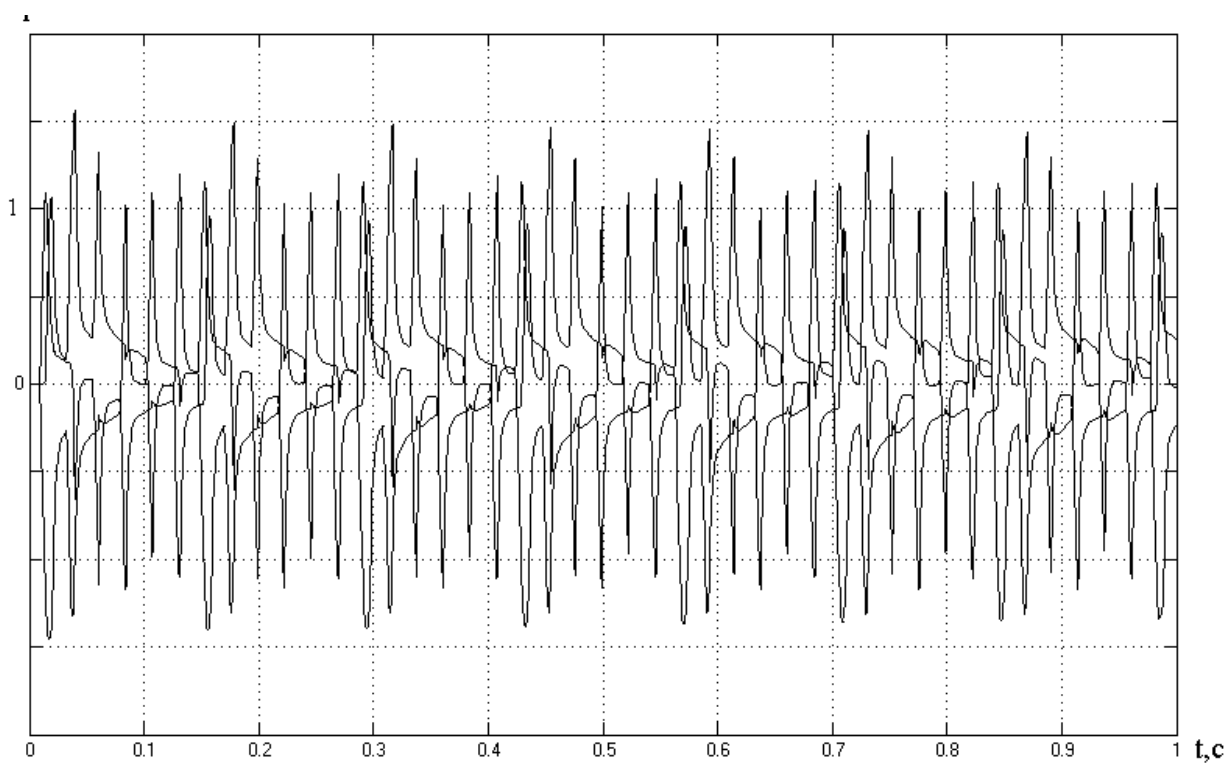


Рисунок 3.39 – Фазные напряжения при принудительном отключении групп транзисторов квазичастотного преобразователя

$I_{\phi}/I_{\text{кв.п}}$ Рисунок 3.40 – Трехфазный ток АД при пуске ( $I_{\text{кв}}/I_{\phi.п}$ )Рисунок 3.41 - Установившееся значение фазного тока АД ( $I_{\text{кв}}/I_{\phi.п}$ )

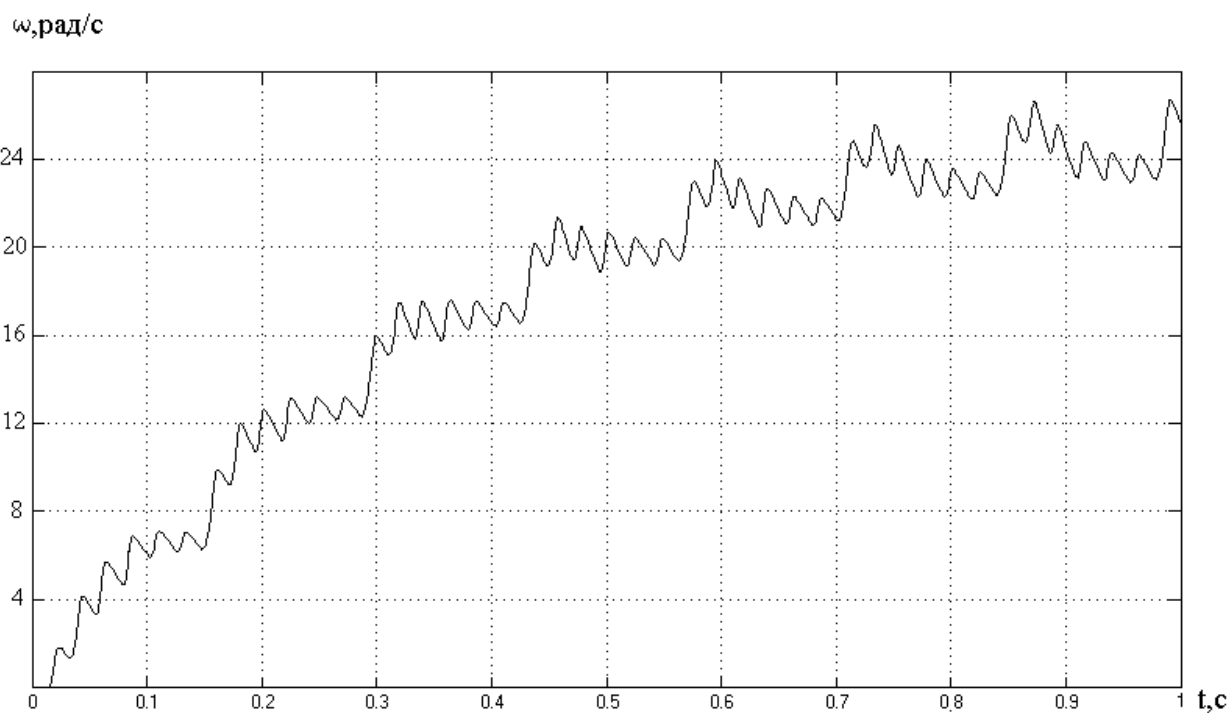


Рисунок 3.42 - Тахограмма пуска АД

Программа моделирования принудительной коммутации транзисторов квазичастотного преобразователя приведена ниже:

```

if u>=0.021055
  if u<=0.032
    Ua=0; Ub=0; Uc=0;
  end
end
if u>=0.04011
  if u<=0.05
    Ua=0; Ub=0; Uc=0;
  end
end
if u>=0.06085
  if u<=0.072
    Ua=0; Ub=0; Uc=0;
  end
end
if u>=0.08422
  if u<=0.1
    Ua=0; Ub=0; Uc=0;
  end
end

```

```

end
if u>=0.107275
  if u<=0.12
    Ua=0; Ub=0; Uc=0;
  end
end
if u>=0.13153
  if u<=0.15
    Ua=0; Ub=0; Uc=0;
  end
end
end

```

В табл. 3.5 и рис.3.43 приведены результаты обработки данных, полученных при моделировании фазных токов при фазовом управлении, из которых следует, что принудительная коммутация силовых вентилях квазичастотного преобразователя является эффективным методом снижения рабочих токов АД.

Таблица 3.5 – Отношения действующего значения квазичастотного фазного тока  $I_{кв.д}$  к действующему значению квазичастотного фазного тока  $I_{кв.х}$  двигателя при холостом ходе

$t_k, c$	0	0.0017	0.0034	0.0051	0.0068
$I_{кв.д}/I_{кв.х}$	1	0.94	0.78	0.54	0.31

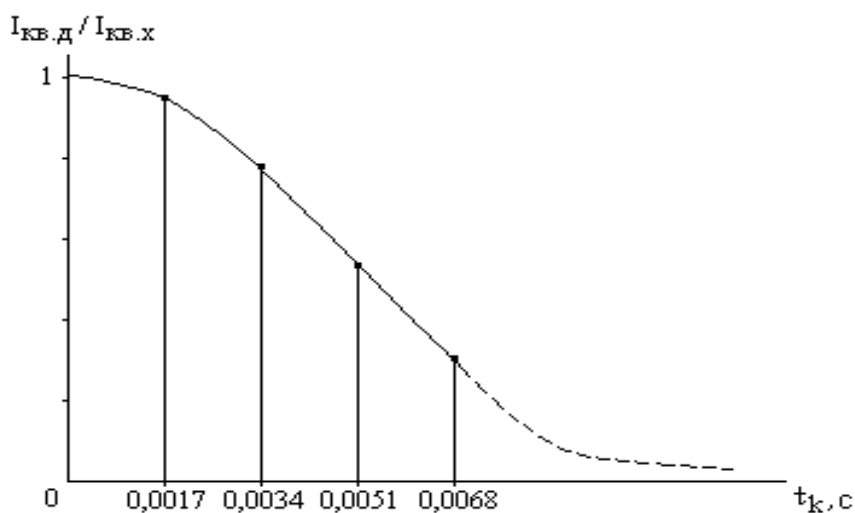


Рисунок 3.43 – График зависимости отношения действующего значения квазичастотного фазного тока  $I_{кв.д}$  АД к действующему значению квазичастотного фазного тока  $I_{кв.х}$  в режиме холостого хода

### 3.7 Выводы

Принятые обоснования и допущения в своей совокупности позволили создать математическое описание процессов в системе "квазичастотный преобразователь – асинхронный двигатель", отличающееся комплексным учетом влияния электромагнитных и электромеханических параметров асинхронного двигателя, и обосновать компьютерную модель, позволяющую в рамках одной структурной схемы реализовать различные способы управления работой АД.

Установлен характер изменения траектории вектора результирующей МДС асинхронного двигателя, которая в квазичастотном режиме электропитания носит пульсирующий характер и определяет параметры пульсации электромагнитного момента АД, а также амплитудно-фазовые параметры ЭДС вращения, индуцируемой в обмотке статора.

Моделированием установлен характер изменения квазисинусоидального тока в процессе разгона АД. В частности, учёт электромагнитных процессов в АД позволяет установить закономерность роста амплитуды квазисинусоидального тока в процессе увеличения частоты вращения ротора, что адекватно известным экспериментальным данным.

Установлено, что подключение к цепи статора АД трёхфазной реактивной нагрузки не оказывает влияния на смещение фазы ЭДС вращения и не может выполнять функции ограничения квазисинусоидального тока.

Установлены следующие способы ограничения потребляемого АД квазисинусоидального тока:

- введение фазовых задержек на включение комбинаций силовых полупроводниковых приборов квазичастотного преобразователя (комбинированное управление квазичастотным преобразователем);
- включение последовательно с цепью статора реактивной нагрузки;
- ограничение продолжительности интервала проводимости силовых полупроводниковых приборов квазичастотного преобразователя путём принудительного их отключения на каждом из интервалов коммутации нагрузки.

Уточнен коэффициент соотношения частоты напряжения сети и частоты квазисинусоидального напряжения, при котором достигается симметрия последнего в фазах и полуволнах.

Установлено, что в процессе реализации выявленных способов ограничения квазисинусоидального тока увеличиваются колебательные составляющие момента и частоты вращения ротора АД, что позволяет сделать вывод о приемлемости реализации способа квазичастотного управления применительно к электроприводу с повышенным моментом инерции подвижных элементов кинематической цепи электропривода.

## ВЫВОДЫ

В ходе решения поставленных задач получил дальнейшее развитие метод построения объектных моделей классов технологических машин, ориентированных на использование в задачах концептуального проектирования систем управления. Отличительной особенностью метода является введение в объектные модели дополнительных связей между классами, отражающих информационные и энергосиловые взаимодействия.

Произведено аналитическое обобщение характеристических признаков рабочего цикла класса технологических машин, названных летучими механизмами. Из выделенных на основании ключевых абстракций подклассов ЛМ для дальнейшего исследования выбран подкласс ЛП.

Построена объектная модель класса "Летучий механизм". Она позволяет отразить всю совокупность наиболее существенных признаков и отношений, структурные аспекты суперкласса ЛМ, дает возможность установить состав и характер конструктивно-технологических признаков, передаваемых путем множественного наследования экземплярам классов нижнего уровня, которым соответствуют конкретные ЛМ (ЛП, ЛН и т.п.). Использование линий наследования с целью обобщения и распространения удачных решений позволяет обеспечить общность элементов разработок для разных подклассов ЛМ. Указанное обстоятельство обеспечивает снижение ресурсоемкости летучих механизмов, в частности, их систем управления, на этапе проектирования.

Составлена технологическая схема классообразующей летучей пилы с возвратно-поступательным движением несущего органа, описан ее рабочий цикл, состоящий из пяти последовательно исполняемых этапов. Произведены ситуационный анализ рабочего цикла летучей пилы и сигнальный анализ в системе управления летучей пилы. Это позволило сформировать набор логических сигналов (переменных), необходимых для контроля текущего состояния ЛП в течение рабочего цикла, и построить правила логического вывода для получения командных сигналов. Полученный набор логических переменных и предложенные правила

логического вывода могут служить концептуальной основой для последующих этапов разработки СУЛП.

Представлена объектная модель класса "Летучий механизм", имеющая в своем составе классы, относящиеся к подклассу "Летучая пила" с возвратно-поступательным движением несущего органа. В данной модели отражены связи между классами, существенные атрибуты и методы классов. Данная модель является фрагментом полной модели класса ЛМ, для классов которой в рамках данного исследования отсутствует возможность определения в полном объеме атрибутов и методов. Представленная модель отражает конструктивно-технологическую сущность ЛП как подкласса ЛМ, определяет состав ИМ и их характеристики, позволяет исследовать отношения между классом ЛП и абстрактным суперклассом ЛМ. Последнее обстоятельство придает ценность данной модели с точки зрения ресурсосбережения на этапе проектирования в рамках класса ЛМ. Данная модель служит основой при построении объектной модели класса "Летучая пила".

Построена объектная модель класса "Летучая пила", в которой в виде соответствующих классов и отношений между ними отражены сущности, относящиеся к управлению ЛП. Отличительной особенностью данной модели является введение дополнительных связей между классами, отражающих информационные и энергосиловые взаимодействия, что позволило разделить соответствующие отношения. В модели отражено иерархическое построение ЛП и входящих в ее состав ИМ, и соответствующее ему иерархическое соподчинение СУ. Данная модель служит основой при построении объектной модели класса "Система управления летучей пилой".

Построена объектная модель класса "Система управления летучей пилой", в которой отражены классы, имеющие непосредственное отношение к СУЛП. Данная модель может быть легко преобразована в структурную схему СУ и служит достаточным основанием для разработки функциональной схемы. Непосредственная связь указанных структурной и функциональной схем с объектными моделями обеспечивает ресурсосбережение при проектировании соответствующих систем.



Построено математическое описание процессов в системе "квазичастотный преобразователь – асинхронный двигатель", отличающееся комплексным учетом влияния электромагнитных и электромеханических параметров асинхронного двигателя, создана компьютерная модель, позволяющую в рамках одной структурной схемы реализовать различные способы управления работой АД.

Установлен характер изменения траектории вектора результирующей МДС асинхронного двигателя, которая в квазичастотном режиме электропитания носит пульсирующий характер и определяет параметры пульсации электромагнитного момента АД, а также амплитудно-фазовые параметры ЭДС вращения, индуцируемой в обмотке статора.

Моделированием установлен характер изменения квазисинусоидального тока в процессе разгона АД. В частности, учёт электромагнитных процессов в АД позволяет установить закономерность роста амплитуды квазисинусоидального тока в процессе увеличения частоты вращения ротора, что адекватно известным экспериментальным данным.

Установлено, что подключение к цепи статора АД трёхфазной реактивной нагрузки не оказывает влияния на смещение фазы ЭДС вращения и не может выполнять функции ограничения квазисинусоидального тока.

Установлены следующие способы ограничения потребляемого АД квазисинусоидального тока:

- введение фазовых задержек на включение комбинаций силовых полупроводниковых приборов квазичастотного преобразователя (комбинированное управление квазичастотным преобразователем);
- включение последовательно с цепью статора реактивной нагрузки;
- ограничение продолжительности интервала проводимости силовых полупроводниковых приборов квазичастотного преобразователя путём принудительного их отключения на каждом из интервалов коммутации нагрузки.

Уточнен коэффициент соотношения частоты напряжения сети и частоты квазисинусоидального напряжения, при котором достигается симметрия последнего в фазах и полуволнах.

Установлено, что в процессе реализации выявленных способов ограничения квазисинусоидального тока увеличиваются колебательные составляющие момента и частоты вращения ротора АД, что позволяет сделать вывод о приемлемости реализации способа квазичастотного управления применительно к электроприводу с повышенным моментом инерции подвижных элементов кинематической цепи электропривода.

Результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе Сумского государственного университета. Это дало возможность повысить уровень подготовки специалистов с высшим образованием в области ресурсосбережения.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Евгеньев Г.Б. Системология инженерных знаний: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001. – 376 с.
2. Тимченко А.А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів: Основы САПР та системного проектирования складних об'єктів: Підручник/ За ред. В.І. Бикова. – 2-ге вид. – К.: Либідь, 2003. – 272 с.
3. Червяков В.Д., Паньч А.А. Летучие механизмы как класс рабочих машин в аспекте задач управления// Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ. – 1998. – Вып 3. – С.176-182.
4. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 3: Машины и агрегаты для производства и отделки проката/ Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
5. Технология прокатного производства труб: Учебное пособие/ Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А., Горелик В.С. – К.: Выща шк., 1989. – 311 с.
6. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов: Учебник для вузов – М.: Металлургия, 1990. – 352 с.
7. Технология прокатного производства: Справочник. В 2-х кн. Кн. 2/ Беняковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И. и др. – М.: Металлургия, 1991. – 423 с.
8. Механическое оборудование заводов по производству изделий с применением пластмасс и древесины: Учебник для вузов/ Сапожников М.Я., Гиберов З.Г. – М.: Высш. школа, 1976. – 384 с.
9. Современное производство древесностружечных и древесноволокнистых плит/ Мелони Т.: Пер. с англ. – М.: Лесн. пром-сть, 1982. – 416 с.
10. Оборудование предприятий для производства древесных плит: Учебник для вузов. – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 384 с.
11. Афанасьев В.Д. Электропривод автоматических летучих ножниц. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 144 с.

12. Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн.1/ Под ред. Ш. Нофа; Пер. с англ. – М: Машиностроение, 1989. – 480 с.
13. Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн.2/ Под ред. Ш. Нофа; Пер. с англ. – М: Машиностроение, 1990. – 480 с.
14. Автоматизация процессов машиностроения: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов/ Я. Буда, В. Гановски, В.С. Вихман и др./ Под ред. А.И. Дашенко. – М.: Высш. шк., 1991. – 480 с.
15. Базовая концепция энергетической политики России и Украины// Проблемы энергосбережения. – 1994. – №1. – С.17-78.
16. Комплексна державна програма енергозбереження України, схвалена Постановою Кабінету Міністрів України від 5 лютого 1997 року №148. – 220 с.
17. Програма енергозбереження та раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів в Сумській області на найближчі роки та перспективу до 2010 року, затверджена на засіданні науково-координаційної ради з енергозбереження від 28.10.1998, протокол №11. — 191 с.
18. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. – М.: Конкорд, 1992. – 519 с.
19. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 359 с.
20. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход. Пер. с польск. – М.: Мир, 1981. – 456 с.
21. Лямец В.И., Тевяшев А.Д. Системный анализ. Вводный курс: Учеб. пособие — Х.: Харк. держ. техн. ун-т радіоелектрон., 1998. — 252 с.
22. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К.:Кондор, 2005. – 408 с.
23. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
24. Справочник по автоматизированному электроприводу/ Под ред. В.А.Елисеева и А.В.Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

25. Криволапов А.Н., Костенко В.И., Островский Э.П. Энергосбережение и стандартизация как факторы энергетической безопасности — К.: Логос, 1998. — 76 с.
26. Эффективное энергоиспользование и альтернативная энергетика/ А.Н. Криволапов, И. Классен, Э.П. Островский, В.Ф. Резцов, И.И. Стоянова. — К.: Укр. энциклопед. знання, 2000. — 302 с.
27. Огурцов А.П., Мамаєв Л.М., Заліщук В.В. Енергозбереження як один з основних засобів захисту довкілля// Системні технології. — 2001. — №3. — С.151-164.
28. Жовтянський В.А. Енергозбереження: роль і місце в енергетичній стратегії України// Проблеми загальної енергетики. — 2001. — №5. — С.22-24.
29. Луговой А.В., Черный А.П. Вопросы практического энергосбережения промышленных предприятий// Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. Вып. 1. — Кременчуг: КГПИ. — 1998. — С.5-15.
30. Луговой А.В., Родькин Д.И., Сисюк Г.Ю., Басараб О.В. Вопросы и особенности создания региональной программы энергосбережения// Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 61. — Харків, ХДПУ, 1999. — С.325-327.
31. Луговой А.В., Родькин Д.И., Черный А.П. К теории энергосбережения средствами электропривода// Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. — Харьков: ХГПУ. — 1998. — С.172-174.
32. Гайсарян С.С. Объектно-ориентированные технологии проектирования прикладных программных систем. — Центр Информационных Технологий. <http://www.citforum.ru/>
33. Программирование на C++/ В.П. Аверкин, А.И. Бобровский, В.В.Веснич, В.Ф. Радущинский, А.Д. Хомоненко/ Под ред. проф. А.Д. Хомоненко. — СПб.: КОРОНАпринт, 1999. — 256 с.
34. Аджиев В. Объектная ориентация: философия и футурология. — <http://dibr.nnov.ru/etc/>

35. Крюков В.А. Анализ принципов объектно-ориентированного программирования// Микропроцессорные средства и системы. – 1989. – №2. – С.14-22.
36. Дэвид А. Марка, Клемент МакГоуэн. Методология структурного анализа и проектирования (SADT). – <http://lib.perm.ru>
37. Маторин С.И. О новом методе системологического анализа, согласованном с процедурой объектно-ориентированного проектирования. I// Кибернетика и системный анализ. — 2001. — №4. — С.119-132.
38. Маторин С.И. О новом методе системологического анализа, согласованном с процедурой объектно-ориентированного проектирования. II// Кибернетика и системный анализ. — 2002. — №1. — С.118-130.
39. Максимов М.В. Применение объектно-ориентированной методологии для проектирования модернизированной системы перегрузки ядерного топлива на АЭС с ВВЭР повышенной ядерной безопасности// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон: ХГТУ. – 1997. – №1. – С.162-173.
40. Майсян И.Г., Максимов М.В. Объектно-ориентированный анализ привода СУМП-1000МВ// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон: ХГТУ. – 1998. – №1. – С.158-165.
41. Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В., Кулик В.В. Розв'язання задач оптимального керування нормальними режимами електричних систем з використанням об'єктно-орієнтованого аналізу// Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – №1(22). – С.30-35.
42. Кисилевский Ф.Н., Долиненко В.В. Объектно-ориентированное программирование систем управления технологическим процессом сварки// Автоматическая сварка. — 2001. — №6. — С.43-49.
43. Звенигородский А.С. Объектно-ориентированная модель системы управления движением интеллектуального мобильного робота// Искусственный интеллект. — 2001. — №1. — С.177-182.

44. Северілов В.А., Боровська Т.Н. Принципи побудови модульних мехатронних систем// Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — №3. — С.22-28.
45. Теленик С.Ф., Глушко Є.В. Багаторівневий підхід до проектування управляючих вбудованих систем// Адаптивні системи автоматичного управління. — 2002. — №5. — С.145-151.
46. Мороз В.І. Застосування об'єктно-орієнтованого підходу в моделюванні керованих електромеханічних систем// Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Електроенергетика та електромеханічні системи. — 2000. — №400. — С.111-113.
47. Системы управления гибким автоматизированным производством/ Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А.А. Краснопрошиной. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. — 383 с.
48. Чус А.В., Данченко В.Н. Основы технического творчества. — Киев; Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1983. — 184 с.
49. Янч Эрих. Прогнозирование научно-технического прогресса: Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1974. — 587 с.
50. Кузнецов М.М., Усов Б.А., Стародубов В.С. Проектирование автоматизированного производственного оборудования. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
51. Каган Б.М. Электронные вычислительные машины и системы: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 592 с.
52. Воронов А.А., Титов В.К., Новогранов Б.Н. Основы теории автоматического регулирования и управления. Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. школа, 1977. — 519 с.
53. Фельдбаум А.А., Дудыкин А.Д., Мановцев А.П., Миролюбов Н.Н. Теоретические основы связи и управления. — М.: Физматгиз, 1963. — 932 с.
54. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. — К.: Либідь, 1997. — 544 с.

55. Буч. Г, Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 432с.
56. Мацяшек, Лешек, А. Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2002. – 432 с.
57. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
58. Сайт ОАО «Институт Цветметобработка» (Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский, проектный и конструкторский институт сплавов и обработки цветных металлов – Гипроцмо, Россия) – <http://www.cmet.ru>
59. Сайт ОАО "Первоуральский новотрубный завод" (Россия) – <http://www.pntz.ru>
60. Сайт Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института металлургического машиностроения ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова" (Россия) – <http://www.vniimetmash.ru>
61. Сайт ОАО "Костроматрубинвест – Волгореченский трубный завод" (Россия) – <http://www.vrpp.ru>
62. Сайт ЗАО "Никопольский завод бесшовных труб "NIKO TUBE" (Украина) – <http://www.interpipe.ua/pipe/nzbt>
63. Сайт ОАО "Челябинский трубопрокатный завод" (Россия) – <http://www.chtpz.ru>
64. Сайт ОАО "Нижнеднепровский трубопрокатный завод" (Украина) – <http://ntz.dp.ua>
65. Сайт ЗАО "Друза" (Россия) – <http://www.orcci.ru/druza>
66. Попович М.Г., Печеник М.В., Ковальчук О.В., Кіселичник О.І. Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи з асинхронним електроприводом// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний



- інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків, НТУ ХПІ, 2001. – С.314-318.
67. Андрищенко О.А., Бушер В.В., Шевченко С.Б. Энергетика векторного управления АД// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків, НТУ ХПІ, 2001. – С.323-325.
68. Радимов С.Н., Рябоконт А.В., Ющенко А.В. Энергетика пуско-тормозных режимов привода механизма поворота порталного крана// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків, НТУ ХПІ, 2001. – С.330-331.
69. Тукалов И.О., Асмолова Л.В. Сравнительный анализ энергетических затрат при различных законах изменения скорости привода летучих ножниц// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків, НТУ ХПІ, 2001. – С.360-362.
70. Коцюбинский В.С. Энергосбережение в электроприводе механизмов прокатных станов// Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – С.187-188.
71. Воинов В.В. Оптимизация переходных процессов методом желаемой переходной характеристики с использованием экспоненциальных зависимостей// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. – Харків, НТУ ХПІ, 2002. – С.134-137.
72. Костенко В.И., Коцегуб П.Х., Розкаряка П.И., Толочко О.И. Формирование оптимальных по нагреву диаграмм отработки заданных перемещений при наличии постоянного статического момента на валу двигателя// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. – Харків, НТУ ХПІ, 2002. – С.350-354.

73. Воинов В.В., Воинов В.П. Применение метода желаемых экспоненциальных характеристик при двухзонном переходном процессе регулирования скорости// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. – Харків, НТУ ХПІ, 2002. – С.424-427.
74. Сайт компании Hautau Tube Cutoff Systems (USA) – <http://www.hautau.com>
75. Сайт компании Tube Tech Machinery (Italy) – <http://digilander.iol.it/tubetechmachinery>
76. Сайт компании Tallyrand Industrial Systems, Inc. (USA) – <http://www.tallyrand.com>
77. Сайт компании Oto Mills (Italy) – <http://www.otomills.com>
78. Сайт компании Gallium Industries Ltd. (India) – <http://www.galliumindia.com>
79. Сайт компании Friedrich Kocks GmbH & Co. (Germany) – <http://www.kocksbremen.de>
80. Зарецкий М.Л., Прудков М.Л. Системы управления электроприводами режущих устройств на базе ОО НКУ// Тезисы докладов к четвертой научно-технической конференции "Автоматизированный электропривод прокатных станов". Март 1990 года. – Свердловск. – 1990. – С.66.
81. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. – 288 с.
82. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
83. Механика приводов прокатных станов/ Смирнов В.В., Яковлев Р.А. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.
84. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 168 с.
85. А.с. 1384351 СССР, МКИ В21 В37/06. Устройство для управления натяжением проката в непрерывной группе клетей мелкосортно-проволочного стана/ В.Д.

Червяков, И.А. Селиванов, И.В. Щекотова и др. (СССР). Оpubл. 30.03.88, Бюл. №12.

86. Паньч А.А., Червяков В.Д. Ситуационный анализ рабочего цикла летучей пилы// Праці П'ятої Української конференції з автоматичного управління "Автоматика-98" – ч.ІІІ – Київ: видавництво НТУУ КПІ. – 1998. – С.226-230.
87. Червяков В.Д., Паньч А.А. Сигнальный анализ в объектно-ориентированной системе управления летучей пилой// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон: ХГТУ. – 1999. – №1(4). – С.119-124.
88. Коцюбинский В.С., Смушинская И.В. Управление резкой горячего сортового проката// Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика/ Под общ. ред. В.Б.Клепикова, Л.В.Акимова. – Харьков: Основа. – 1997. – С.238-239.
89. Коцюбинский В.С. Адаптивная система управления металлообработкой// Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 61. – Харків: ХДПУ. – 1999. – С.225-228.
90. Закутний А.С., Коцюбинский В.С. Стабилизация процесса резания в металлообработке// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків: НТУ ХПІ, 2001. – С.235-237.
91. Коцюбинский В.С. Выбор мощности электропривода общепромышленных механизмов: Учебное пособие. – Алчевск: ДГМИ, 2002. – 150 с.
92. Терехов В.М. Современные способы управления и их применение в электроприводе// Электротехника. – 2000. – №2. – С.25-28.
93. Червяков В.Д., Паньч А.А. К построению объектной модели системы управления электроприводом несущего органа летучей пилы// Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. Вып. 1. – Кременчуг: КГПИ. – 2000. – С.281-286.
94. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

95. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
96. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. М.: Энергия, 1967.
97. Луговой А. В. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника. – 1999. – № 5.– С. 62 – 67.
98. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л. П. Петров, О. А. Андриященко, В. М. Капинос и др. М.: Энергоатомиздат. 1986.- 200 с.
99. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
100. Герман – Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебн. пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
101. Волков А. И., Каваре Ясер Хуссейн. Математическая модель тиристорного асинхронного электропривода в среде MATLAB // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2003. – №11(57). – С. 56 – 62.
102. А.с. 1288856 СССР, МКИ H02M7/00. Устройство для управления трехфазным полупроводниковым коммутатором квазисинусоидального напряжения/ И. Т. Сидоренко, К. Н. Маренич, В. В. Люсый (СССР). – №3814792/24-07. Заявл. 22.11.1984. Опубл. 07.02. 1987. – Бюл. №5.
103. Траубе Е. С. Рутберг Л. Н., Коринев Б. Л. и др. Алгоритм управления тиристорами пускорегулирующего устройства на базе реверсивного коммутатора и асинхронного короткозамкнутого двигателя / Электротехника, 1988, №7. – С.2 – 4
104. Фираго Б. И., Павлович С. Н. Выходное напряжение и ток преобразователя частоты с непосредственной связью при работе на асинхронный двигатель / Изв. Вузов СССР – Энергетика. – М., 1972. – № 3. – С. 33 – 39.
105. Каваре Ясер Хуссейн. Учет эффекта вытеснения тока в стержнях ротора асинхронного электропривода при его моделировании в среде MATLAB //

Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Електротехніка і енергетика. – 2003. – Вип. 67. – С.160 – 162.

106. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. Ш. Энергозбереження засобами промислового електропривода: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408с.
107. Фираго Б. И. Непосредственные преобразователи частоты в электроприводе. – Минск.: Издательство Университетское, 1990. – 255 с.
108. Королев А.А. Прокатные станы. Конструкция и расчет. – М.: Машгиз, 1958. – 451 с.
109. Зеленов А.Б., Тертичников В.Н., Гулякин В.Г. Под общ. ред. Зеленова А.Б. Электропривод механизмов прокатных станов. – Харьков: Metallurgizdat, 1963. – 344 с.
110. Автоматические системы управления технологическими процессами и установками прокатных цехов/ Ленович А.С. – М.: Metallurgiya, 1979. – 368 с.
111. Пат. 4444077 США, МКИ В27 В005/06; В23 D045/18. Flying saw apparatus/ Wise Robert J. (США); Geogia-Pacific Corporation. – №305715; Заявл. 25.09.81; Опубл. 24.04.84; НКИ 83/319; 83/285; 83/294.
112. Пат. 4640160 США, МКИ В27 В007/00. Sweep-data-responsive, high-speed, continuous-log-travel bucking apparatus/ Hards John E. (США); Brunette Machine Works, Ltd. – №806502; Заявл. 09.12.85; Опубл. 03.02.87; НКИ 83/71; 83/287; 83/289.

Приложение А  
Структурно-функциональный анализ суперкласса  
"Летучий механизм"

По области применения в промышленности нами установлены факты использования ЛМ в металлургическом производстве, деревообработке, машиностроении и во многих других производствах. Рассмотрим некоторые примеры их применения.

Одной из отраслей промышленности, где представлен класс ЛМ, является прокатное производство. На непрерывных прокатных станах широко применяются летучие ножницы (ЛН). С их помощью осуществляется мерный порез заготовок (например, на непрерывном листопрокатном стане). Порез осуществляется без принудительного изменения скорости движения обрабатываемого материала [4, 7, 11, 108-110]. При большом разнообразии конструкций ЛН общим для них является наличие НО (барабана, эксцентрика, кривошипа, планетарного механизма), на котором размещен ИМ, представляющий из себя режущий инструмент без привода – нож. Для ЛН характерно наличие двух НО с ножами (одним или двумя) на каждом из них. При механической синхронизации обеих НО они могут рассматриваться как один НО, приводимый в движение одним или несколькими двигателями [4, 11]. Срабатывание ИМ, т.е. сведение ножей, обеспечивается движением (вращением) НО. На современных прокатных станах выравнивание скоростей движения ножей и проката к началу процесса резания осуществляется за счет соответствующим образом организованного управления электроприводом НО [11]. При этом в зависимости от требуемой мерной длины и скорости движения проката в промежутках между резами происходит изменение скорости вращения привода НО как по величине (ускорение, замедление или останов), так и по знаку (реверсирование для возвращения ножей в исходное положение, обеспечивающего нормальный разгон НО перед резом).

В качестве примера рассмотрим кривошипные ЛН [4], кинематическая схема которых показана на рис.А.1. Кривошипно-шатунный механизм этих ЛН обеспечивает параллельно-горизонтальное движение ножей при разрезании металла. Ножи 5 укреплены на шатунах 2, которые шарнирно связаны с кривошипами 3 и рычагами 1. Синхронизация кривошипов в данном случае осуществлена механически с помощью шестерен 4. Привод кривошипов осуществлен от одного или нескольких электродвигателей 6 (в нашем примере двух). Конструкция ножниц может содержать также специальные тормозные устройства. Конструктивные исполнения передаточных устройств электропривода кривошипов разнообразны, но для рассмотрения вопросов управления ЛН это не имеет значения, поскольку в рассуждениях используются лишь два параметра привода – момент инерции и передаточное число. Применение многодвигательного электропривода может быть вынужденным при отсутствии жесткой механической связи между кривошипами, либо целесообразным с точки зрения снижения инерционности привода.

Рассмотренный ЛМ (ЛН) на одном из этапов своего рабочего цикла (во время

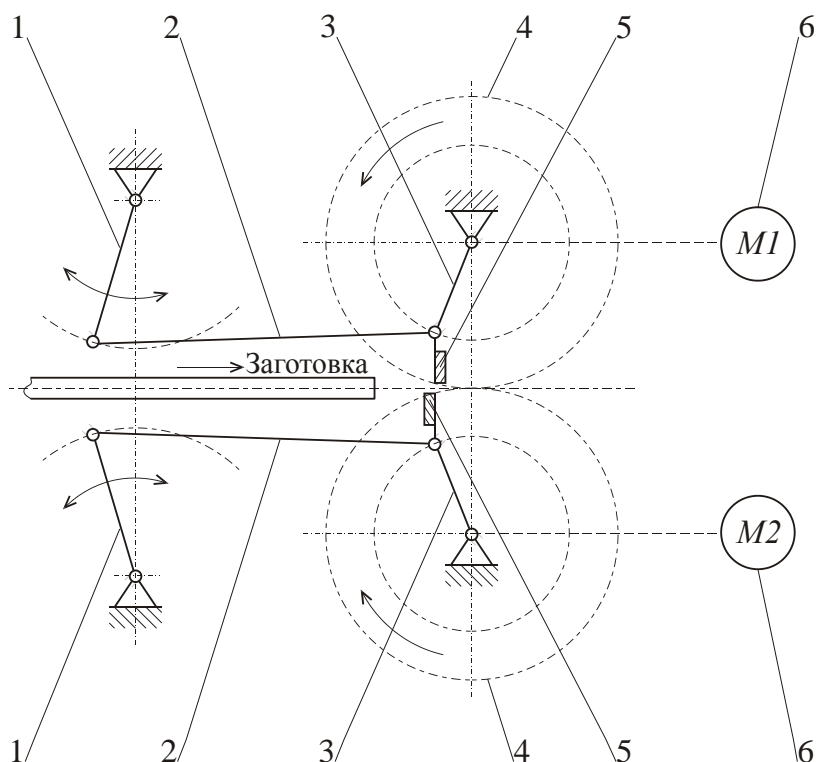


Рисунок А.1 – Кинематическая схема кривошипных летучих ножниц

резки) осуществляет жесткую механическую связь своего НО (кривошипов) с ОИ (прокатом) посредством ИМ (ножей). При этом возможно силовое воздействие ЛН на изделие за счет некоторого превышения скорости движения ножей над скоростью проката [11], что улучшает отделение отрезанной части проката.

При необходимости разрезания движущихся труб [4, 108, 109], сортового проката [4], гнутых профилей [7] в прокатном производстве применяются летучие пилы (ЛП). Рассмотрим работу ЛП для резки гнутого профиля, применяемой в агрегатах непрерывного профилирования. Упрощенная кинематическая схема ЛП показана на рис.А.2. НО (каретка) 5 приводится в движение электродвигателем 8 через редуктор 9 и шестеренно-реечную передачу. Путьевые выключатели 1 и 7 предназначены для сигнализации достижения кареткой допустимых крайних положений. Разрезание профиля 10 происходит при помощи ИМ, установленных на каретке и представляющих собой механизм 4 вращения (МВ) режущего инструмента 6 (дисковой пилы) и механизм 3 подачи (МП) режущего инструмента. На каретке 5 расположен также механизм 2 сцепления (МС) каретки с профилем 10, с помощью которого осуществляется жесткое механическое соединение ЛП с профилем в процессе резания (отнесем его также к числу ИМ). Диск 6 пилы приводится во вращение от электродвигателя, а приводы МП и МС обычно пневматические или гидравлические.

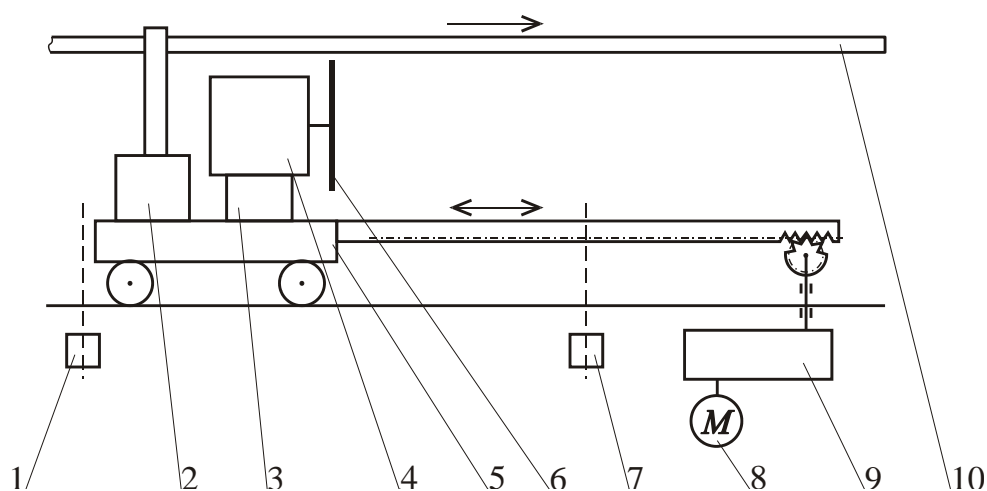


Рисунок А.2 – Кинематическая схема летучей пилы



В качестве ИМ, разрезающих трубу, применяются не только дисковые пилы, но и отрезные устройства с вращающейся головкой [4]. На рис.А.3 показаны два типа таких устройств, имеющих разные режущие инструменты, – дисковые ножи (а) и резцы (б). Для разрезания трубы головка приводится во вращение, а режущие инструменты, расположенные на ней, подаются на трубу. Причем, в случае с ножами происходит разделение металла без снятия стружки, в отличие от случая с резцами (как и с пильным диском).

Следует особо сказать об одном типе ЛП, применяемых, например, при непрерывной печной сварке труб [4, 108]. Здесь НО представляет из себя стол, непрерывно вращающийся в горизонтальной плоскости. На НО (столе) оппозитно расположены две дисковые пилы с механизмами вращения и особой конструкции МП. В составе установки имеется также стационарный механизм для приподнимания движущейся трубы к подающемуся диску пилы для ее разрезания. Все механизмы стола динамически уравновешены, что обеспечивает устойчивую работу пилы при больших скоростях. НО и МВ приводятся во вращение от электродвигателей, а другие ИМ – посредством механических передач от вращения НО. Особенности конструкции данной ЛП дают основания считать ее сходной с ЛН по типу движения НО.

При производстве труб большого диаметра путем свертывания под углом рулонной полосы в цилиндрическую трубную заготовку (с одновременным

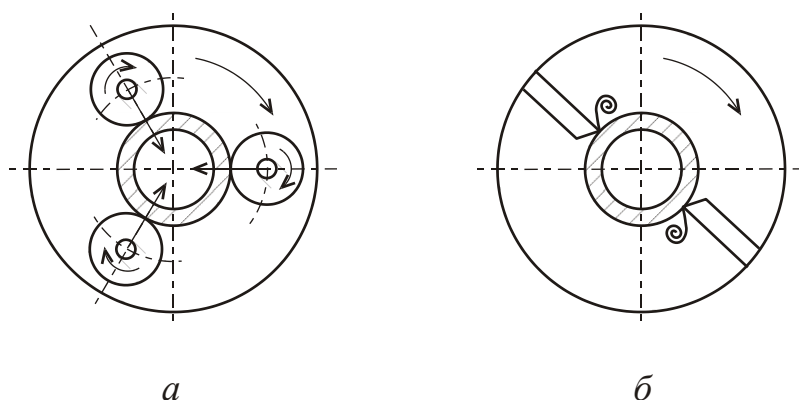


Рисунок А.3 – Отрезные устройства с вращающейся головкой, имеющие в качестве режущих инструментов: *а* – дисковые ножи; *б* – резцы

наложением сварного спирального шва) также обеспечивается непрерывность процесса. Выходящую из стана "бесконечную" трубу разрезают на мерные длины летучим отрезным устройством газокислородной либо плазменной резки. Как один из способов организации бесконечной прокатки в металлургии применяются летучие стыкосварочные машины [4, 5]. Они служат для сварки толстых полос или заготовок, когда образование петли становится невозможным.

В установках непрерывной разливки стали (УНРС) применяются машины газовой резки (газорезки), служащие для резки непрерывно движущегося слитка на мерные длины [6, 99]. Данный ЛМ состоит из стола (являющегося НО), на котором расположен режущий инструмент – резак (один или несколько) с МП. Механизмы перемещения НО и подачи режущего инструмента (МП) оснащены автоматизированным электроприводом.

ЛП также применяются в деревообрабатывающей промышленности при производстве древесноволокнистых, фибролитовых и других древесных плит [8-10, 111]. От приведенного на рис.А.2 примера эти ЛП отличаются видом ОИ (обычно это непрерывный широкий сформированный ковер, полотно, которые ЛП разрезает на пакеты) и соответствующими конструктивными особенностями ИМ и НО. НО представляет из себя порталную или другую широкую конструкцию, по которой перемещается поперек разрезаемого ковра вращающийся пильный диск (вместе с МВ и его приводом). Механизма сцепления НО с ОИ обычно нет. Приводы перемещения НО, МП и МВ – от электродвигателей. Называются данные машины (в своей отрасли) не ЛП, а по-разному – автоматически действующий дисковый нож, станок для раскроя плит (непрерывного прессования), автоматический круглопильный станок, станок для поперечного раскроя ковра на пакеты, передвижная пила и др. Следует сказать, что за рубежом (США) в данной отрасли промышленности можно найти машины, схожие по своему конструктивному исполнению с рассмотренными ЛП, применяемыми для резки гнутого профиля. Данные аппараты [111, 112] применяются для поперечного пореза движущихся бревен. Задание на отрезаемую длину формируется специальной системой оптимального раскроя, расположенной перед данной ЛП.

При выполнении некоторых роботизированных операций требуется синхронизация действий робота с движением транспортной системы, перемещающей изделия (например, при аэрозольной окраске или сборке) [12-14]. Такие робототехнические устройства тоже можно отнести к ЛМ. На рис.А.4 показан робот в составе роботизированной системы для одностороннего напыления покрытий на изделия несложных конфигураций [14]. Оператор укладывает изделия 6 на подвесной конвейер 5, оснащенный устройством 9 идентификации, которое посредством контрольно-блокировочной системы 8 обеспечивает автоматический выбор программы напыления. Робот оснащен устройством 7 управления, позволяющим проводить напыление в специальной камере 4 без остановки конвейера. В данном случае промышленный робот в течение всего цикла его работы не сцепляется механически с ОИ или конвейером. Манипуляционная система 2 робота размещается на неподвижном основании 1, а её звенья выполняют взаимно согласованные движения в пространстве таким образом, что распылительная головка 3 движется по траектории, требуемой для выполнения заданных

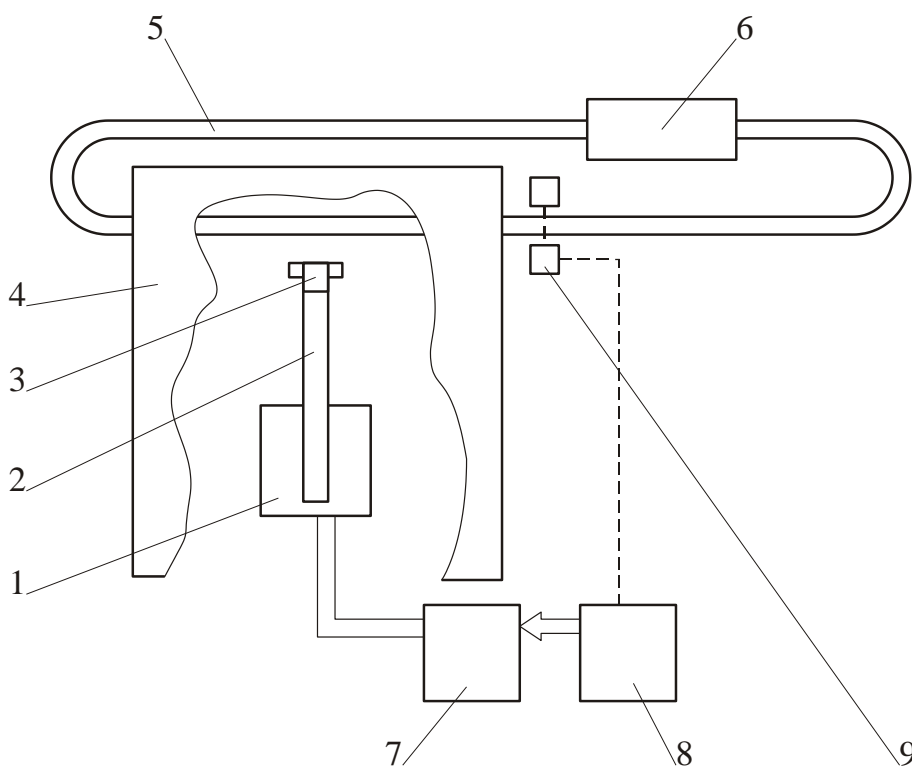


Рисунок А.4 – Технологическая схема роботизированного участка окраски

технологических операций.

Робот относится к классу ЛМ, поскольку он обрабатывает движущиеся изделия. В простейшем случае этот робот, как ЛМ, имеет один НО, например, поворотную колонну либо выдвижную руку, движущуюся поступательно и параллельно конвейеру. В конвейерной линии может быть применен мобильный робот, манипуляционная система которого размещена на транспортной тележке [13]. Такой робот можно также отнести к классу ЛМ, а транспортная тележка выполняет функции НО этого ЛМ.

Приводы степеней свободы роботов (классифицируемых как ЛМ), по крайней мере, их несущих органов, преимущественно выполняются от электродвигателей, поскольку требуется высокая точность отработки заданных движений. Приводы других звеньев (захватного устройства, рабочего инструмента и др.) могут быть гидравлическими либо пневматическими. В общем случае типы приводов, применяемых в работе, зависят от конструкторских решений производителя, который может оснастить степень свободы, классифицируемую нами как НО, и гидроприводом, руководствуясь при этом различными соображениями.

Принимая во внимание рассмотренные примеры, выделенные нами в отдельный класс ЛМ рабочие машины можно сгруппировать по разным признакам.

По видам обработки изделий ЛМ можно разделить на предназначенные для порезки, окраски, сборки, сварки и др. Порезка, в свою очередь, может представлять из себя распил, т.е. порезка со снятием стружки (ЛП с пильным диском, с резцами), разделение (ЛН, ЛП с дисковыми ножами), плазменную или газовую резку.

По силовому воздействию, оказываемому на движение ОИ при его обработке, в классе ЛМ можно выделить группу механизмов, которые оказывают силовое воздействие на ОИ, причем усилие, развиваемое при этом ЛМ, является тянущим (ЛН, ЛП). Другая группа ЛМ не оказывает ни тянущего, ни подпирающего усилия – мы можем сказать, что оно нейтральное. Причем здесь возможны случаи как с соприкасанием инструментов с ОИ (сборка), так и без соприкасания. В последней группе есть такие ЛМ, для которых существует опасность поломки инструмента при

нарушении синхронизации (газорезка), и такие, для которых такой опасности нет (окрасочные роботы).

Представленные классификационные признаки определяют набор ИМ (кроме НО), входящих в состав ЛМ.

По виду движения НО встречаются ЛМ с нереверсивным вращением (ЛН, ЛП на вращающемся столе), с реверсивным вращением (ЛН, роботы) либо с прямолинейным реверсивным движением (ЛП, роботы на тележке).

По требованию к точности процессов преследования и синхронизации НО с движущимся ОИ можно выделить ЛМ с высокими требованиями (сборка, порез). В других случаях (окраска) требования могут быть понижены.

Требование быстродействия предъявляется к любым ЛМ, чтобы они не оказались сдерживающим фактором в повышении производительности линии (быстродействие зависит от скорости движения и частоты следования точек обработки на ОИ).

Ко всем ЛМ предъявляются естественные требования по энергоемкости выполняемых ими операций. В современных условиях данные требования становятся особенно актуальными [15] и при имеющихся резервах необходимо их удовлетворять с целью снижения эксплуатационных затрат.

Приведенные выше требования непосредственно регламентируют объем требований к приводу НО. Тип применяемого привода НО зависит от предъявляемых к нему требований. Чаще всего это автоматизированный электропривод, реже гидро- или пневмопривод. Требование к быстродействию ЛМ определяет также и требуемую скорость исполнения функций исполнительными механизмами.

Как видим, класс ЛМ включает в себя машины, отличающиеся и типом движения НО, и набором ИМ, и оказываемым при обработке силовым воздействием на ОИ.

В связи с этим проведение исследований по ресурсосберегающей разработке СУ ЛМ целесообразно осуществлять для определенных подклассов, выделяемых по некоторым характерным признакам. Это позволит сузить функциональные

требования к СУ ЛМ, упростить технологическое решение и программно-алгоритмическое обеспечение.