

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т.ТРУБИЛИНА»

На правах рукописи



Квитко Андрей Викторович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОВЦЕФЕРМЫ**

Специальность: 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент
Богдан Александр Владимирович

Краснодар – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПЕРСПЕКТИВЫ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ	
ОВЦЕВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ В ЮЖНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ	
1.1 Особенности овцеводства в Южном Федеральном округе.....	10
1.2 Электрооборудование овцеводческих хозяйств.....	17
1.3 Анализ ветроэнергетических установок малой мощности	24
1.4 Существующие исследования по асинхронным генераторам.....	40
1.5 Выводы по главе и задачи исследований.....	48
2 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И НАСЫЩЕНИЯ	
В АСИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ.....	
2.1 Анализ влияния на процесс возбуждения и установившийся режим асинхронного генератора нелинейности характеристики его магнитной системы	50
2.2 Разработка способа учета насыщения магнитной системы асинхронного генератора	61
2.3 Выводы по второй главе.....	67
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СТАБИЛИЗАТОРА	
НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	
3.1 Разработка математической модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном регулировании тока возбуждения.....	68
3.2 Разработка математической модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при плавном регулировании тока возбуждения	70
3.3 Разработка алгоритма решения уравнений модели «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для расчета параметров и режимов работы ветроэнергетической установки	73

3.4 Расчет параметров и режимов работы ВЭУ при дискретном регулировании тока возбуждения.....	77
3.5 Расчет параметров и режимов работы ВЭУ при плавном регулировании тока возбуждения	82
3.6 Разработка функциональной и принципиальной электрической схем стабилизатора напряжения асинхронного генератора ветроэнергетической установки	87
3.7 Выводы по третьей главе.....	95
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ.....	97
4.1 Проверка адекватности учета нелинейности магнитных свойств магнитопровода	97
4.2 Проверка валидности математического моделирования стабилизации напряжения асинхронного генератора при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения	100
4.3 Расчет технико-экономических показателей постановки ветроэнергетических установок малой мощности на серийное производство.....	110
4.4 Выводы по четвертой главе.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в России насчитывается более 300 тыс. фермерских хозяйств, в том числе в Краснодарском крае более 30 тыс. различных направлений производства, и их количество ежегодно увеличивается. При этом доля производства овцеводческой продукции на малые фермерские хозяйства (МФХ) и личные подсобные хозяйства (ЛПХ) составляет 84 %. Для эффективного функционирования этих хозяйств необходимо не только энергообеспечение технологических процессов, но и создание комфортных бытовых условий обслуживающему персоналу.

Особенностью автономных потребителей электроэнергии фермерских хозяйств является то, что они рассредоточены на большой территории и имеют небольшую мощность. Кроме того, большинство потребителей электроэнергии имеют длительные перерывы в электроснабжении. Учитывая эти особенности и высокую стоимость линий электропередачи, актуальным является направление – применение автономных систем электроснабжения (АСЭ). АСЭ, выполненные на дизельных и бензоэлектростанциях, потребляющих ископаемое топливо, значительно снижают рентабельность сельскохозяйственного производства из-за высоких эксплуатационных затрат. Кроме того, при работе они оказывают отрицательное воздействие на экологию. Перспективным направлением является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территориях с высоким их потенциалом.

Важное место в составе АСЭ среди ВИЭ принадлежит малым ветроэнергетическим установкам (ВЭУ) (до 5 кВт), применение которых позволит уменьшить количество дорогостоящих накопителей – аккумуляторных батарей и повысить надежность электроснабжения автономных потребителей электроэнергии. Значительный потенциал для улучшения характеристик ВЭУ связан с использованием асинхронных генераторов (АГ), отличающихся высокой надежностью и стойкостью к тяжелым условиям работы. Однако на сегодняшний день ВЭУ на АГ не на-

шли широкого применения в сельскохозяйственном производстве, из-за сложности стабилизации выходных параметров АГ.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР Кубанского ГАУ на 2021–2025 гг. ГР № 121031700099-1, тема 32 «Обоснование и создание энергосберегающих адаптированных систем и технологий сельскохозяйственного назначения».

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку автономных систем электроснабжения, выполненных на базе ВЭУ внесли ученые: Амерханов Р.А., Никитенко Г.В., Грибков С.В., Кашин Я.М., Диведеркин И.В., Велькин В.И., Коноплёв Е.В., Григораш О.В., Богатырев Н.И., Лукутин Б.В., Воронин С.М., Сангов Х.С., Цырук С.А. и многие другие.

Проблематикой, ставшей предметом диссертационного исследования, занимались ученые Кицис С.И., Казовский Е.Я., Нетушил А.В., Баракин Н.С., Соболев А.Н., Ильченко Я.А., Креймер А.С., Сеницын А.В., Оськина А.С., Ванурин В.Н., Вронский О.В., Джендубаев А.-З.Р., Кунцевич П.А., Торопцев Н.Д., Фаренюк А.П., Фильц Р.В. и другие авторы. В их публикациях рассмотрены вопросы работы АГ в различных режимах, а также рассмотрены внешние характеристики АГ и вопросы самовозбуждения и стабилизации напряжения.

Научными исследованиями в данной области в настоящее время занимаются ученые в образовательных учреждениях: Ставропольском государственном аграрном университете (г. Ставрополь); Южно-Уральском государственном университете (национально-исследовательский университет) (г. Челябинск); Кубанском государственном технологическом университете (г. Краснодар) и других.

Проблема состоит в том, что, несмотря на большое разнообразие комплектации АСЭ с использованием ВЭУ и научных разработок по данной теме, остаются недостаточно исследованными методы стабилизации напряжения автономных асинхронных генераторов в составе ВЭУ малой мощности при воздействии дестабилизирующих факторов, возникающих в процессе их эксплуатации.

Рабочая гипотеза: если провести исследование совместной работы ветродвигателя и автономного АГ с введением активного сопротивления в цепь возбу-

ждения, то можно повысить стабильность работы ВЭУ при колебаниях скорости ветра и изменении нагрузки.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы системы стабилизации напряжения автономного АГ для устойчивого электроснабжения овцеводческих хозяйств.

Задачи исследований:

1. Провести анализ влияния на процесс возбуждения и установившийся режим АГ линейной характеристики его магнитной системы.

2. Предложить способ учета насыщения магнитной системы АГ для разработки адекватной математической модели.

3. Разработать математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ.

4. Разработать алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для определения параметров и режимов работы ВЭУ.

5. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы стабилизатора напряжения и алгоритм работы системы управления стабилизатором.

6. Изготовить установку, провести эксперимент и сопоставить результаты математического моделирования стабилизации напряжения АГ с экспериментальным исследованием.

7. Провести технико-экономическую оценку целесообразности производства ВЭУ, выполненных на АГ для овцеводческих хозяйств.

Объектом исследования являются автономные ветроэнергетические установки и их стабилизаторы напряжения.

Предмет исследования – параметры и режимы работы ВЭУ и результаты математического моделирования.

Методология и методы исследования. В качестве методологической основы использовался системный анализ, позволяющий выявить достоинства и недос-

татки исследуемого объекта во всех режимах его функционирования. Исходя из поставленных задач и с учетом особенностей исследуемого объекта, использовались теоретические и экспериментальные методы исследований, базирующихся на основах теории электрических цепей, электрических машин и силовой преобразовательной техники, метода статической оценки точности результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна исследований:

1. Критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной характеристикой магнитной системы.
2. Математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения.
3. Алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для определения параметров и режимов работы ВЭУ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- критерии устойчивого режима работы автономного АГ при отсутствии насыщения магнитной системы показывают, что выходное напряжение такого АГ ограничивается мощностью приводного двигателя;
- способ учета насыщения магнитной системы АГ, который позволяет строить адекватные математические модели систем регулирования его напряжения;
- результаты математического моделирования системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения, позволяющие анализировать переходные и установившиеся режимы при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ;
- алгоритм работы автоматической системы управления стабилизатором напряжения АГ, позволяющий разрабатывать программный код для микроконтроллера;
- функциональная и принципиальная схемы стабилизатора напряжения могут быть использованы проектными организациями при создании автономных систем электроснабжения.

– результаты технико-экономического обоснования, демонстрирующие целесообразность серийного производства и применения ВЭУ с разработанным стабилизатором напряжения для сельскохозяйственных предприятий.

Техническая новизна исследований подтверждена патентом на изобретение РФ № 2724622 «Устройство стабилизации напряжения ветроэнергетической установки».

Степень достоверности результатов исследований. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций базируется на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, положений, в которых нашли применение предложенные автором критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной характеристикой магнитной системы, математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения и алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения, а также совпадением результатов математического и физического моделирования.

Реализация результатов исследований. Математический аппарат для расчета параметров и режимов работы ВЭУ малой мощности на базе АГ с короткозамкнутым ротором, используется в ООО НТК «Солнечный центр» г. Краснодар при проектировании автономных ВЭУ (приложение А); алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка», используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» г. Краснодар при расчёте основных параметров эффективности энергосистем, выполненных на ВЭУ (приложение Б); результаты исследований внедрены в учебный процесс (приложение В).

Апробация результатов исследований. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных, 1 национальной и 1 российской научно-практических конференциях: II Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2011 г.); VII Международная научно-практическая конференция «Актуальные направления научных исследований» (г. Чебоксары, 2016 г.); Международная науч-

но-практическая конференция «Роль и значение науки и техники для развития современного общества» (г. Уфа, 2017 г.); X национальная научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2019 г.); IV Всероссийская научно-техническая конференция «ГЕОЭНЕРГЕТИКА» (г. Грозный, 2019 г.); XIII Международная научная конференция «Технические и технологические системы» (г. Краснодар, 2022 г.); IV Международная научно-практическая конференция «Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс» (г. Ростов-на-Дону, 2023 г.); V Международная научно-практическая конференция «Интеграция наук – 2024» (г. Краснодар, 2024 г.).

Публикация результатов исследований. Основное содержание работы отражено в 17 научных публикациях, в том числе 9 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Издано 3 монографии и получено 3 патента РФ на изобретение. Общий объем публикаций составил 35,6 п. л., из них личный вклад автора – 11,0 п. л.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- критерии устойчивого режима работы автономного АГ с линейной вольт-амперной характеристикой.
- математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения;
- алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения;
- результаты проверки валидности экспериментальных исследований и результатов математического моделирования системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка».

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПЕРСПЕКТИВЫ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ОВЦЕВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ В ЮЖНОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

1.1 Особенности отрасли овцеводства в Южном Федеральном округе

Сельское хозяйство в России является одной из ключевых отраслей экономики страны, которая обеспечивает продовольственную безопасность населения и способствует развитию сельских территорий. В последние годы наблюдается положительная динамика развития сельского хозяйства, однако в отрасли все еще существуют серьезные проблемы, которые необходимо решать для повышения эффективности и конкурентоспособности.

Развитие сельского хозяйства тесно связано с улучшением работы отраслей, обеспечивающих его функционирование, что является ключевым элементом повышения эффективности агропромышленного комплекса. Сфера инфраструктуры участвует в общем процессе производства, создавая условия для эффективного использования потенциала сельскохозяйственного комплекса и сокращения потерь продукции. Она охватывает как поддержку производства сельскохозяйственной продукции, так и обеспечение переработки и эффективной транспортировки продукции к потребителю. Важность обслуживающих отраслей в производстве сельскохозяйственной продукции увеличивается при наращивании производства, что повышает требования к качеству обслуживания инфраструктуры.

Одной из главных проблем сельского хозяйства в России является высокая изношенность сельских электрических сетей, что часто приводит к длительным и нерегулируемым перерывам в электроснабжении, которые критически нарушают технологические циклы в растениеводстве и животноводстве. Учитывая высокую капиталоемкость строительства и обслуживания протяженных линий электропередачи, рассредоточенные сельскохозяйственные потребители небольшой мощности, в принципе, рискуют оказаться без централизованного электроснабжения.

Кроме этого необходимо отметить низкую производительность труда, которая значительно отстает от уровня развитых стран. Это объясняется, прежде все-

го, устаревшими технологиями и недостаточным уровнем механизации производства. Кроме того, многие сельскохозяйственные предприятия страдают от недостатка финансирования, что не позволяет им модернизировать производство и внедрять новые технологии.

Несмотря на существующие проблемы, сельское хозяйство имеет значительный потенциал для роста и является одной из перспективных отраслей экономики России. В стране имеются обширные плодородные земли, благоприятный климат для выращивания многих видов сельскохозяйственных культур и развития животноводства.

Животноводство является крайне важной отраслью сельского хозяйства в России, которая специализируется на производстве мяса, молока, яиц и шерсти.

Крупный рогатый скот является одним из основных видов сельскохозяйственных животных в России. поголовье крупного рогатого скота в стране, по данным Росстата на конец 2023 г., составляло более 17 млн голов [94]. Производство молока является одним из основных направлений развития отрасли. В России действует множество молочных ферм, специализирующихся на производстве молока и молочных продуктов. Кроме того, в стране развито мясное скотоводство, которое специализируется на выращивании крупного рогатого скота для производства говядины.

Свиноводство является одной из динамично развивающихся отраслей животноводства в России. поголовье свиней в стране составляет более 28 млн голов [94]. Данная отрасль специализируется на производстве свинины, которая является одним из самых популярных видов мяса в России. В стране действует множество свиноводческих комплексов, которые специализируются на выращивании свиней в промышленных масштабах.

Важной частью животноводства является менее развитая, но не менее важная отрасль овцеводства. Она поставляет на рынок разнообразный комплекс важных товаров. Баранина хоть и относится к жирным сортам мяса, однако, содержание жира в баранине значительно ниже (в 2-3 раза), чем в свинине. Количество холестерина в баранине также существенно меньше, чем в говядине (в 2,5 раза), и

в 4 раза меньше, чем в свинине. При этом калорийность баранины составляет 165 ккал на 100 г, что делает ее диетическим продуктом с большим содержанием белка. Кроме того, в ней полностью отсутствуют углеводы. Мясо может быть рекомендовано при лечении ожирения, а также людям, страдающим сахарным диабетом. Также баранина богата минеральными веществами и витаминами, не уступая по содержанию говядине и свинине, а уровень железа в ней выше примерно на 30 %. Кроме того, овечье молоко обладает комплексом полезных качеств и по свойствам может успешно конкурировать с коровьим молоком. Также кроме важных продуктов питания, отрасль поставляет и другие ценные продукты: шерсть и шкуры. В целом продукция отрасли овцеводства имеет высокий спрос на отечественном рынке и обладает серьезным экспортным потенциалом, в частности в страны Ближнего Востока, Катар, ОАЭ, Иран [110].

В настоящее время доля производства баранины в стране составляет всего порядка 2-3 % от общего объема [111]. При этом территориальных и кормовых ресурсов достаточно для увеличения производства баранины.

На данный момент в России насчитывается 17703,9 тыс. голов овец. При этом 41,6 % поголовья выращивается в личных подсобных хозяйствах (ЛПХ), 42,4 % в малых фермерских (крестьянских) хозяйствах (МФХ), и лишь 16 % приходится на сельскохозяйственные организации РФ [41, 94]. К тому же с 2015 г. наблюдается сравнительно незначительное, но устойчивое снижение поголовья. Это связано с принятием приказа Минсельхоза об утверждении ветеринарных правил проведения регионализации страны. Кроме того, в 2020 г. Россельхознадзор ввел фактический запрет на вывоз баранины из Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в другие регионы страны и на экспорт. Это было связано с необходимостью получения от Международного эпизоотического бюро (МЭБ) статуса благополучной по ящуру зоны для нескольких регионов России и также привело к вынужденному сокращению поголовья [90].

Южный федеральный округ (ЮФО) – это регион с богатыми традициями овцеводства, которое веками играло важную роль в местной экономике. Однако, несмотря на исторический фундамент, современное состояние отрасли вызывает

определенные тревоги.

По данным [41], в ЮФО насчитывается 4,65 млн овец, что составляет около четверти от общего поголовья РФ. При этом на сельскохозяйственные организации РФ приходится лишь 415 тыс. голов, а подавляющее количество овец выращивается МФХ и ЛПХ. Также в ЮФО производится порядка 28 % шерсти от ее общего производства.

Несмотря на весомую долю поголовья овец в ЮФО от общей численности в стране, количество овец в регионе сокращается в последние годы. Кроме описанных выше, важной причиной является низкая рентабельность, вызванная рядом факторов:

- нехватка современных технологий: многие хозяйства ЮФО используют устаревшие методы содержания и кормления, что снижает производительность и рентабельность;

- неразвитая инфраструктура переработки: в регионе не хватает предприятий по переработке шерсти, мяса и других продуктов овцеводства. Это ведет к потере ценности продукции и снижению ее конкурентоспособности;

- дефицит квалифицированных кадров: отсутствие опытных специалистов, нехватка образовательных программ, специализированных курсов.

Тем не менее, территории Южного Федерального округа и соседних регионов обладают существенными ресурсными и климатическими условиями для развития овцеводства. Только Ростовская область насчитывает порядка 2 млн га земель, пригодных для сенокосов и пастбищ [81]. В 2022 г. данная отрасль оказалась наиболее устойчивой к сложностям с производством корма и его переработкой. В 2023 г. в Краснодарском крае запустили программу поддержки овцеводства. На эти цели планировалось предоставить более 50 млн рублей [82].

На рисунке 1.1 показаны примеры хозяйств по выращиванию овец в коша-рах и на естественных пастбищах с установкой быстровозводимых ограждающих конструкций.



Рисунок 1.1 – Примеры содержания овец в хозяйствах

По [80] в овцеводстве принимаются следующие основные системы содержания:

- круглогодочная стойловая;
- стойлово-пастбищная;
- пастбищно-стойловая;
- пастбищная.

Для ЮФО характерны стойлово-пастбищная система содержания, которая

применяется в районах с хорошо развитым полевым кормопроизводством и отсутствием зимних пастбищ и характеризуется преобладанием продолжительности стойлового периода; при этой системе овец содержат зимой в овчарнях с выгульно-кормовыми площадками, а летом – на пастбищах, и стойлово-пастбищная система содержания, применяемая во всех зонах, где имеются зимние пастбища, производится заготовка необходимого количества кормов для кормления маток в период ягнения и подкормки овец в зимний и ранневесенний периоды, характеризуется преобладанием продолжительности пастбищного периода.

Нормы температуры и относительной влажности внутреннего воздуха в помещениях для овец принимаются по [80]. Так, в помещении для содержания баранов, суягных и холостых маток, ремонтного молодняка, откормочного поголовья и валухов температура и относительная влажность не нормируются. То есть – отопление не предусматривается. Для других помещений нормы предусмотрены, однако обеспечение нормируемой температуры внутреннего воздуха должно достигаться за счет теплоступлений от животных при условии выбора эффективных ограждающих конструкций с соответствующими теплотехническими показателями. При невозможности обеспечения нормируемой температуры внутреннего воздуха за счет тепловыделений овцами необходимо применять отопление, совмещенное с вентиляцией. Однако учитывая мягкий климат в ЮФО, отопление не применяется во всех помещениях, кроме обогрева ягнят. Вентиляция предусматривается естественная.

Основными источниками водоснабжения в овцеводстве служат подземные воды, а при пастбищном содержании открытые водоемы. Для подачи воды к потребителям из водозаборных сооружений используют насосы. Согласно рекомендациям по технологическому проектированию овцеводческих объектов [80] на взрослых особей суточное потребление воды составляет 4,5-7,0 л/гол, а для ягнят и молодняка 2,0-3,5 л/гол. Температура воды, используемой для поения животных на овцеводческих предприятиях, рекомендуется не ниже 10 °С. Выбор источников водоснабжения производится в соответствии с СП 4542-87 и СанПин 2.1.4.1074-01. Расход воды на хозяйственно-бытовые нужды принимается в соответствии с СП 30.13330.2012. Объект должен быть обеспечен водой питьевого качества в со-

ответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01. При невозможности обеспечения предприятия водой питьевого качества допускается для поения животных использовать воду повышенной минерализации согласно [80]. На естественных пастбищах для поения овец должны предусматриваться водопойные пункты, оборудованные поилками. Радиус водопоя для равнинных пастбищ составляет 2,5-3 км, а в условиях пересеченной местности и для горных пастбищ значение величины радиуса водопоя снижается на 30-40 %. Данное обстоятельство затрудняет использование имеющихся площадей, ввиду отсутствия во многих местах естественных источников воды. То есть появляется необходимость бурения скважин для воды и применения насоса.

В случае перегона отары овец на новое пастбище, где отсутствуют открытые водоемы, которые могут применяться для поения овец, оборудование должно легко демонтироваться и быстро перевозиться к другому водозаборному сооружению.

Автоматизация и механизация основных производственных процессов при проектировании объектов овцеводства согласно [80] должен составлять от 25 до 100 %.

Для механизации производственных процессов, таких как приготовление и раздача кормов, транспортировка и удаление навоза, поение, стрижка овец, доеание и обработка молока, а также ветеринарная обработка помещений и животных, используются комплекты оборудования и отдельные машины [80].

При разработке схем механизации производственных процессов необходимо соблюдать инструкции по монтажу и эксплуатации, предоставляемые производителями оборудования.

В помещениях для выращивания ягнят рекомендуется предусматривать установки для локального инфракрасного обогрева и ультрафиолетового облучения молодняка [80].

Электротехническую часть проектов, в том числе средства автоматизации и слаботочные устройства, разрабатывают в соответствии с требованиями СО 153-34.47.44-2003, СО 153-34.21.122.2003, ПОТ РМ 016-2001, НПС-88, ГОСТ Р 50571.14-96, правил технической эксплуатации электроустановок потребителей

и другими с учетом требований охраны окружающей среды.

Освещенность овцеводческих зданий и сооружений следует проектировать с учетом требований ОСН-АПК 2.10.24.001-04 и СП 52.13330.2011.

Категорию электроприемников и обеспечение надежности электроснабжения зданий и сооружений овцеводческих объектов определяют с учетом требований методики нормирования эксплуатационной надежности сельских распределительных электрических сетей среднего напряжения.

Для обеспечения электробезопасности животных предусматривают выравнивание электрических потенциалов в соответствии с ОСТ 46180-85 и ГОСТ Р 50571.14-96.

Для уменьшения концентрации аммиака, пыли и микробного загрязнения, а также для нейтрализации неприятных запахов рекомендуется применять ультрафиолетовые лампы и другие специальные приборы в соответствии с инструкциями по их эксплуатации [80].

1.2 Электрооборудование овцеводческих хозяйств

Затруднения развития отрасли связаны в большой степени с низкой энергообеспеченностью: в сельских районах электроэнергия поступает от централизованных энергосистем, что создает трудности из-за удаленности потребителей и радиальной структуры сетей, а также высоким износом электрических сетей в сельской местности или полным отсутствием электроснабжения. Использование проводов малого сечения и трансформаторов низкой мощности влечет за собой рост расхода энергии и падение напряжения. Значительная часть затрат связана с распределительными сетями среднего и низкого напряжения [12].

Достаточно сложно в таких условиях, даже имея большие площади пастбищ, заниматься разведением овец, поскольку часто невозможно обеспечить быт людей, а сами животные, требуют определенного ухода.

Электроэнергетика играет существенную роль в повышении эффективности сельского хозяйства. Сегодня невозможно представить производство сельскохо-

зяйственной продукции без электроэнергии, которая используется во всех отраслях сельского хозяйства. Особенно важную роль электроэнергия играет в животноводстве, способствуя росту производительности труда, уровня механизации и квалификации работников. Электрификация данной сферы улучшает использование электрооборудования, меняет структуру производственных средств, углубляет специализацию, снижает ручной труд, а также оказывает влияние на социальные аспекты производства.

Увеличение производственного энергетического потенциала и электроемкости сельскохозяйственной продукции приводит к зависимости объемов производства от энергопотребления и качества электроснабжения.

Для овчарни на 1000 голов молодняка суточное потребление воды согласно [80] составляет 3,5 м³. При отсутствии естественных водоемов, необходимо использование подземных вод с применением погружных насосов. Подкачка воды может осуществляться 1 раз в сутки, при этом необходима емкость объемом 4 м³ для хранения воды. Однако в засушливых районах целесообразнее предусмотреть подкачку 2 и более раз в сутки. Это объясняется медленным заполнением ствола скважины из-за малого содержания подземных вод в засушливые периоды. При этом емкость для хранения воды может быть меньших размеров (в зависимости от количества докачек воды в сутки).

Для обеспечения требуемого количества воды и в соответствии с главой СНиП 2.04.01-85 могут применяться различные погружные насосы (центробежные, винтовые, шнековые). В современных погружных насосах небольшой мощности в качестве приводного двигателя применяются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором [24] и бесщеточные двигатели постоянного тока [83, 109], обладающие низким уровнем шума и не уступающие по надежности асинхронным машинам. Погружные насосы с бесщеточными двигателями постоянного тока производятся специально для их работы от фотоэлектрических панелей напрямую, без промежуточных преобразователей электроэнергии. Однако это не запрещает их использование в сетях переменного тока с применением понижающего трансформатора и выпрямителя.

По [80] температура воды, используемой для поения животных на овцеводческих предприятиях, рекомендуется не ниже 10 °С. Благодаря мягкому климату в ЮФО, подогрев воды необходим только в зимний период, для чего используется ТЭН мощностью 500 Вт.

Для стрижки овец, которая производится в зависимости от вида один раз (весенний период) или 2 раза (весенний и осенний период) в год, в настоящее время производится большая линейка стригальных машин. Кроме того, в хозяйствах до сих пор распространены машинки старого образца, например, МСУ-200, которая оснащена трехфазным асинхронным двигателем на 36 В и 200 Гц. Изначально для его питания предполагался вариант на основе обычного однофазного электродвигателя (220 В), который приводит во вращение трехфазный генератор 36 В, 200 Гц. Этот вариант шумный, с низким КПД и не высокой надежностью. Другой вариант – относительно не дорогой многофункциональный программируемый частотный преобразователь (VFD инвертор), которым оснащаются МСУ-200, предлагаемые на рынке в настоящее время. Данная стригальная машинка отличается высоким ресурсом работы и производительностью, однако их выпуск прекратился в 1996 г., а те образцы, которые можно найти в продаже, имеют стоимость в несколько десятков тыс. рублей [124, 130].

Также в хозяйствах до сих пор используются машинки для стрижки овец с гибким валом ЭСА-1Д с мощностью двигателя 120 Вт, напряжением сети 220 В и частотой тока 50 Гц. Данные машинки также устарели и сняты с производства. Им на замену пришли похожие, но превосходящие по характеристикам стригальные агрегаты с гибким валом ESA-2D производства Тайвань с мощностью двигателя 800 Вт, напряжением сети 220-240 В и частотой тока 50 Гц. Однако их стоимость еще выше, чем у МСУ-200 [125].

Рассмотренные стригальные агрегаты являются профессиональными и используются в крупных хозяйствах. Для небольших хозяйств могут быть использованы более дешевые варианты стригальных машин, такие как VS84-S с мощностью двигателя 320 Вт, напряжением сети 220 В и частотой тока 50 Гц (производство Китай) и более дорогая Takumi 520 с мощностью двигателя 520 Вт, напряже-

нием сети 220-240 В и частотой тока 50 Гц (производство Япония).

Для более удобной стрижки овец и баранов в малых овцеводческих хозяйствах используются аккумуляторные машинки EGP PROever ANIMAL 550 китайского производства. Машинка оснащена мотором роторного типа мощностью 550 Вт и имеет естественное охлаждение. Производительность стрижки достигает 10-12 голов в час или около 80-100 баранов в день. При этом необходимо смазывать ножи каждые 15 минут. Время работы от аккумулятора составляет 120 минут. Время зарядки аккумулятора также составляет 120 минут.

Важное условие успешного разведения овец – надлежащее освещение животноводческих помещений. Сегодня существуют энергоэффективные решения на основе светодиодных светильников, которые позволяют обеспечивать высококачественное освещение при минимальном энергопотреблении. Применяемые в этих светильниках лампы имеют мощность от 5 до 50 Вт и способны выдавать до 1500 люмен, что позволяет эффективно освещать помещения при экономном расходовании электроэнергии.

Отопление в овчарне отсутствует [80], но необходимо учитывать, что новорожденные ягнята и молодняк в первые дни жизни не имеют полностью сформированных механизмов терморегуляции, поддерживающих постоянство температуры тела; у них хорошо развита регуляция теплообразования, а теплоотдача обычно несовершенна. Колебания температуры воздуха, особенно в сочетании с высокой влажностью, могут значительно влиять на температуру тела ягнят. Физическая терморегуляция ягнят вступает в действие только через 10-15 дней после рождения, а при содержании в сырых и холодных помещениях этот процесс может замедляться.

При низких температурах и высокой влажности воздуха в организме ягнят происходят значительные физиологические и иммунологические изменения, снижается активность обменных процессов. Исследования показывают, что ягнята, рождающиеся зимой в помещениях с температурой ниже 5-8 °С при относительной влажности 85-98 %, могут быть вялыми и неактивными в течение первых 2-3 дней жизни. Слабые ягнята могут погибнуть от переохлаждения. Поэтому создание оптимального температурно-влажностного режима в помещениях для ягнят

имеет практическое значение для профилактики простудных заболеваний и сохранения приплода, особенно в зимнее время. Поэтому согласно рекомендациям [80] в помещении для выращивания ягнят для создания необходимого температурного режима и снижения относительной влажности воздуха предусмотрены установки для локального инфракрасного обогрева и ультрафиолетового облучения молодняка.

В качестве обогревателей для ягнят используются облучательные установки ССП 09-250-001 с типом патрона Е27 и максимальной мощностью лампы 250 Вт. В них применяются инфракрасные лампы ИКЗ или ИКЗК соответствующей мощности. Согласно рекомендациям, указанным в [114], помещение для проведения ягнения оборудуют облучателями из расчета 25 Вт на матку с приплодом, а при искусственном выращивании ягнят – из расчета 250 Вт на 10 ягнят.

Первые три-четыре дня ягнят обогревают в течение 20 ч в режиме 3 ч обогрев, 40 мин пауза. Паузы обогрева целесообразно совмещать с кормлением ягнят.

В последующие дни (до 15-20-дневного возраста) время обогрева сокращают до 16 ч в сутки, причем в течение дня через каждый час лампы выключают на полчаса.

При температуре воздуха в овчарне не ниже +10 °С локальный ИК обогрев ягнят применяют до 10-15-дневного возраста, при более низкой температуре ИК лампы следует оставлять включенными и в следующий период выращивания (до 45- 60-дневного возраста).

Режим УФ облучения ягнят – автоматический [114]. В качестве источника ультрафиолетового излучения принимаются люминесцентные ртутные эритемные лампы ЛЭ-15. Технические характеристики лампы представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики лампы ЛЭ-15

Мощность	Вт	15
Мощность ультрафиолетового излучения	Вт	4,9
Параметры сети	В/Гц	220/50
Ультрафиолетовое излучение	нм	280-315
Тип цоколя		G13
Габаритные размеры	мм	27,5x451,6
Срок службы	ч	8000

Время УФ облучения ягнят в течение суток в зависимости от высоты подвеса облучателей над полом приведено в таблице 1.2 [114].

Таблица 1.2 – Суточное время УФ облучения ягнят в зависимости от высоты подвеса облучателя

Тип УФ лампы	Высота подвеса над полом, см					
	80	90	100	110	120	130
ЛЭ-15	2 ч	2 ч 40 мин	3 ч 30 мин	4 ч 20 мин	5 ч 30 мин	7 ч

Облучают ягнят в течение всего периода выращивания. УФ лампы включают 2-3 раза в сутки, облучение проводят равномерными порциями. После 10 дней облучения делают 10-дневный перерыв.

Исследования показали, что применение ИК облучателей для обогрева ягнят позволяет увеличить живую массу (в 10-дневном возрасте на 17 %) и сохранность молодняка. УФ облучение улучшает функции пищеварительного аппарата, повышает скорость роста и упитанность ягнят [114].

Данные расчетной электрической нагрузки на вводе овчарни на 1000 голов молодняка, согласно справочным материалам по режимным показателям активных и реактивных нагрузок сельскохозяйственных потребителей [113], приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Электрическая нагрузка овчарни на 1000 голов молодняка

Установленная мощность РУ, кВт	Дневной максимум						Вечерний максимум						Коэффициенты сезонности			
	активной нагрузки			реактивной нагрузки			активной нагрузки			реактивной нагрузки			K _з	K _в	K _л	K _о
	P _{мд} , кВт	βσ _{рд} , кВт	P̄ _д , кВт	Q _{мд} , квар	βσ _{од} , квар	Q̄ _д , квар	P _{мв} , кВт	βσ _{рв} , кВт	P̄ _в , кВт	Q _{мв} , квар	βσ _{ов} , квар	Q̄ _в , квар				
5	2	1,6	0,4	-	-	-	4	2	2	-	-	-	1,0	0,8	0,5	0,8

Из таблицы 1.3 следует, что в овчарне отсутствуют потребители реактивной мощности.

Расчетная максимальная нагрузка проектируемого потребителя, отличающегося величиной установленной мощности от аналогичного потребителя по [113, 115], определяется следующим образом.

Максимальная нагрузка P_m , Q_m – экстраполяцией или интерполяцией показателей соответствующих мощностей для дневного и вечернего максимумов по данным графы установленной мощности РУ и установленной мощности проекти-

руемого объекта.

Математическое ожидание нагрузки \bar{P}_m, \bar{Q}_m по формулам:

$$\bar{P}_m = \bar{P} \cdot x_p^2, \text{ кВт}; \quad \bar{Q}_m = \bar{Q} \cdot x_q^2, \text{ квар} \quad (1.1)$$

Произведение среднеквадратического отклонения максимальной нагрузки на коэффициент надежности расчета $\beta\sigma_{P_m}, \beta\sigma_{Q_m}$ по формулам:

$$\beta\sigma_{P_m} = \beta\sigma_p \cdot x_p^2, \text{ кВт}; \quad \beta\sigma_{Q_m} = \beta\sigma_q \cdot x_q^2, \text{ квар}, \quad (1.2)$$

где

$$x_p = \frac{\sqrt{\left(\frac{\beta\sigma_p}{2}\right)^2 + \bar{P} \cdot P_m} - \frac{\beta\sigma_p}{2}}{\bar{P}}; \quad x_q = \frac{\sqrt{\left(\frac{\beta\sigma_q}{2}\right)^2 + \bar{Q} \cdot Q_m} - \frac{\beta\sigma_q}{2}}{\bar{Q}}, \quad (1.3)$$

где $\bar{P}, \bar{Q}, \beta\sigma_p, \beta\sigma_q$ – статические характеристики нагрузок потребителя по таблице [113].

Произведем расчет электрических нагрузок для овчарни с меньшим числом голов молодняка. Для этого значения величины установленной мощности интерполируем по данным количества голов молодняка приведенного объекта (таблица 1.3) и уменьшенного поголовья проектируемого объекта. Далее определяем расчетную максимальную нагрузку проектируемого потребителя по методике, указанной выше. Расчеты сводим в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Расчетная максимальная нагрузка для овчарен с разным количеством голов молодняка (до 1000 голов)

Количество голов, шт		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Установленная мощность, кВт		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Дневной максимум	$\bar{P}_{мд}$, кВт	0,0059	0,0223	0,0477	0,0808	0,1208	0,1668	0,2182	0,2745	0,335	0,4
	$\beta\sigma_{P_{мд}}$, кВт	0,1941	0,3777	0,5523	0,7192	0,8792	1,0332	1,1818	1,3255	1,4648	1,6
	$x_{P_{д}}$	0,1213	0,2361	0,3452	0,4495	0,5495	0,6458	0,7386	0,8284	0,9155	1,0
	$P_{мд}$, кВт	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Вечерний максимум	$\bar{P}_{мв}$, кВт	0,0584	0,1875	0,3561	0,5506	0,7639	0,9917	1,231	1,4797	1,7364	2,0
	$\beta\sigma_{P_{мв}}$, кВт	0,3416	0,6125	0,8439	1,0494	1,2361	1,4083	1,569	1,7203	1,8636	2,0
	$x_{P_{в}}$	0,1708	0,3062	0,422	0,5247	0,618	0,7042	0,7845	0,8601	0,9318	1,0
	$P_{мв}$, кВт	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0

Зависимости математического ожидания нагрузки \bar{P}_m для дневного и вечернего максимумов от количества голов в овчарне представлены на рисунке 1.2, а и б.

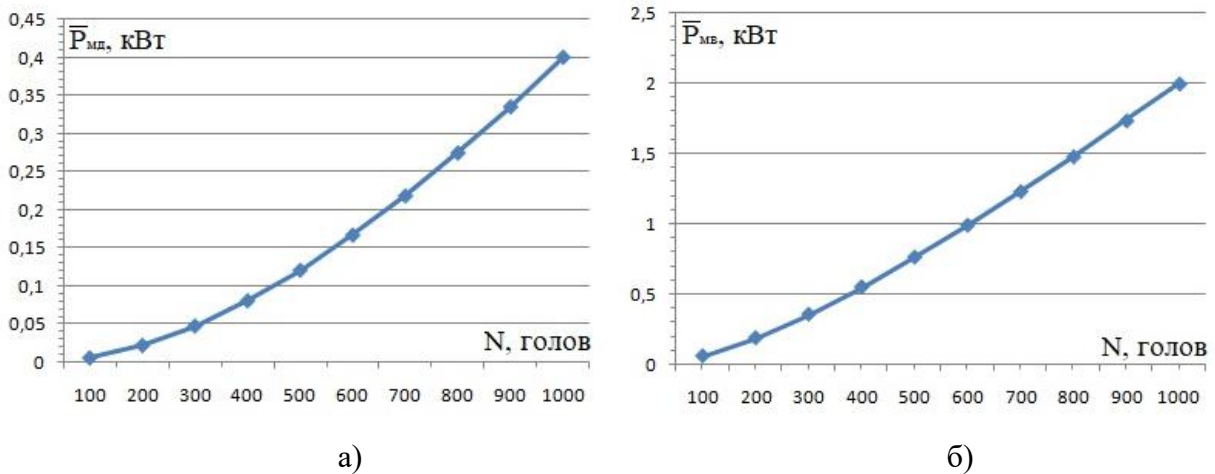


Рисунок 1.2 – Математическое ожидание нагрузки для дневного (а) и вечернего (б) максимумов для овчарен с разным количеством голов молодняка (до 1000 голов)

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что электрической нагрузкой в хозяйствах по разведению овец являются в основном потребители активного переменного тока, а их общая мощность составляет 1-3 кВт.

1.3 Анализ ветроэнергетических установок малой мощности

В условиях растущего спроса на экологически чистые и экономически эффективные источники энергии ветроэнергетика малой мощности становится всё более востребованной в секторе малых фермерских и личных подсобных хозяйств [13, 30, 56, 60]. Такие хозяйства часто сталкиваются с ограниченным доступом к централизованным энергосетям или высокими затратами на электроэнергию, что делает использование локальных возобновляемых источников энергии, таких как ветроустановки, актуальным и перспективным решением [22, 57, 137]. ВЭУ малой мощности способны обеспечить стабильное энергоснабжение для нужд сельскохозяйственного производства, освещения, отопления и других бытовых потребностей, способствуя повышению энергетической независимости и устойчивости хозяйств [146], что делает их перспективным решением для децентрализованного энергоснабжения [18, 47, 49, 50, 59]. Более продвинутое инженерное решение в

этом направлении может служить применение ветро-солнечных электростанций [4, 88, 91, 106, 107]. Такая конструкция повышает надежность АСЭ, но вместе с тем увеличивает массогабаритные параметры и усложняет систему управления.

По данным, предоставленным Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [20], была получена совокупность энергетических и аэрологических характеристик, на примере Анапского района Краснодарского края (метеостанция индекс 37001), которые позволяют определить режимы работы ВЭУ.

Результаты обработки наблюдений на метеостанции (индекс 37001) за десятилетний период (2016-2025 гг.) показали, что среднеквадратичное отклонение среднегодовой скорости составляет 0,21 м/с, то есть среднегодовые значения скоростей ветра отличаются в небольших пределах.

Таблица 1.5 – Среднегодовые скорости ветра в Анапском районе (метеостанция 37001) Краснодарского края

Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
средняя скорость ветра, м/с	4,6	4,6	4,12	4,57	4,36	4,23	3,98	4,54	4,45	4,48

На рисунке 1.3 показана средняя скорость ветра по месяцам за исследуемый период. Из него следует, что максимальные скорости ветра наблюдаются в зимние месяцы, а минимальные летом.

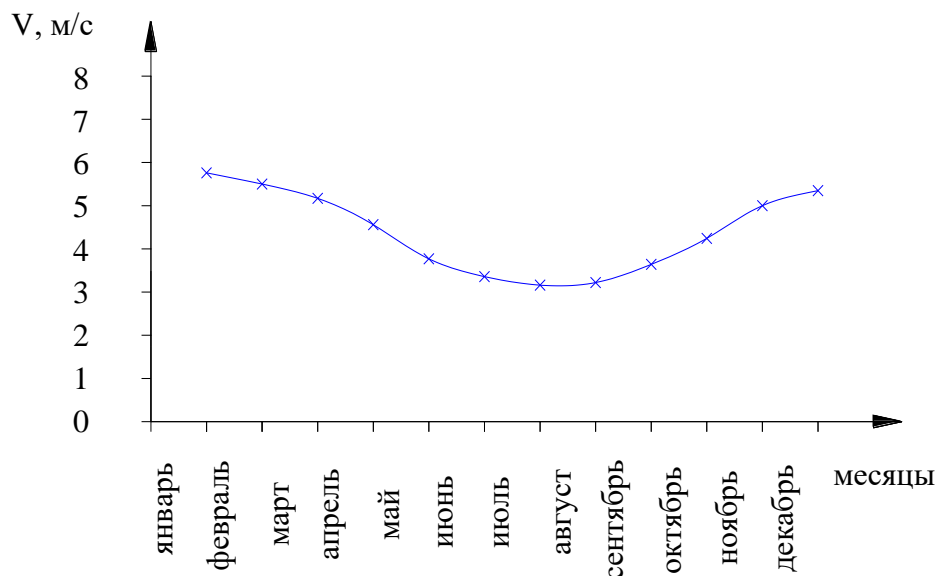


Рисунок 1.3 – Среднемесячные скорости ветра за 10 лет

Анализ показал, что наиболее близкой функцией распределения градаций скоростей ветра является двухпараметрическое уравнение В. Вейбулла:

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\gamma-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\gamma} \right], \quad (1.4)$$

где γ , β – параметры распределения, определяемые режимом повторяемости скоростей ветра.

При оценке ветрового потока должен учитываться случайный характер поступающей энергии ветра. При этом необходимо оценивать обеспеченность (вероятность появления) определенной скорости ветра. Одной из основных характеристик случайной величины является интегральная обеспеченность скорости ветра. При использовании функции распределения Вейбулла интегральная обеспеченность находится следующим образом:

$$P(v) = \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\gamma} \right]. \quad (1.5)$$

Существуют различные способы определения параметров γ , β из набора характеристик эмпирического распределения. Используя метод наименьших квадратов, были получены параметры распределения для времен года и для года в целом. Данные занесены в таблицу 1.6.

Таблица 1.6 – Параметры функции распределения скоростей ветра

Параметры распределения	Весна	Лето	Осень	Зима	Год
γ	1,61	2,05	1,615	1,85	1,551
β	4,79	3,1	4,3	5,569	4,549

Интегральная обеспеченность скорости ветра представлена на рисунке 1.4.

Далее была построена зависимость (рисунок 1.5), показывающая каким образом формируется годовая сумма удельной энергии ветрового потока (площадь под кривой $W_{уд}$). Из рисунка видно, что ввиду кубической зависимости мощности от скорости ветра, наибольший вклад дают не средние скорости ветра и не наиболее часто встречаемые, а скорости, превышающие средние значения в 1,7-1,85 раза.

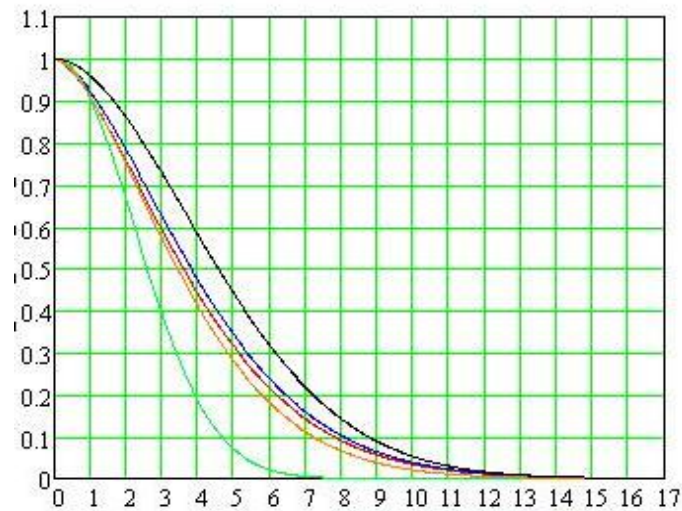


Рисунок 1.4 – Интегральная обеспеченность скорости ветра в условиях Анапского (метеостанция 37001) района Краснодарского края

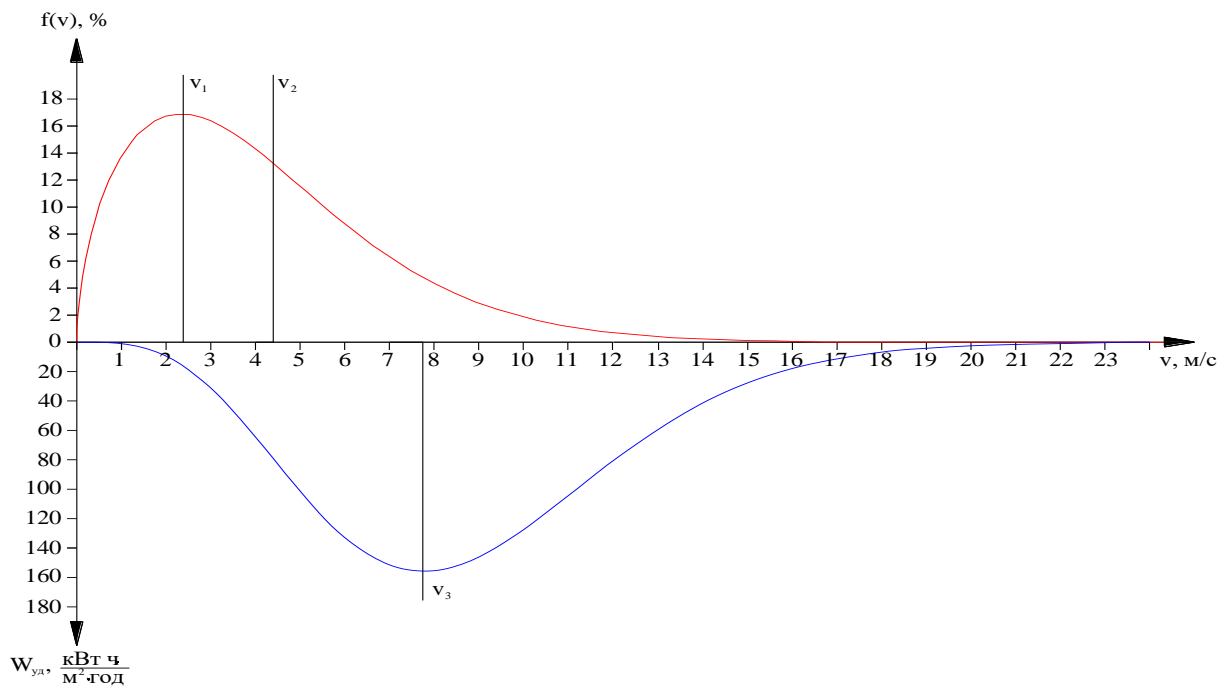


Рисунок 1.5 – Повторяемость скоростей ветра и распределение годовой удельной энергии $W_{уд}$ на высоте 10 м: v_1 – наиболее часто наблюдаемая скорость ветра, v_2 – среднее значение скорости ветра, v_3 – скорость, обеспечивающая наибольший вклад в годовую выработку энергии

Для оценки эффективности работы ветроэнергетической установки была построена зависимость распределения удельной мощности ветрового потока (рисунок 1.6). Площадь под кривой 1 представляет собой годовую удельную энергию ветрового потока (энергию, приходящуюся на 1 м^2 ометаемой площади ветроко-

лесом), однако в полезную работу, с учетом коэффициента использования энергии ветрового потока C_p , может быть преобразована только часть этой энергии (площадь под кривой 2).

При скоростях ветра ниже $v_{\min,p}$ (на рисунке не показано) мощности ветроколеса недостаточно для преодоления сил трения в узлах ВЭУ. При скоростях ветра от $v_{\min,p}$ до v_p (v_p'), при которой ВЭУ развивает номинальную мощность, энергия ветра используется наиболее полно (применимо для генераторов с возбуждением от постоянных магнитов). При последующем увеличении скорости ветра вплоть до максимальной рабочей скорости $v_{\max,p}$ мощность ВЭУ поддерживается на постоянном уровне ввиду ограниченности мощности генератора и включения в работу стабилизирующих устройств. При этом доля полезно используемой энергии ветрового потока снижается. При скоростях выше $v_{\max,p}$ ветроколесо выводится из-под ветра и энергия ветра не используется.

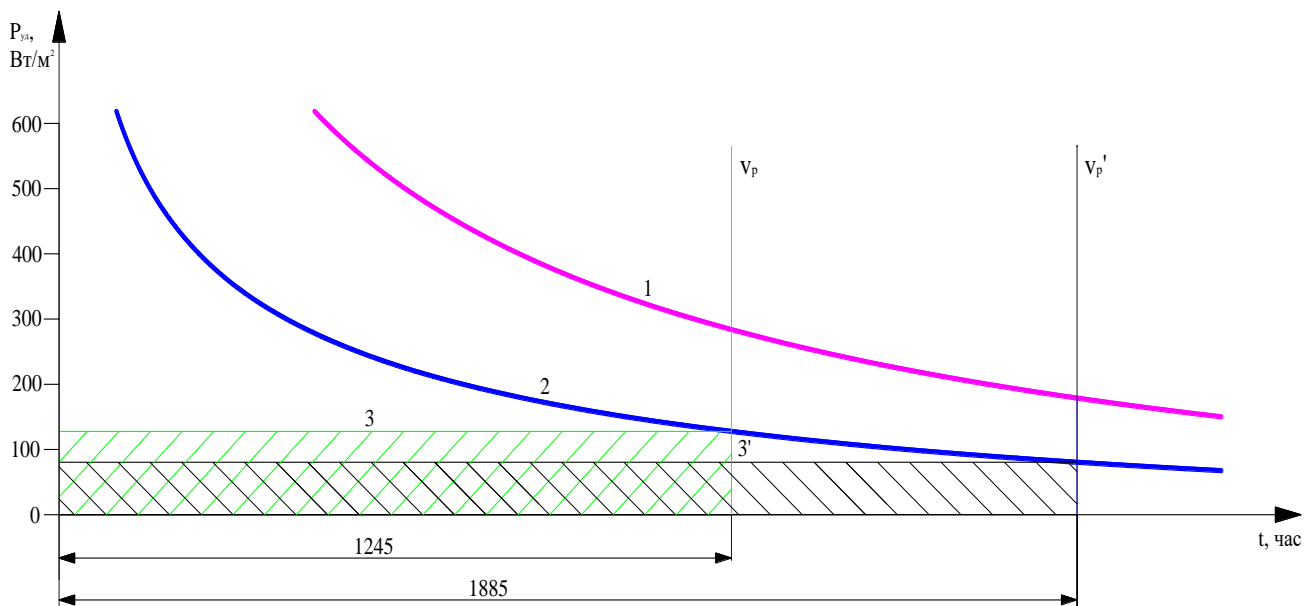


Рисунок 1.6 – Распределение удельной мощности ветра на высоте 10 м: 1 – теоретическое распределение удельной мощности ветрового потока; 2 – удельная мощность на валу ветроколеса; 3 и 3' – фактическая удельная мощность ветроэнергетической установки

Данные зависимости позволяют определить режимы работы ветроэнергетической установки. Максимальное количество выработанной энергии соответствует скорости ветра $v_p = 7$ м/с (площадь под линией 3), при этом общее время работы ВЭУ составит 1245 часов. Однако снизив рабочую скорость ВЭУ до $v_p' = 6$ м/с,

суммарное количество выработанной энергии снизится незначительно (площадь под линией 3'), но общее время работы ВЭУ при номинальной мощности возрастет до 1885 часов. Мощность ВЭУ при этом несколько снижается. Дальнейшее снижение рабочей скорости ветра не имеет смысла ввиду значительного уменьшения количества вырабатываемой энергии. Таким образом, рабочую скорость ветра для малых ВЭУ целесообразно выбирать на уровне 6-7 м/с. Максимально допустимая скорость при этом определяется прочностными характеристиками установки.

Данный анализ и анализ, проведенный в других работах [32, 63, 67, 120], показывает, что южные регионы России обладают достаточно высоким ветроэнергетическим потенциалом, однако при выборе ВЭУ необходимо приводить в соответствие имеющиеся энергетические показатели с номинальными характеристиками предлагаемых на рынке ВЭУ [19, 26, 54, 58, 84-86].

Известные в настоящее время ВЭУ можно разделить на 3 типа [79]:

- ротор Савониуса;
- ротор Дарье;
- горизонтально-осевые ВЭУ.

Первые 2 вида относятся к ВЭУ с вертикальной осью вращения, последний – горизонтально-осевой. Примеры вертикально-осевых ВЭУ показаны на рисунке 1.7. Примеры горизонтально-осевых ВЭУ представлены на рисунке 1.8.

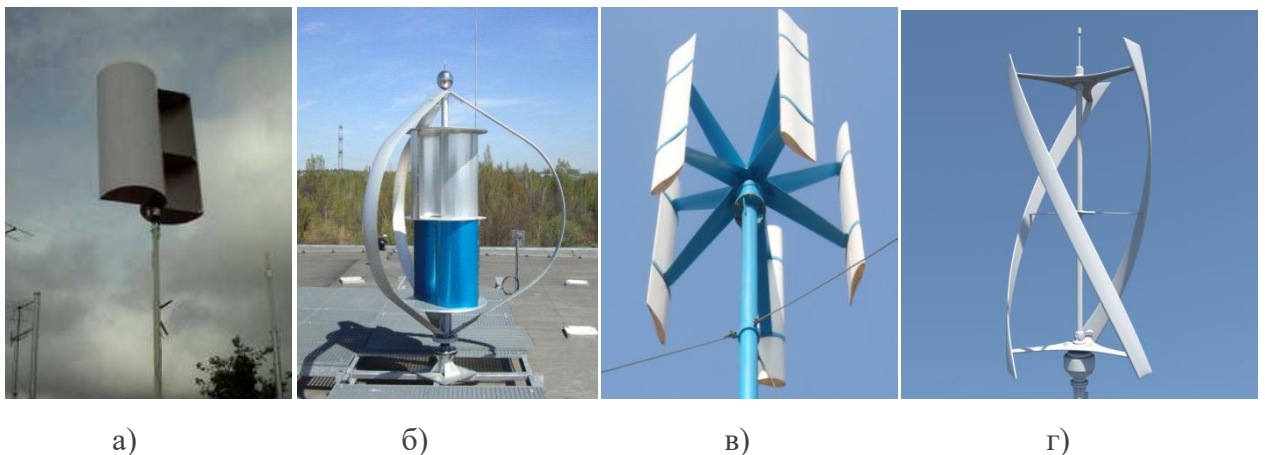


Рисунок 1.7 – Примеры вертикально-осевых ВЭУ:

а – ротор Савониуса; б - ротор Дарье; в – Н-ротор Дарье; в – геликоидный ротор Дарье

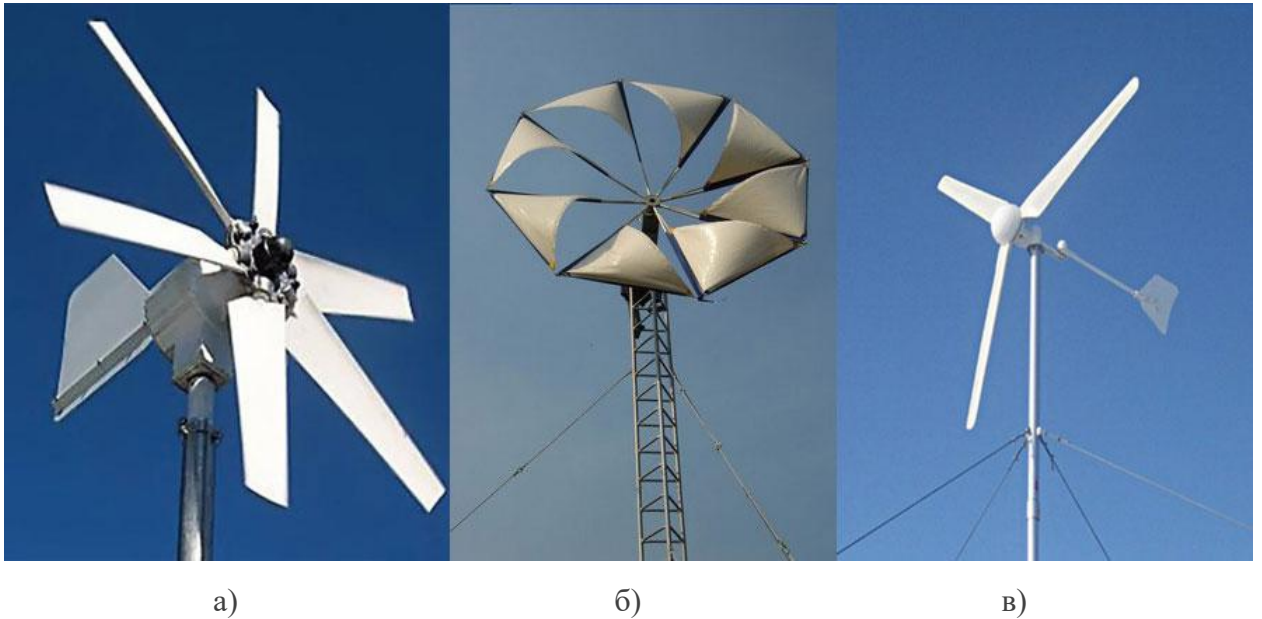


Рисунок 1.8 – Примеры горизонтально-осевых ВЭУ:
 а – тихоходная многолопастная ВЭУ; б – горизонтально-осевая ВЭУ парусного типа;
 в – трехлопастная ВЭУ

В общем случае механическую мощность ВЭУ можно посчитать по формуле [136]:

$$N = 0,5 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S \cdot C_p, \quad (1.6)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; V – скорость ветра, м/с ; S – ометаемая площадь ветроколеса, м^2 ; C_p – коэффициент использования энергии ветрового потока.

Для горизонтально-осевых ветроэнергетических установок ометаемая площадь определяется по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (1.7)$$

где D – диаметр ветроколеса, м^2 .

Для вертикально-осевых эта площадь эквивалентна площади проекции цилиндра (классический ротор Савониуса) на плоскость параллельную оси вращения (площадь миделевого сечения):

$$S = D \cdot h, \quad (1.8)$$

где h – высота ротора, м .

Коэффициент использования мощности C_p определяется следующим образом:

$$C_p = \frac{N_{ВД}}{N_{ветра}}, \quad (1.9)$$

Базовой характеристикой ветродвигателя является быстроходность z , являющаяся функцией скорости конца лопасти ветроколеса диаметром D и скорости ветра V :

$$z = \frac{\omega D}{2V}, \quad (1.10)$$

Зависимость коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности z определяется аэродинамической характеристикой ветродвигателя, показанными на рисунке 1.9 [123].

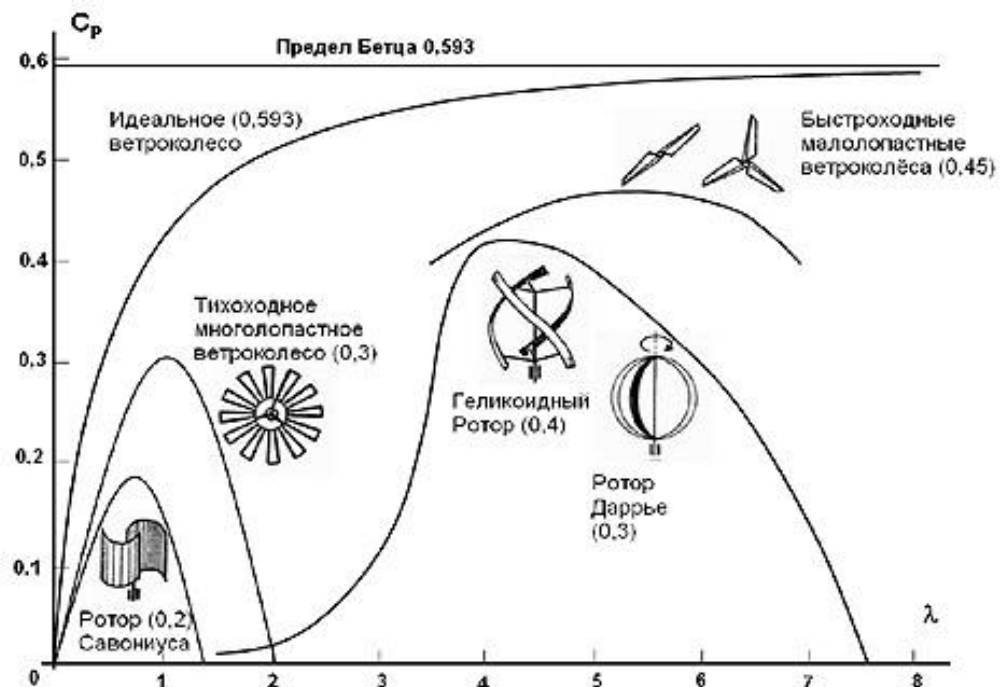


Рисунок 1.9 – Зависимости коэффициента использования энергии ветрового потока от быстроходности различных ветродвигателей (аэродинамические характеристики ветродвигателей)

Из рисунка 1.9 и формулы (1.6) видно, что конструкция ветродвигателя сильно влияет на развиваемую мощность ВЭУ. Самые большие коэффициенты использования ветрового потока имеют ветродвигатели, работающие на подъемной силе (геликоидный ротор и двух- и трехлопастные горизонтально-осевые ВЭУ) по сравнению с ротором Савониуса и тихоходным многолопастным ветроколесом и ветроколесом парусного типа с $C_p=0,15-0,19$ (на рисунке 1.9 не показан).

При моделировании наибольшую сложность вызывает аналитическое определение коэффициента использования ветрового потока, ввиду нелинейности аэродинамических процессов, происходящих при взаимодействии ветрового потока с лопастями ветродвигателя.

Зависимость величины C_p от быстроходности z можно аналитически аппроксимировать функцией [5]:

$$C_p(z) = \left(\frac{c_1}{z} - c_2\right) e^{-\frac{c_3}{z}} + c_4, \quad (1.11)$$

где $C_1 \div C_4$ – коэффициенты для получения характеристики C_p близкой к реальной.

Также для определения C_p может использоваться аналитическое выражение [138]:

$$C_p(\lambda(z, \theta), \theta, z) = 0.517 \left[\frac{116}{\lambda(z, \theta)} - (0.4\theta - 5) \right] e^{-\frac{21}{\lambda(z, \theta)}} + 0.0068z, \quad (1.12)$$

которое позволяет еще учитывать угол θ наклона лопасти ротора по нормали от направления ветра (град.).

Значение $\lambda(z, \theta)$ определяется по выражению [5, 138, 147]:

$$\lambda(z, \theta) = \frac{1}{\frac{1}{z+0,08\theta} - \frac{0,035}{\theta^3+1}} \quad (1.13)$$

В случае овцеводческих хозяйств при стойлово-пастбищном содержании овец габариты ВЭУ должны быть минимальными для удобного демонтажа и перевозки установки на место летнего выпаса.

Главным преимуществом вертикально-осевых ВЭУ является отсутствие необходимости ориентирования по ветру и более высокие значения предельной скорости ветра [28, 61]. К тому же многие авторы относят к преимуществам низкую стартовую скорость (около 3-4 м/с), то есть такие ВЭУ начинают вырабатывать энергию от 4 м/с. Однако из формулы (1.6) видно, что мощность на валу ВЭУ имеет кубическую зависимость от скорости ветра. То есть при паспортной мощности ВЭУ, к примеру, 1 кВт с номинальной скоростью ветра 12 м/с, данная установка при 4 м/с будет выдавать лишь 37 Вт.

Ротор Савониуса относится к тихоходным ВЭУ. Основным его преимуще-

ством является простота конструкции, то есть возможность сконструировать ветродвигатель самостоятельно. Однако, исходя из формулы (1.6) для создания мощности на валу ВЭУ в 1 кВт с учетом $C_p=0,2$ (рисунок 1.9) при достаточно редком в нашем регионе ветре 7 м/с площадь миделевого сечения будет составлять:

$$S = \frac{1000}{0,5 \cdot 1,226 \cdot 7^3 \cdot 0,2} = 23,8 \text{ м}^2.$$

То есть при высоте ветродвигателя 4 м, диаметр ротора должен быть почти 6 м. Таким образом, при внушительных размерах она развивает незначительную мощность, так как работают на силе сопротивления и имеют низкий C_p . Именно поэтому они не нашли широкого применения.

Ротор Дарье относится к быстроходным ВЭУ, работает на подъемной силе и имеет C_p в 1,5-2 раза выше, чем у ротора Савониуса. Однако важным недостатком является отсутствие автоматического старта ветроколеса при возрастании скорости ветра. Для этого у мощных установок генератор включается в двигательный режим, а после старта переключается в генераторный. У ВЭУ малой мощности для старта на валу ветроколеса устанавливается ротор Савониуса (рисунок 1.7, б), но при выводе ротора Дарье в номинальный режим работы, стартовый ротор Савониуса будет снижать общий коэффициент использования энергии ветрового потока, так как режим его работы выходит за область его аэродинамической характеристики (рисунок 1.9).

В целом вертикально-осевые ВЭУ имеют C_p ниже, чем у горизонтально-осевых. Объясняется это тем, что лопасти вертикально-осевых ВЭУ всегда работают при изменяющихся углах атаки, в отличие от горизонтально-осевых ВЭУ. У лучших образцов одно-, двух- и трехлопастных горизонтально-осевых ветродвигателей, работающих на подъемной силе, C_p примерно одинаковый и составляет около 0,45.

Стоимость современных ВЭУ мощностью 1 кВт различной конструкции колеблется в зависимости от комплектации от нескольких десятков до нескольких сотен тыс. рублей. Так, например, «Росветрогенератор» предлагает модели АТОН ВС-1, ROSVETRO LW-1К, ROSVETRO LT-1К стоимостью 155-215 тыс. рублей при номинальных рабочих скоростях ветра 11 м/с [17]. Другой крупный произво-

дитель ВЭУ «Yasheltechnologies» представляет ВЭУ мощность 1 кВт стоимостью 63-225 тыс. рублей [16] с номинальной рабочей скоростью ветра до 15 м/с.

Из приведенных данных становится ясно, что выпускаемые промышленностью ВЭУ не подходят под полученные выше энергетические характеристики, так они производятся на номинальную скорость ветра 10-15 м/с. Согласно формулам (1.6) и (1.7), для получения мощности в 1 кВт при скоростях ветра 6-7 м/с необходимо иметь размеры ветродвигателя, соответствующие заводским моделям мощностью 5-6 кВт в зависимости от расчетной номинальной скорости ветра.

Стоимость ВЭУ мощностью 5 кВт различной конструкции в зависимости от комплектации находится в пределах от нескольких сот тысяч до более миллиона рублей. ВЭУ моделей ROSVETRO LT-5K, ROSVETRO FK-5K, ROSVETRO LW-5K, АТОН ВС-5, ROSVETRO РС-5К, рассчитанные на номинальные скорости ветра 10-12 м/с, «Росветрогенератор» предлагает за 570-1090 тыс. рублей [17]. «Yasheltechnologies» свою модель YASHEL DMWT-5KW на номинальную скорость ветра 10 м/с предлагает за 700 тыс. рублей [16]. У других поставщиков цены на модели с аналогичными характеристиками находятся примерно в тех же пределах.

Однако возможно изготовление лопастей ветродвигателя в домашних условиях (рисунок 1.10), но необходимо учитывать, что качество «кустарно» изготовленных лопастей всегда будет уступать заводскому исполнению. К тому же самостоятельно изготовить лопасть в виде крыла почти невозможно, поэтому коэффициент C_p для ВЭУ с лопастями, изготовленными в виде лопаток, как показано на рисунках 1.10 и 1.11, будет составлять около 0,3 (рисунок 1.9). Таким образом, для достижения мощности в 1 кВт на валу ВЭУ при лопастях в виде самолетного крыла, то есть при $C_p=0,45$ и скорости ветра 10 м/с согласно формулам 1 и 2 длина лопасти должна быть 1,1 м, а при тех же параметрах и лопастях в виде лопаток ($C_p=0,3$) их длина должна быть уже 1,3 м.

Также следует отметить, что самостоятельное изготовление лопастей возможно только для ВЭУ сверхмалой и малой мощности, так как прочностные характеристики пластиковой лопасти с увеличением длины резко снижаются.

Недостатком горизонтально-осевых установок по сравнению с вертикально-

-осевыми является необходимость установки ВЭУ по направлению ветра, то есть установка работает в режиме постоянного рысканья. Однако в установках малой мощности этот недостаток решается простой установкой хвостового стабилизатора, как показано на рисунке 1.8, а и в.



Рисунок 1.10 – Самодельные лопасти из пластика для горизонтально-осевой ВЭУ

Также недостатком горизонтально-осевых ВЭУ является более низкая предельная рабочая скорость ветра, после чего ВЭУ необходимо выводить из-под ветра для избегания динамического разрушения установки.

На большинстве серийно выпускаемых ВЭУ малой мощности данная проблема решается торможением ветроколеса при закорачивании контроллером обмоток генератора, при этом возникает большой тормозной электромагнитный момент. Но данный метод является несовершенным, поскольку ветроколесо остается под аэродинамической нагрузкой. Существует способ автоматического поворота лопастей (пружинная система) и, соответственно, изменения угла атаки при достижении предельного значения скорости ветра. Еще одним способом увода ВЭУ из-под ветра является система складывания хвостового стабилизатора, показанная на рисунке 1.11. Данный способ достигается благодаря использованию пружинно-рычажной системы с установкой дополнительного «ветроулавливателя». При достижении определенной критической скорости ветра, которая настраивается жесткостью пружины, «ветроулавливатель» через рычажную систему уводит ветроколесо в сторону от набегающего потока [15].

Таким образом, изготовить самостоятельно возможно ветродвигатели обоих

видов: и ротор Савониуса, и горизонтально-осевой ветродвигатель пропеллерного типа, однако их аэродинамические характеристики всегда будут уступать ветродвигателям заводского исполнения, то есть при одинаковых выходных мощностях размеры ветродвигателей собственного изготовления должны быть больше и рассчитываться согласно формулам 1.1-1.3 и данным из рисунка 1.9. К тому же ротор Савониуса при равных мощностях по массогабаритным показателям значительно уступает горизонтально-осевым ветродвигателям, в первую очередь ввиду самой конструкции ротора и значительно меньшего C_p (рисунок 1.9).

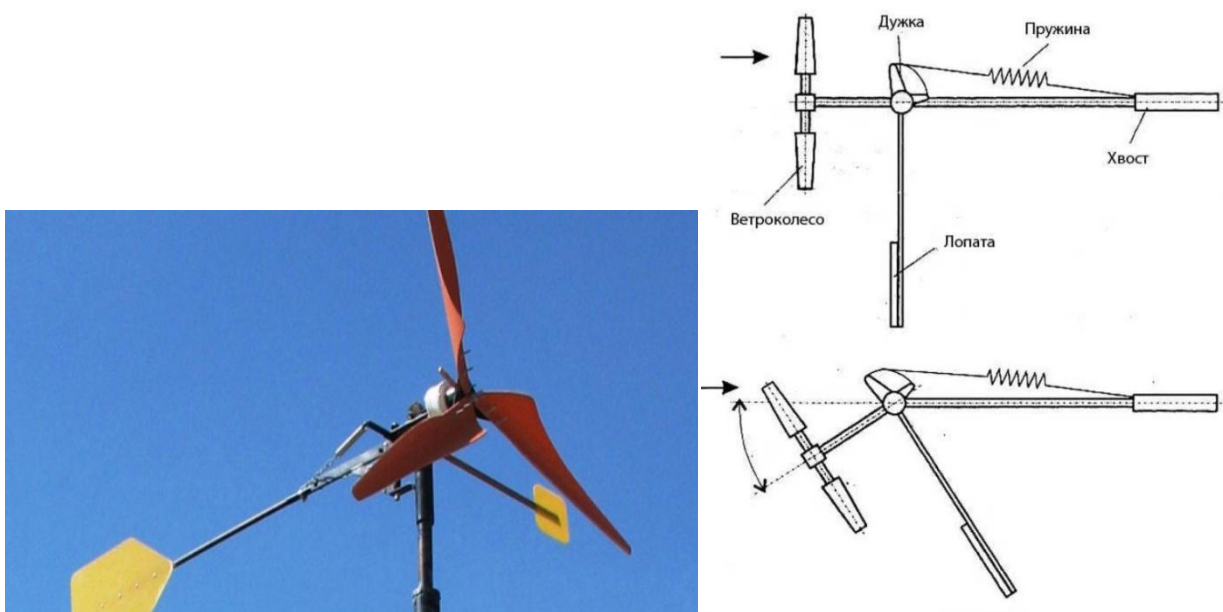


Рисунок 1.11 – Устройство вывода малой горизонтально-осевой ВЭУ из-под ветра

Большое значение при выборе ВЭУ имеет тип применяемого генератора [27, 31, 62, 89]. В современных ВЭУ преимущественно применяется 2 вида генераторов электрической энергии: синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) и машины с двойным питанием (асинхронные генераторы с фазным ротором). Однако для автономных установок малой мощности не имеет смысла рассмотрение вопроса использования в них машин двойного питания из-за высокой стоимости сложной системы управления, так как машины данного типа возбуждаются переменным током по сложному алгоритму и требуют наличия в своем составе дорогостоящего преобразователя частоты.

К достоинствам СГПМ можно отнести простоту конструкции и, как следствие, высокую надежность и низкие эксплуатационные затраты. Так как возбуждение генератора происходит от постоянных магнитов, то его работа осуществляется во всем диапазоне скоростей, в отличие от других видов генераторов [9, 134].

Однако, при всех преимуществах им присущи серьезные недостатки: сложность стабилизации выходных параметров электроэнергии и высокая стоимость, в первую очередь, обусловленная высокой ценой применяемых магнитов. Также стоимость сильно зависит от числа пар полюсов, изготавливаемых генераторов. При этом предлагаемые на рынке генераторы хоть и являются тихоходными (200-500 об/мин) тем не менее, требуют применения повышающих редукторов, а также обладают значительными массогабаритными параметрами, что в итоге косвенно отобразится на стоимости мачты ВЭУ. К тому же, СГПМ производятся на выходное напряжение 24/48/96 В (у генераторов небольшой мощности), что исключает возможность их применения без статических преобразователей энергии. К недостаткам генераторов большой мощности с выходным напряжением 220/380 В необходимо отнести сложность стабилизации выходных параметров электроэнергии. Кроме того, генераторы большой мощности являются машинами индивидуального исполнения, что в большой степени отражается на итоговой стоимости.

На рисунке 1.12, а представлены графические зависимости рыночной стоимости СГПМ от мощности, а на рисунке 1.12, б – зависимости массы СГПМ от мощности.

Для согласования выходного напряжения генератора с нагрузкой сейчас используют различные методы. Для регулирования напряжения в синхронных генераторах применяют дополнительные устройства, такие как конденсаторы, дроссели с подмагничивающей обмоткой и другие, которые стабилизируют напряжение. Эти дополнительные устройства существенно влияют на габариты и массу автономного источника электроэнергии [66, 129].

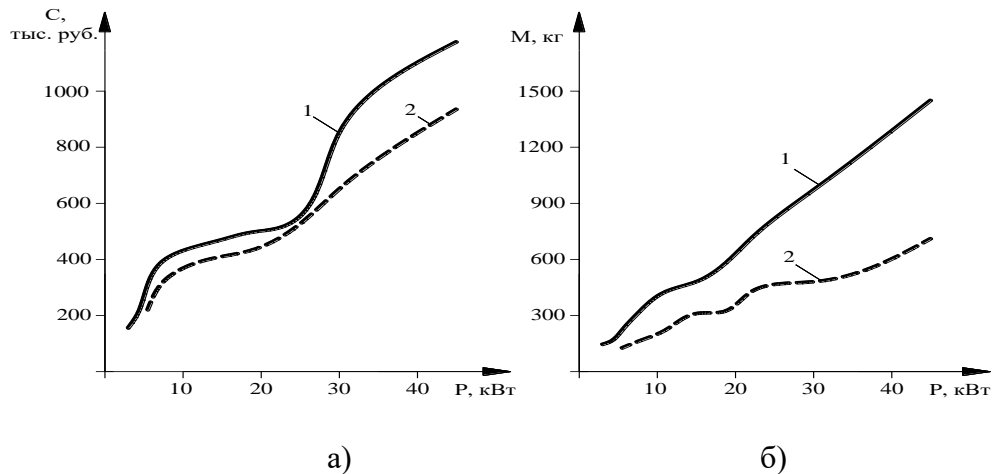


Рисунок 1.12 – Зависимости стоимости (а) и массы (б) СГПМ от мощности:
 1 – с номинальной частотой вращения 230 об/мин; 2 – с номинальной частотой вращения 470 об/мин

Один из эффективных способов обеспечения стабильности напряжения в синхронных генераторах - включение дополнительной обмотки постоянного тока. Подмагничивающая обмотка изменяет степень насыщения магнитопровода машины, что позволяет изменять внешнюю магнитную проводимость относительно магнита. Однако указанный способ требует внесения изменений в конструкцию электрической машины.

Виду вышесказанного целесообразным представляется применение в составе ВЭУ малой мощности серийных асинхронных машин в качестве АГ с емкостным возбуждением [75, 145]. Главными достоинствами АГ является простота конструкции, высокая надежность и относительно низкая стоимость [140]. Однако режим работы АГ ВЭУ обусловлен переменной частотой вращения ротора ввиду изменения скорости ветра и изменением величины нагрузки, что приводит к изменению величины выходного напряжения генератора и требует его стабилизации [51- 53, 55, 139, 149]. Таким образом, АГ присущи недостатки:

- 1) чувствительность к перегрузкам, что может привести к развозбуждению;
- 2) сложность регулирования выходного напряжения.

На рисунке 1.13 показаны зависимости стоимости и массы асинхронных генераторов от мощности. Для анализа были выбраны асинхронные машины серии АИР с номинальной скоростью вращения вала 750 об/мин (4 пары полюсов).

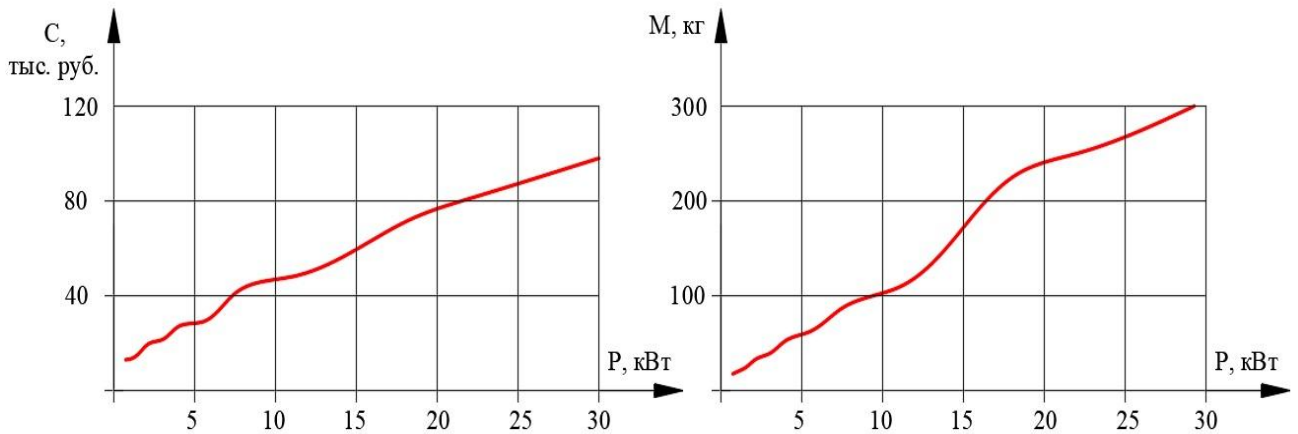


Рисунок 1.13 – Зависимости стоимости и массы асинхронных машин от мощности

Под стабилизацией напряжения обычно подразумевается поддержание напряжения на нагрузке за счет регулирования основного магнитного потока таким образом, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным или изменялось в пределах допустимых значений [64, 65].

Стабилизация напряжения АГ при переменной нагрузке и скорости вращения ротора возможна регулированием основного магнитного потока [126–128].

Стабилизация напряжения АГ изменением основного магнитного потока возможна при [126–128]:

- 1) подмагничивании спинки статора генератора;
- 2) изменении напряжения на возбуждающих конденсаторах;
- 3) изменении емкости возбуждающих конденсаторов;
- 4) применении феррорезонансного стабилизатора напряжения;
- 5) применении управляемых реакторов;
- 6) применении конденсаторов с переменной (регулируемой) диэлектрической проницаемостью;
- 7) компаундировании возбуждения.

Все представленные способы регулирования напряжения АГ имеют недостатки. Для дальнейшего анализа выделим 2 способа.

Изменение напряжения на возбуждающих конденсаторах при реостатном регулировании. Это приводит к значительным потерям, однако при энергоэффек-

тивном использовании вырабатываемой электроэнергии, выделяемое на реостате тепло можно, например, использовать для подогрева воды на технологические нужды или обогрева помещения.

Изменение емкости конденсаторов возбуждения. Этот способ не дает возможности плавного регулирования выходного напряжения АГ, усложняет эксплуатацию генераторной установки наличием коммутационной аппаратуры снижающей надежность всей системы. Использование конденсаторных батарей с малым шагом регулирования емкости позволяет небольшого диапазона изменения выходного напряжения за счет увеличения числа коммутаций.

Таким образом, можно сделать вывод, что высокая цена современных ВЭУ малой мощности представленных на рынке обуславливается относительно сложным процессом изготовления лопастей ветродвигателей и, соответственно, их высокой стоимостью с одной стороны, а также дорогими генераторами, построенными на постоянных магнитах из редкоземельных материалов с другой стороны. Для обеспечения эффективного и экономически целесообразного энергоснабжения овцеводческих хозяйств в условиях рассмотренного региона и регионов со схожими параметрами распределения ветра целесообразно разрабатывать и производить ВЭУ малой мощности (до 5 кВт) на базе АГ.

1.4 Существующие исследования по асинхронным генераторам

Среди российских ученых наибольшее число публикаций и патентов по исследованию асинхронных генераторов имеют: Алиев И.И. [1–3], Богатырев Н.И. [6, 10, 101, 102, 104], Баракин Н.С. [141-144], Григораш О.В. [29, 33–36], Джендубаев А.-З.Р. [37–39], Домбровский В.В. [40], Зубков Ю.Д.[44, 45], Кицис С.И. [69, 70], Копылов И.П. [72, 73], Лищенко А. И.[77, 78], Торощев Н.Д. [126–128], Фаренюк А.П.[131], Фришман В.С. [132, 133], и другие авторы.

В их публикациях рассмотрены вопросы работы АГ в различных режимах: работа генератора на сварочную дугу, выпрямительную нагрузку, рассмотрены внешние характеристики АГ и вопросы самовозбуждения, стабилизации напря-

жения и проектирования АГ.

В Кубанском ГАУ на протяжении многих лет действовала научная школа, занимавшаяся изучением и внедрением различных конструкций асинхронных генераторов и установок на их основе. Во главе научной школы стоял заслуженный изобретатель РФ, профессор Богатырев Н.И. Им были получены патенты на изобретения: «Многофункциональный автономный асинхронный генератор» [103], «Вентильный автономный асинхронный генератор» [104], «Автономный асинхронный генератор с четырехполюсной статорной обмоткой» [101], «Устройство для автоматического регулирования напряжения асинхронного генератора» [95], «Устройство для регулирования и стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора» [99] и многие другие.

Также вклад в изучение асинхронных генераторов внес профессор Стрижков И.Г. Часть его работ посвящена данной тематике, среди которых патенты на изобретение: «Асинхронный двухчастотный генератор» [96], «Асинхронно-синхронный двухчастотный генератор» [97]; статья «Математическое описание асинхронного генератора с разветвленной статорной обмоткой» [122] и другие.

Под руководством Богатырева Н.И. был защищен ряд кандидатских диссертаций по тематике асинхронных генераторов такими учеными, как Баракин Н.С., Ильченко Я.А., Креймер А.С., Оськина А.С., Синицын А.В. и др. [8, 46, 74, 92, 117].

Также необходимо отметить диссертацию Соболя А.Н. [119], выполненную под руководством профессора Богдана А.В. и посвященную защите автономных асинхронных генераторов сельскохозяйственного назначения от витковых коротких замыканий.

Известно устройство для автоматического регулирования напряжения АГ предназначено для питания нагрузки соизмеримой мощности (рисунок 1.14) [95]. В устройстве реализована система параллельного и последовательного возбуждения АГ. К недостаткам следует отнести сложность схемы управления стабилизатором.

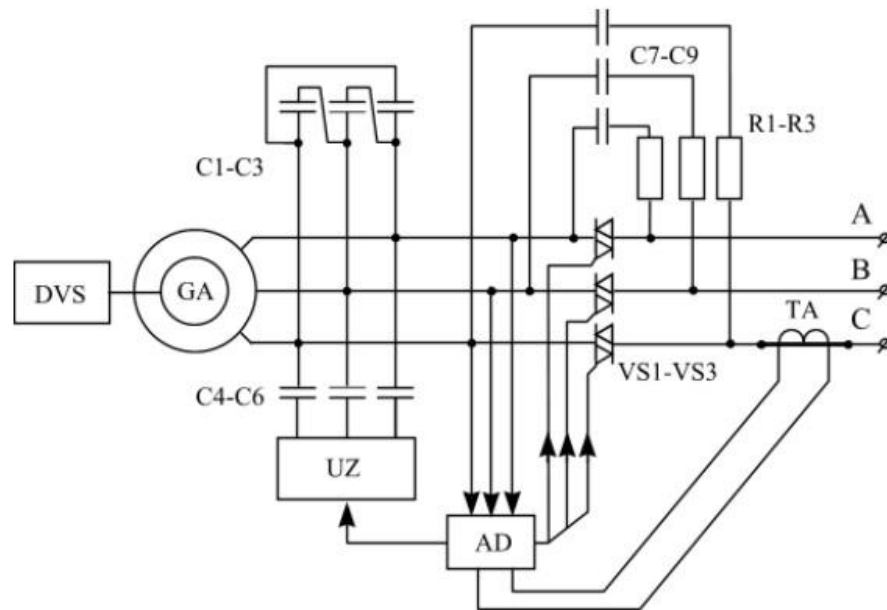


Рисунок 1.14 – Схема стабилизации напряжения АГ автономного источника:
 GA – асинхронный генератор; C1-C3 – конденсаторы возбуждения; C7-C9 – группа пусковых конденсаторов; UZ – схема управления; AD – блок управления; VS1-VS3 – симисторы;
 R1-R3 – токоограничивающие резисторы

Другое устройство для регулирования и стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора (рисунок 1.15) [99] содержит автономный АГ 1, к фазам статора которого подключены батарея некоммутируемых конденсаторов 2, блок управления 4, трехфазные электронные оптомимисторные ключи 5, 6, 7. Эти ключи соединены выходами с батареями коммутируемых конденсаторов 8, 9, 10, а оптронными входами 11, 12, 13 с блоком управления 4.

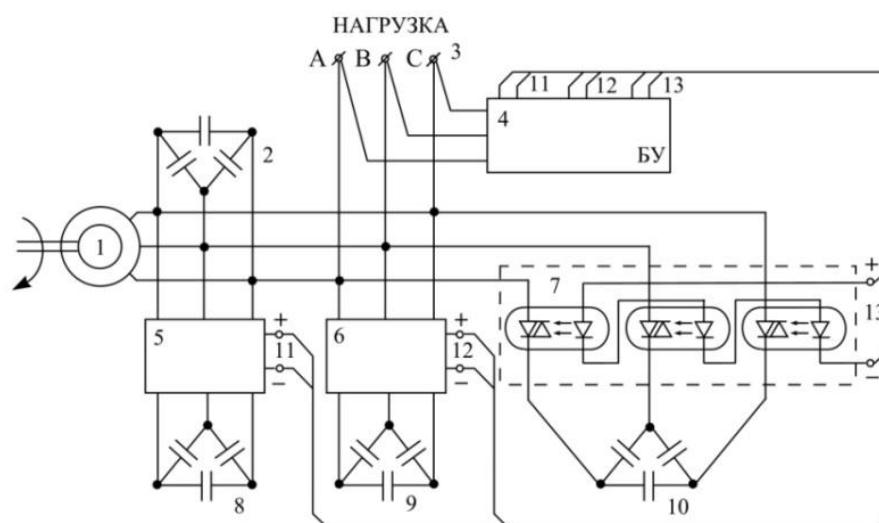


Рисунок 1.15 – Схема для регулирования и стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора

Принцип работы устройства заключается в том, что при изменении напряжения на выходе генератора трехфазные оптосимисторные ключи 5-7 по сигналу блока управления 4 подключают или отключают батареи конденсаторов 8, 9, 10. Коммутация происходит при переходе напряжения через ноль, поэтому отсутствуют гармонические составляющие тока и напряжения, а также коммутационные перенапряжения и помехи. Недостатком схемы можно считать дискретность регулирования напряжения и высокие массогабаритные параметры конденсаторных батарей, а также значительное число коммутационных аппаратов.

Также известно устройство для стабилизации частоты и напряжения автономных бесконтактных генераторов [98], показанное на рисунке 1.16. Устройство содержит АГ (1), последовательно соединенные непосредственный преобразователь частоты (2), выходной фильтр (3), блок трансформаторов тока (4), выходные выводы (5). Выход генератора соединен также с конденсаторами возбуждения (6), которые соединены с блоком стабилизации напряжения (7), содержащим выпрямитель (8), силовой транзистор (9), систему управления (10), вход которой соединен с выходными выводами (5) преобразователя через трансформаторно-выпрямительный блок (11). Блок косинусной синхронизации (12) соединен с выходом генератора (1) и с блоками формирования управляющих сигналов (13, 14 и 15), с которыми соединен также задающий генератор частоты (16); каждый блок формирования управляющих сигналов (13, 14, 15) содержит первый и второй компараторы (17 и 18), первый и второй логические элементы И (19, 20), первый и второй распределители импульсов (21, 22), датчик тока (23).

Суть стабилизации напряжения данного устройства заключается в следующем: при изменении напряжения на выходных выводах 5, с выхода трансформаторно-выпрямительного блока 11 в систему управления 10 поступает сигнал напряжения постоянного тока, который пропорционален выходному напряжению. Система управления 10, сравнивая этот сигнал с эталонным, уменьшает или увеличивает время открытого состояния транзистора 9, тем самым уменьшает или увеличивает величину емкостного тока и обеспечивает компенсацию реактивной мощности, что приводит к стабилизации напряжения на выходе генератора 1.

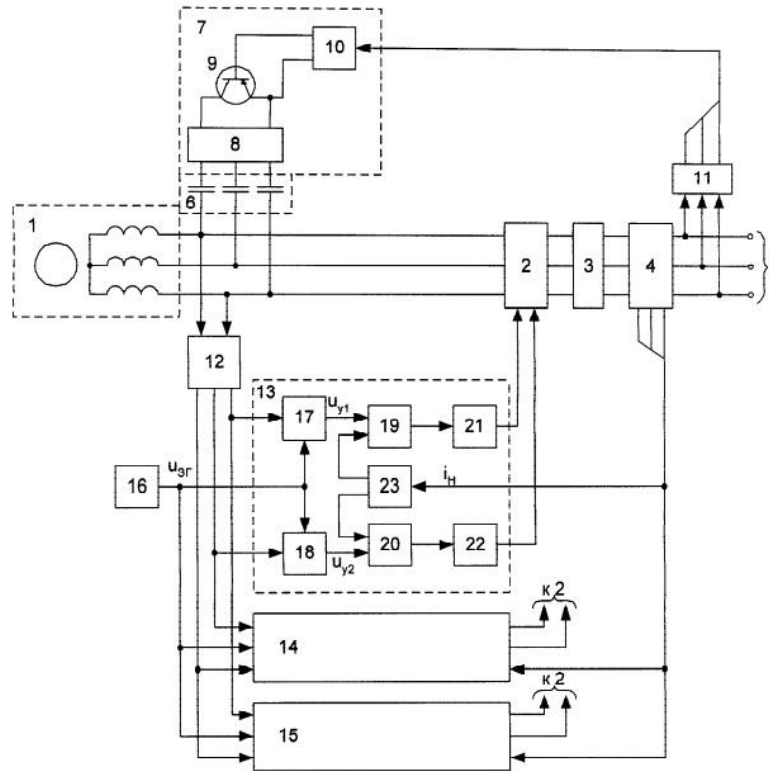


Рисунок 1.16 – Устройство для стабилизации частоты и напряжения автономных бесконтактных генераторов

Недостатком системы стабилизации напряжения является наличие биполярного транзистора в звене постоянного тока и сущность регулирования им тока возбуждения. То есть неясно, как отразится постоянное коммутирование тока возбуждения в звене постоянного тока на устойчивость работы АГ. Теоретических аспектов такого регулирования в работе не приводится.

Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки [102] представлено на рисунке 1.17.

Устройство содержит ветроколесо ВК, соединенное с мультипликатором М (редуктором), выход которого соединен через ведущий вал с электромагнитной муфтой ЭМ, имеющей обмотку управления ОУ, и с короткозамкнутым ротором асинхронного генератора АГ, к выводам А, В и С которого подключается нагрузка, система стабилизации частоты ССЧ и систему стабилизации напряжения ССН. В свою очередь в ССЧ и ССН входят блок конденсаторов возбуждения БКВ, выпрямитель В, первый и второй транзисторы VT1 и VT2, первый и второй усилители импульсов УИ1 и УИ2, формирователь импульсов ФИ, первый и второй

трансформаторно-выпрямительные блоки ТВБ1 и ТВБ2, задающий генератор ЗГ, генератор импульсов ГИ.

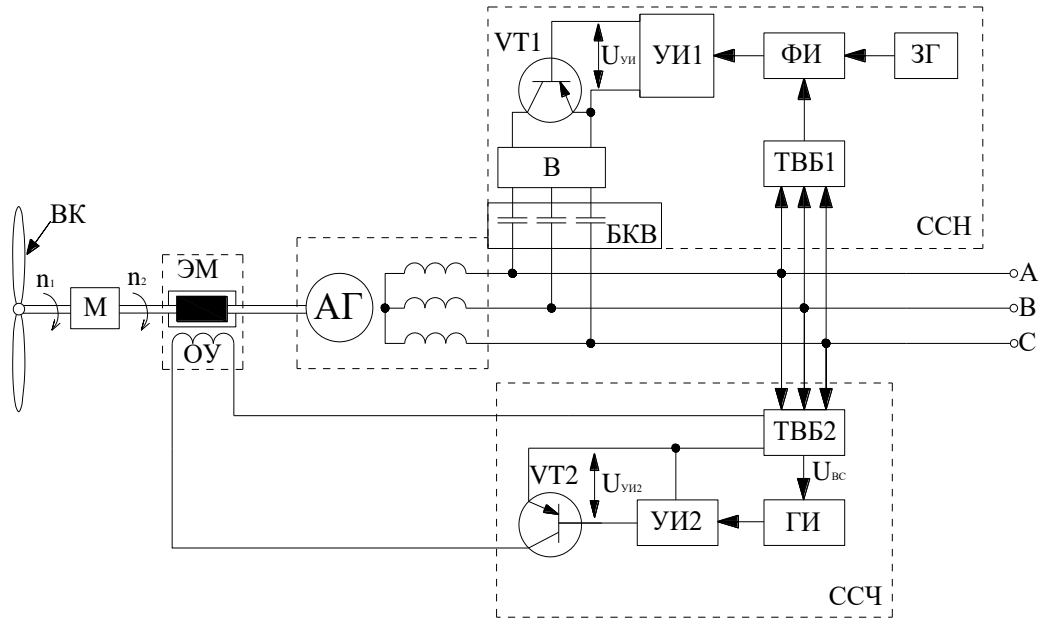


Рисунок 1.17 – Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки

Стабилизация напряжения осуществляется следующим образом: при изменении скорости вращения ветроколеса, либо при изменении нагрузки на выводах АГ меняется выходное напряжение. Этот сигнал через трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ1 поступает на формирователь импульсов ФИ, куда одновременно с этим приходит сигнал с задающего генератора ЗГ. Формирователь импульсов ФИ генерирует соответствующий изменению напряжения сигнал, который через усилитель импульсов УИ1 прикладывается к выводам транзистора VT1 и тем самым изменяет время открытого его открытого состояния, уменьшая или увеличивая величину емкостного тока и обеспечивая компенсацию реактивной мощности, что приводит к стабилизации напряжения на выходе асинхронного генератора АГ.

Силовая схема блока стабилизации напряжения не отличается от указанной в [98], ввиду чего данному устройству присущи те же недостатки.

Анализ работ показал, что все изобретения [43, 95-100,102-104] носят практическую значимость и не раскрывают теоретические аспекты работы асинхронных генераторов.

В диссертации [117] рассматривается процесс самовозбуждения асинхронного генератора на T-образной схеме замещения асинхронной машины, и результаты сводятся к принятой большинством ученых форме, когда самовозбуждение происходит за счет остаточной намагниченности стали машины и ограничивается точкой пересечения вольтамперных характеристик конденсаторов возбуждения и АМ.

Однако в работах [38, 119] была представлена математическая модель АГ, выполненная с учетом [23], в которой устойчивый режим работы АГ создавался только за счет остаточной индукции ротора и статора при линейных параметрах электрической машины. Процесс самовозбуждения и последующей устойчивой работы при постоянном внешнем механическом моменте полученный [119] по математической модели АГ в α , β координатах показан на рисунке 1.18. Параметры схемы замещения в уравнениях этой модели заданы в относительных единицах и являются линейными, что не соответствует теории, рассматриваемой в [14, 68, 73, 117]. При этом наблюдается самовозбуждение генератора с возникновением устойчивых колебаний напряжения (рисунок 1.18). Вопросы величины амплитуды установившихся колебаний напряжения в работе не рассматриваются.

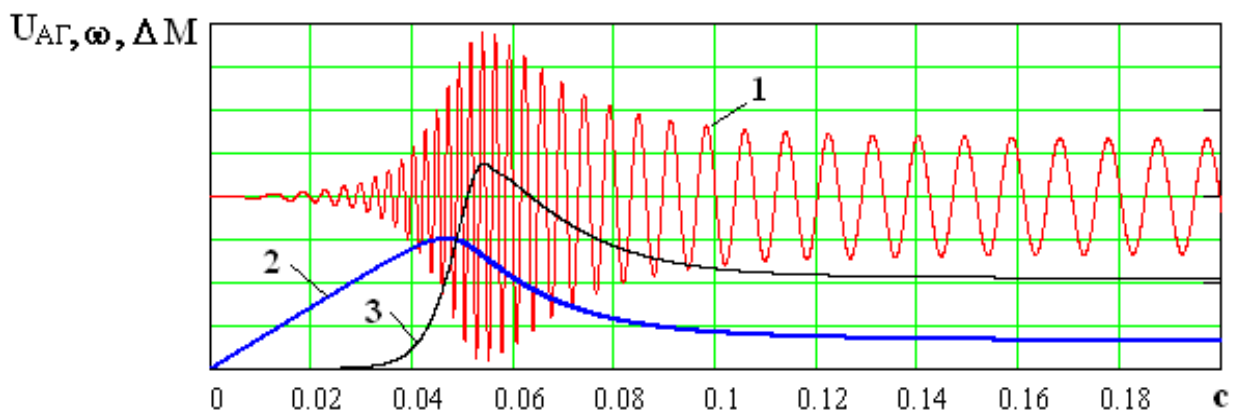


Рисунок 1.18 – Процесс самовозбуждения АГ в двухфазной математической модели:
1 – выходное напряжение АГ; 2 – частота выходного напряжения; 3 – момент на валу генератора

Причем представленная математическая модель АГ не отличается от модели, показанной в работе [46], то есть параметры модели по-прежнему являются линейными и не могут дать правильного представления о величине амплитуды установившегося напряжения после самовозбуждения и эти вопросы также в работе не рассматриваются. То же касается и математического описания АГ в [122],

где все параметры в уравнениях являются линейными и объяснений вопросов самовозбуждения и величины установившихся колебаний напряжения после возбуждения не приводится.

В [8] сделана попытка внести нелинейность в математическую модель. Сама модель представлена 3-х фазных координатах, а нелинейность намагничивания электротехнической стали задается функцией уменьшения магнитной связи между обмотками АГ $f(B)$ (где B – значение индукции в воздушном зазоре), показанной на рисунке 1.19. Однако в работе лишь указывается, что данная зависимость построена на основе опыта холостого хода, но вопрос, каким именно образом была получена характеристика, в работе не рассматривается.

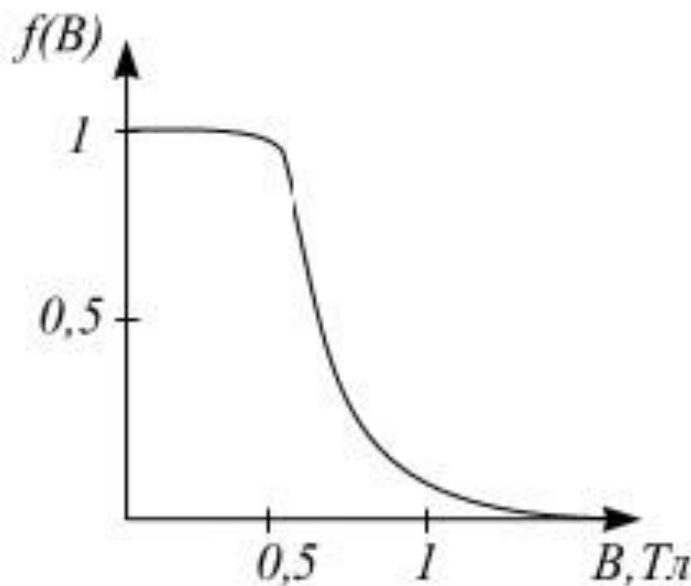


Рисунок 1.19 – Функция уменьшения магнитной связи между обмотками АГ

Таким образом, все математические модели в указанных выше работах дают самовозбуждение АГ с возникновением устойчивых колебаний напряжения, но не подходят для изучения вопросов регулирования выходного напряжения АГ, поскольку в них отсутствует нелинейность намагничивания электротехнической стали машины, которая необходима для определения величины установившегося после самовозбуждения напряжения. Вопросы самовозбуждения АГ при линейных параметрах математических моделей также остаются не решенными.

1.5 Выводы по главе и задачи исследований

Для электроснабжения овцеводческой фермы допустимо применение ВЭУ с АГ, так как электрической нагрузкой в этих хозяйствах являются в основном потребители активного переменного тока, а их общая мощность составляет 1-3 кВт.

Для решения вопроса стабилизации выходного напряжения АГ были изучены известные работы по АГ. Несмотря на большое количество трудов по данной тематике, в них недостаточно изучен вопрос учета насыщения магнитной системы АГ, необходимого для рассмотрения процесса стабилизации выходного напряжения. В этих работах учет насыщения магнитной системы АГ являлся условием возникновения установившегося режима. Анализ процессов и определение критериев существования установившегося режима АГ необходимы для рассмотрения процесса стабилизации выходного напряжения, для которого существенное влияние оказывает именно насыщение магнитной системы АГ. В известных математических моделях [46, 119] параметры являются полностью линейными, но при этом наблюдается возбуждение АГ с возникновением устойчивых колебаний выходного напряжения. Данные математические модели не подходят для изучения процесса стабилизации выходного напряжения ВЭУ, так как в них отсутствуют ограничения связанные с насыщением магнитной системы АГ, что приведет к неограниченному возрастанию напряжения при увеличении числа оборотов ветродвигателя.

Следует показать, что насыщение является частью условия установившегося режима работы АГ после его возбуждения, и для изучения процесса стабилизации выходного напряжения ВЭУ необходимо разработать математические модели, учитывающие влияние ограничений связанных с насыщением магнитной системы АГ.

Разрабатываемое устройство стабилизации напряжения АГ должно улучшать режим работы ВЭУ с учетом изменяющихся скоростей ветрового потока, колебаний нагрузки и влияния нелинейности характеристики намагничивания АГ.

Проблема состоит в том, что, несмотря на большое разнообразие комплектации АСЭ с использованием ВЭУ и научных разработок по данной теме, остаются

ся недостаточно исследованными методы стабилизации напряжения автономных АГ в составе ВЭУ малой мощности при воздействии дестабилизирующих факторов, возникающих в процессе их эксплуатации.

Рабочая гипотеза: если провести исследование совместной работы ветродвигателя и автономного АГ с введением активного сопротивления в цепь возбуждения, то можно повысить стабильность работы ВЭУ при колебаниях скорости ветра и изменении нагрузки.

Целью диссертационного исследования является обоснование параметров и режимов работы системы стабилизации напряжения автономного АГ для устойчивого электроснабжения овцеводческих хозяйств.

Задачи исследований:

1. Провести анализ влияния на процесс возбуждения и установившийся режим АГ линейной характеристики его магнитной системы.
2. Предложить способ учета насыщения магнитной системы АГ для разработки адекватной математической модели.
3. Разработать математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ.
4. Разработать алгоритм решения уравнений модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для определения параметров и режимов работы ВЭУ.
5. Разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы стабилизатора напряжения и алгоритм работы системы управления стабилизатором.
6. Изготовить установку, провести эксперимент и сопоставить результаты математического моделирования стабилизации напряжения АГ с экспериментальным исследованием.
7. Провести технико-экономическую оценку производства ВЭУ, выполненных на АГ для овцеводческих хозяйств.

2 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И НАСЫЩЕНИЯ В АСИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ

2.1 Анализ влияния на процесс возбуждения и установившийся режим АГ нелинейности характеристики его магнитной системы

Сложным в теоретическом отношении является обоснование причин возникновения устойчивых колебаний напряжения. Положим, что необходимым и достаточным условием для этого является наличие остаточной ЭДС ротора. У [108, 127] указано, что процесс возбуждения АГ протекает так же, как и у генератора постоянного тока. Графически он может быть условно представлен ступенчатой линией, проходящей между кривой намагничивания и вольтамперной характеристикой конденсатора (рисунок 2.1), где U_k , U_1 – зависимости напряжения на емкости и на нелинейной индуктивности намагничивания АГ. Для линейной ВАХ АГ точка пересечения с ВАХ конденсаторов отсутствует, однако существующие математические модели показывают возбуждение такого АГ только за счет остаточной намагниченности с возникновением устойчивых колебаний выходного напряжения.

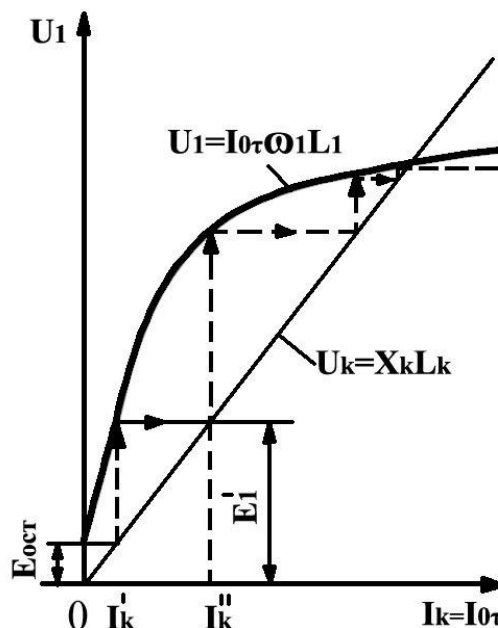


Рисунок 2.1 – Самовозбуждение асинхронного генератора с остаточным полем ротора – графическое изображение процесса самовозбуждения

Нарастающие колебания напряжения с изменением частоты и амплитуды постепенно приводят к насыщению магнитопровода и изменению индуктивных параметров машины. Согласно общепринятому мнению точка пересечения характеристик соответствует условию установившегося режима, для которого справедливо равенство [69], определяемое точкой пересечения ВАХ емкости и ВАХ АГ:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (2.1)$$

где L – полная индуктивность фазы генератора; ω_0 – частота установившихся колебаний.

О необходимости учета нелинейности характеристики намагничивания АГ отмечалось в разделе 1.4. Возможность возникновения устойчивого режима на основе анализа частотных характеристик линейных значений индуктивностей показана у [48].

Проведем анализ возможности возникновения устойчивого режима работы АГ при его линейной ВАХ. За основу при расчетах принята эквивалентная Г-образная схема одной фазы автономного АГ, ротор которого вращается с угловой скоростью ω , а к зажимам статора подключена симметричная активно-индуктивная нагрузка, приведенная на рисунке 2.2.

Для асинхронных двигателей мощностью 3 кВт и более, которые можно использовать в качестве АГ, $c_1 = 1,05 \div 1,02$, поэтому с целью облегчения анализа выражений, характеризующих свойства АГ и упрощения расчетов, примем $c_1 = 1$.

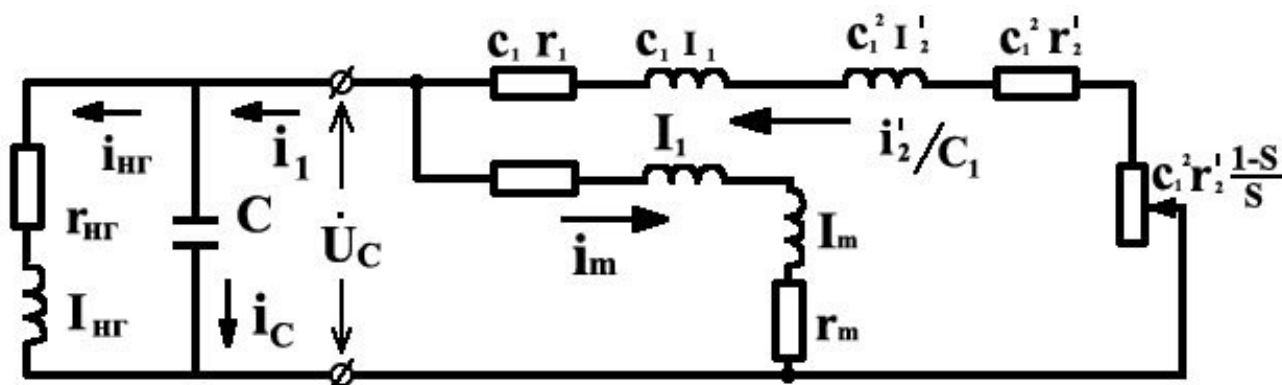


Рисунок 2.2 – Схема замещения АГ с линейной L_m

В упрощенной Г-образной схеме замещения индуктивность намагничива-

ния вынесена непосредственно к выводам АГ. В такой схеме индуктивность рассеяния L_σ представляет сумму индуктивностей рассеяния статора и ротора. Активными сопротивлениями обмотки статора и потерь можно пренебречь.

На рисунке 2.3 приведена расчетная схема замещения АГ, состоящая из линейной индуктивности намагничивания L_{AG} , индуктивности рассеяния L_σ и активного сопротивления скольжения R . Нагрузкой АГ является емкость возбуждения C , сопротивление $r_{нг}$ и индуктивность $L_{нг}$.

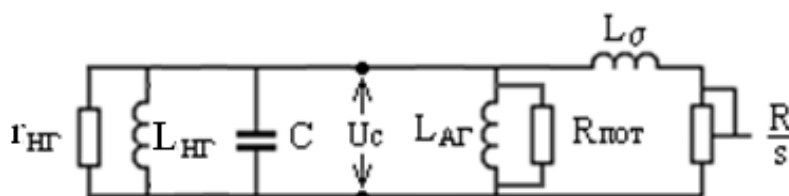


Рисунок 2.3 – Схема замещения одной фазы АГ

При параллельном включении индуктивности намагничивания АГ L_{AG} и индуктивности нагрузки $L_{нг}$ (рисунок 2.3) их можно заменить одной эквивалентной индуктивностью:

$$L_m = \frac{L_{AG}L_{нг}}{L_{AG}+L_{нг}}, \quad (2.2)$$

а активные сопротивления потерь $R_{пот}$ и нагрузки $r_{нг}$ также привести к одному $R_{нг}$:

$$R_{нг} = \frac{r_{нг}R_{пот}}{r_{нг}+R_{пот}}. \quad (2.3)$$

Устойчивый режим возбуждения АГ наступает при некоторой частоте тока статора ω создающего вращающееся магнитное поле с угловой скоростью $\omega_r = \omega/p$, где p - число пар полюсов машины. Для возникновения режима с незатухающими колебаниями требуется, чтобы в цепи общее сопротивление стало равным нулю, либо чтобы мощность, подводимая от источника, была равна мощности расходуемой в цепях АГ.

Если обозначим ω угловую частоту напряжения текущего режима, то для схемы рисунок 2.3 получим условие устойчивого режима:

$$\frac{1}{jL_m\omega} + \frac{1}{\frac{R}{s} + jL_\sigma\omega} = -\left(jC\omega + \frac{1}{R_{нг}}\right). \quad (2.4)$$

Разделим вещественную и мнимую части (2.4):

$$\frac{1}{R_{нз}} + \frac{\frac{R}{s}}{\left(\frac{R}{s}\right)^2 + \omega^2 L_\sigma^2} + j \left(\frac{1}{\omega L_m} - \frac{\omega L_\sigma}{\left(\frac{R}{s}\right)^2 + \omega^2 L_\sigma^2} + \omega C \right) = 0. \quad (2.5)$$

Можно показать, что причиной самовозбуждения генератора являются колебания, возникающие в системе с отрицательным сопротивлением на частотах, соответствующих балансу активных мощностей приводного двигателя и АГ [11].

Приравняв вещественные и мнимые части (2.5) к нулю, получим систему уравнений:

$$\text{— для активной составляющей: } \frac{1}{R_{нз}} \left[\left(\frac{R}{s}\right)^2 + L_\sigma^2 \omega^2 \right] + \frac{R}{s} = 0, \quad (2.6)$$

$$\text{— для мнимой составляющей, где } \omega C - \frac{1}{\omega L_m} \neq 0$$

$$\left(\omega C - \frac{1}{\omega L_m} \right) \left[\left(\frac{R}{s}\right)^2 + \omega^2 L_\sigma^2 \right] - \omega L_\sigma = 0. \quad (2.7)$$

Для (2.6) необходимо, чтобы скольжение s было отрицательным, что обеспечивает отрицательность $\frac{R}{s}$, т. е. соответствует режиму асинхронного генератора при частоте ω . При таком режиме работы должна потребляться внешняя механическая энергия.

Найдем зависимость условия баланса подводимой механической мощности и мощности расходуемой в схеме АГ только от частоты ω . Из (2.6) получим:

$$\left(\frac{R}{s}\right)^2 + L_\sigma^2 \omega^2 = -R_{нз} \frac{R}{s}. \quad (2.8)$$

Источником электрической энергии АГ в схеме замещения является $\frac{R}{s}$. Корни уравнения (2.8), относительно переменной $\frac{R}{s}$ имеют вид:

$$\left(\frac{R}{s}\right)_1 = -\frac{\sqrt{R_{нз}^2 - 4L_\sigma^2 \omega^2}}{2} - \frac{R_{нз}}{2}, \quad \left(\frac{R}{s}\right)_2 = \frac{\sqrt{R_{нз}^2 - 4L_\sigma^2 \omega^2}}{2} - \frac{R_{нз}}{2}. \quad (2.9)$$

При совместном решении (2.6-2.7) представим (2.7) с учетом (2.6) как

$$-R_{нз} \frac{R}{s} \left(\omega C - \frac{1}{\omega L_m} \right) - \omega L_\sigma = 0, \quad (2.10)$$

Тогда:

$$\frac{\omega L_\sigma}{\omega C - \frac{1}{\omega L_m}} + \frac{R}{s} R_{нз} = 0, \quad (2.11)$$

откуда получим:

$$\frac{R}{s} = -\frac{L_\sigma}{R_{Hz}} \cdot \frac{\omega^2}{C\omega^2 - \frac{1}{L_m}}, \quad (2.12)$$

отличающееся от значений $\frac{R}{s}$, полученных ранее. Двойственность результата получается за счет неопределенности скольжения s . Чтобы исключить влияние s , величину $\frac{R}{s}$ из (2.12) подставим в (2.6), тогда получим уравнение относительно $C\omega^2$:

$$C\omega^2 \left(\frac{2}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right) - (C\omega^2)^2 - \frac{1}{L_m} \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right) = \frac{\omega^2}{R_{Hz}^2}. \quad (2.13)$$

Корнями этого уравнения относительно $C\omega^2$ являются:

$$(C\omega^2)_{1,2} = \frac{1}{L_m} + \frac{1}{2L_\sigma} - \frac{1}{2CR_{Hz}^2} \mp \sqrt{\frac{2L_\sigma^2 + C^2R_{Hz}^4 - 2CL_\sigma R_{Hz}^2 - \frac{4CL_\sigma^2 R_{Hz}^2}{L_m}}{2CL_\sigma^2 R_{Hz}^2}} \quad (2.14)$$

Уравнение (2.13) имеет положительные корни для ω^2 только в том случае, когда сумма корней положительна. Следовательно, для суммы корней (2.14):

$$\frac{2}{L_m} + \frac{2}{2L_\sigma} - \frac{2}{2CR_{Hz}^2} > 0. \quad (2.15)$$

Этому условию соответствует соотношения параметров схемы замещения АГ для возникновения баланса мощностей:

$$\frac{1}{2CR_{Hz}^2} < \frac{1}{2L_\sigma} + \frac{1}{L_m}. \quad (2.16)$$

Преобразуем (2.13) так, чтобы рассмотреть соотношения между $C\omega^2$ и ω^2 . Для этого к левой части (2.13) добавим сумму равную нулю дополнительных членов:

$$\frac{C\omega^2}{L_\sigma} - \frac{C\omega^2}{L_\sigma} + \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right)^2 - \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right)^2 = 0. \quad (2.17)$$

После преобразования получим:

$$\begin{aligned} (C\omega^2)^2 - 2C\omega^2 \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right) + \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right)^2 + \\ + \frac{C\omega^2}{L_\sigma} - \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right)^2 + \frac{1}{L_m} \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right) = -\frac{\omega^2}{R_{Hz}^2}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Сворачивая, приводя подобные и сокращая, получим:

$$\left[C\omega^2 - \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right) \right]^2 + \frac{1}{L_\sigma} \left[C\omega^2 - \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} \right) \right] = -\frac{\omega^2}{R_{Hz}^2}. \quad (2.19)$$

Для того чтобы (2.19) привести к виду уравнения второй степени введем переменную A :

$$A = C\omega^2 - \left(\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma}\right), \quad (2.20)$$

тогда (2.19) можно записать следующим образом:

$$A^2 + \frac{A}{L_\sigma} + \frac{\omega^2}{R_{H2}^2} = 0. \quad (2.21)$$

Чтобы выполнялось (2.21) величина A должна быть отрицательной, как и скольжение s . Это можно показать следующим образом. Если в (2.12) подставить $C\omega^2$ из (2.20) получим:

$$\frac{R}{s} = -\frac{L_\sigma}{R_{H2}} \frac{\omega^2}{\left(A + \frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_\sigma} - \frac{1}{L_m}\right)}, \quad \text{или} \quad \frac{R}{s} = \frac{-\omega^2 L_\sigma^2}{R_{H2}(AL_\sigma + 1)}. \quad (2.22)$$

Подставим из (2.8) $L_\sigma^2 \omega^2$ в (2.22):

$$\frac{R}{s} = \frac{\left(\frac{R}{s}\right)^2 + R_{H2} \frac{R}{s}}{R_{H2}(AL_\sigma + 1)}$$

и проведя сокращение на $\frac{R}{s}$:

$$R_{H2}(AL_\sigma + 1) = \frac{R}{s} + R_{H2} \quad \text{или} \quad \frac{R}{s} = AR_{H2}L_\sigma. \quad (2.23)$$

Из (2.23) скольжение определяется как:

$$s = \frac{R}{AR_{H2}L_\sigma},$$

откуда следует, что для $AG \ s < 0$, то и величина $A < 0$.

Теперь осуществим подстановку $\frac{1}{4L_\sigma^2}$ в левую и правую части (2.21):

$$A^2 + \frac{A}{L_\sigma} + \frac{1}{4L_\sigma^2} + \frac{\omega^2}{R_{H2}^2} = \frac{1}{4L_\sigma^2}, \quad (2.24)$$

и получим уравнение окружности в осях A и $\frac{\omega^2}{R_{H2}^2}$ со смещенным центром:

$$\left(A + \frac{1}{2L_\sigma}\right)^2 + \frac{\omega^2}{R_{H2}^2} = \left(\frac{1}{2L_\sigma}\right)^2, \quad (2.25)$$

где $\frac{1}{2L_\sigma}$ – смещение центра окружности W по оси A , равно радиусу этой окружности. Из (2.20) получаем зависимость ω от переменной A :

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C} \left(A + \frac{1}{L_\sigma} + \frac{1}{L_m} \right)}, \quad (2.26)$$

которая на рисунке 2.4 представлена параболой V_1 – V_3 в зависимости от набора параметров схемы замещения АГ. Как видно из рисунка 2.4 возможны три варианта расположения параболы V .

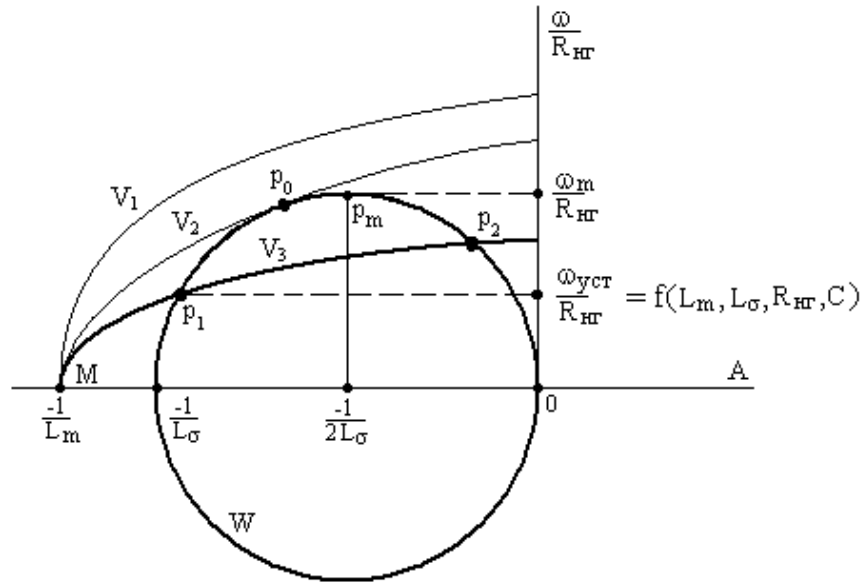


Рисунок 2.4– Определение установившегося значения ω при линейной индуктивности намагничивания АГ

- а) V_1 не пересекает дугу окружности W ;
- б) V_2 касается дуги окружности W в точке p_0 ;
- в) V_3 пересекает дугу окружности W в точках p_1 и p_2 .

Точка M начала парабол определяется из (2.20). Для $\omega = 0$ имеем:

$$A_{\omega=0} = M = -\frac{1}{L_\sigma} - \frac{1}{L_m}. \quad (2.27)$$

В варианте а) возбуждение АГ невозможно, так как не возникают критерии самовозбуждения с возникновением устойчивых колебаний. Вариант б) является граничным условием возникновения возбуждения АГ. В варианте в) две точки пересечения показывают возможность двух состояний АГ с возбуждением.

Для определения частоты ω для точек p_1 и p_2 решим уравнение (2.28) относительно переменной A , полученного из (2.21) при подстановке в него ω из (2.26):

$$A^2 + \frac{A}{L_\sigma} + \frac{\frac{1}{C} \left(A + \frac{1}{L_\sigma} + \frac{1}{L_m} \right)}{R_{нг}^2} = 0. \quad (2.28)$$

Корни этого уравнения являются координатами на оси A точек p_1 и p_2 пересечения кривой V_3 и окружности W :

$$A_{1,2} = \left| \begin{array}{c} L_{\sigma} + \sqrt{L_{\sigma}^2 + C^2 R_{H\epsilon}^4 - 2CL_{\sigma}R_{H\epsilon}^2 - \frac{4CL_{\sigma}^2 R_{H\epsilon}^2}{L_m} + CR_{H\epsilon}^2} \\ - \frac{\phantom{L_{\sigma} + \sqrt{L_{\sigma}^2 + C^2 R_{H\epsilon}^4 - 2CL_{\sigma}R_{H\epsilon}^2 - \frac{4CL_{\sigma}^2 R_{H\epsilon}^2}{L_m} + CR_{H\epsilon}^2}}{2CL_{\sigma}R_{H\epsilon}^2} \\ \sqrt{\frac{L_{\sigma}^2 + C^2 R_{H\epsilon}^4 - 2CL_{\sigma}R_{H\epsilon}^2 - \frac{4CL_{\sigma}^2 R_{H\epsilon}^2}{L_m}}{2CL_{\sigma}R_{H\epsilon}^2}} - \frac{1}{2CR_{H\epsilon}^2} - \frac{1}{2L_{\sigma}} \end{array} \right|. \quad (2.29)$$

Наличие двух корней у (2.28) соответствует случаю в) и предполагает существование двух режимов работы АГ после самовозбуждения с разными частотами установившегося режима.

Условие касания кривой V_2 и окружности W получаем при равенстве нулю подкоренного выражения, так как его значение может быть только ≥ 0 .

$$L_{\sigma}^2 + C^2 R_{H\epsilon}^4 - 2CL_{\sigma}R_{H\epsilon}^2 - \frac{4CL_{\sigma}^2 R_{H\epsilon}^2}{L_m} = 0, \quad (2.30)$$

откуда для величины емкости C получаем два возможных значения:

$$C_{1,2} = \left| \begin{array}{c} \frac{2\sqrt{L_{\sigma}^3(L_{\sigma}+L_m)+2L_{\sigma}^2+L_mL_{\sigma}}}{L_m R_{H\epsilon}^2} \\ - \frac{2\sqrt{L_{\sigma}^3(L_{\sigma}+L_m)+2L_{\sigma}^2+L_mL_{\sigma}}}{L_m R_{H\epsilon}^2} \end{array} \right|. \quad (2.31)$$

Точка касания V_2 и окружности W соответствует значению первого корня:

$$C_1 = C_{крит} = \frac{L_{\sigma} [L_m + 2(L_{\sigma} + \sqrt{L_{\sigma}(L_{\sigma} + L_m)})]}{L_m R_{H\epsilon}^2}. \quad (2.32)$$

Второй корень не подходит, из-за возможности получения отрицательного C , что противоречит физическому смыслу.

Из анализа выражения для $C_{крит}$ следует, что величина C увеличивается при увеличении активной и индуктивной нагрузки АГ при его возбуждении, причем влияние активной нагрузки более существенно.

Рассмотрим существования 2-х режимов в случае в).

На окружности W точка A_0 определяет максимальную частоту, достижение которой определяет возможность получения устойчивого самовозбуждения. Проведем анализ изменения устойчивости переменной A справа и слева от точки A_0 .

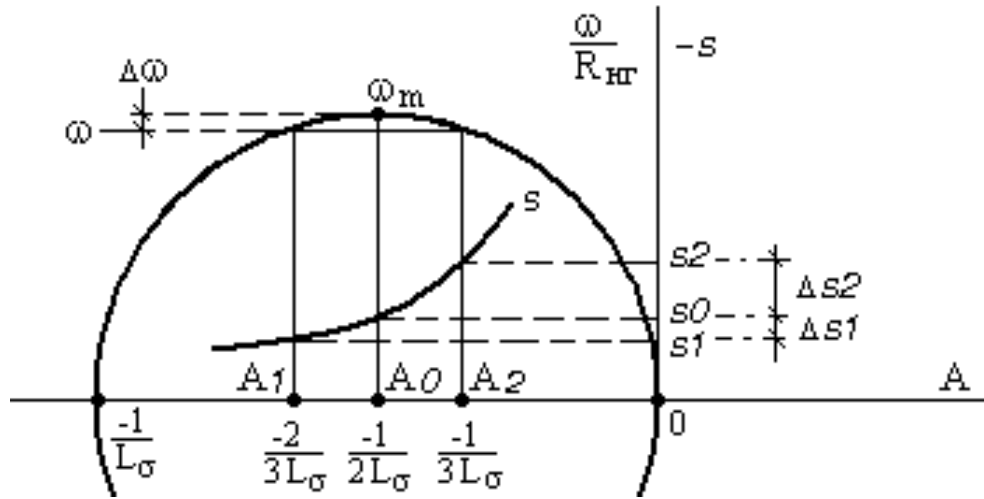


Рисунок 2.5 – Анализ устойчивости режимов работы АГ

Рассмотрим интервал величиной $\frac{1}{6L_\sigma}$ изменения параметра A около точки $A_0 = \frac{-1}{2L_\sigma}$ (рисунок 2.5). В этом случае имеем точки $A_1 = \frac{-2}{3L_\sigma}$ и $A_2 = \frac{-1}{3L_\sigma}$. Для них величина ω снижается одинаково относительно ω_m . Изменение скольжения s в этих интервалах определим из (2.22) подстановкой значений A .

$$s_0 = -\frac{2R}{R_{H2}}, s_1 = -\frac{3R}{2R_{H2}}, s_2 = -\frac{3R}{R_{H2}}. \quad (2.33)$$

Определим $\frac{d\omega}{ds} \approx \frac{\Delta\omega}{\Delta s}$ для рассматриваемых интервалов:

– интервал $A_1 \div A_0$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta s_1} = \frac{\omega - \omega_m}{s_0 - s_1} = -\frac{\Delta\omega}{R} 2R_{H2} < 0, \quad (2.34)$$

– интервал $A_0 \div A_2$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta s_2} = \frac{\omega_m - \omega}{s_2 - s_0} = \frac{\Delta\omega}{R} R_{H2} > 0. \quad (2.35)$$

Учитывая, что АГ с конденсаторным возбуждением представляет асинхронный двигатель, работающий с отрицательным скольжением, то для него, как и для АД активная мощность, определяется как произведение вращающего момента на угловую скорость вращения ω . Так как по условию рассмотрения самовозбуждения АГ приводится во вращение приводом с постоянным моментом на валу, то активная мощность АГ, отдаваемая в нагрузку, пропорциональна ω .

Критерием статической устойчивости АД, для которого $s > 0$ при неизменной частоте питающей сети является $\frac{dP}{ds} > 0$ [42]. Критерием статической устойчивости автономного АГ, для которого $s < 0$ при неизменном моменте вращения будет $\frac{d\omega}{ds} < 0$. Поэтому область переменной Λ , находящаяся слева от центра окружности W является областью статической устойчивости работы автономного АГ с постоянным моментом приводного двигателя, а точка p_1 (рисунок 2.5) является точкой устойчивого режима работы автономного АГ. Точка p_2 (рисунок 2.5) является точкой неустойчивого режима работы автономного АГ.

Таким образом, если начальным условием возникновения процесса самовозбуждения автономного АГ с постоянным моментом привода считать остаточный магнитный поток АГ, то при линейной ВАХ АГ и выполнении (2.16), возможно возникновение устойчивого асинхронного режима с поглощением внешней механической энергии. Условие (2.1) в данном случае неприменимо.

Полученные теоретические выводы подтверждаются результатами математического моделирования процесса самовозбуждения автономного АГ выполненного по методике [23, 119]. Расчет проводится в относительных единицах для независимости результатов от конкретных параметров АГ. При использовании для привода АГ первичного двигателя с постоянным, не зависящим от числа оборотов механическим моментом $M_{\text{Мех}}$, система дифференциальных уравнений математической модели АГ в осях α, β с линейной характеристикой L_m для схемы замещения с параметрами (рисунок 2.3) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{u_{s\alpha}}{Lm} + \frac{k_r}{LmT_r} \Psi_{r\alpha} + \frac{k_r}{Lm} p\omega \Psi_{r\beta}, \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{u_{s\beta}}{Lm} + \frac{k_r}{LmT_r} \Psi_{r\beta} - \frac{k_r}{Lm} p\omega \Psi_{r\alpha}, \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= k_r Ri_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\alpha} - p\omega \Psi_{r\beta}, \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= k_r Ri_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\beta} + p\omega \Psi_{r\alpha}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\frac{du_{s\alpha}}{dt} = \frac{i_{c\alpha} - R_{нз} i_{s\alpha}}{C},$$

$$\frac{du_{s\beta}}{dt} = \frac{i_{c\beta} - R_{нз} i_{s\beta}}{C},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_r}{J_{AG} + J_{Mex}} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{M_{Mex}}{J_{AG} + J_{Mex}}.$$

В системе уравнений (2.36) индексом « α » отмечены переменные и параметры, относящиеся к оси α , индексом « β » – переменные и параметры, относящиеся к оси β . Индекс « s » и « r » указывают цепи статора и ротора.

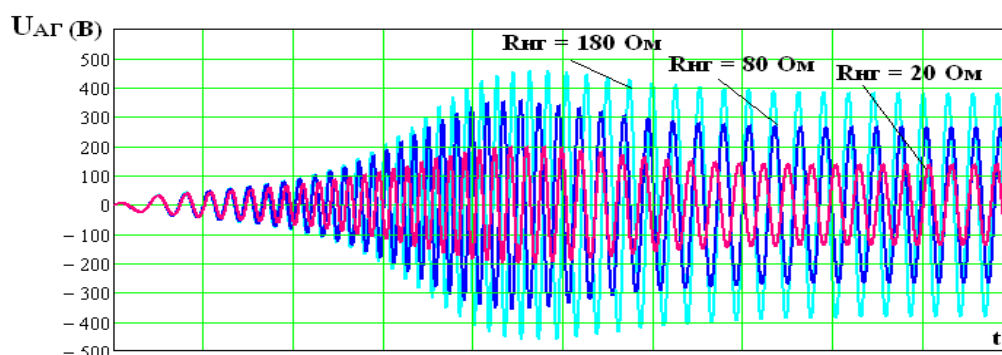


Рисунок 2.6 – Модель самовозбуждения АГ с линейной L_m при разных $R_{нр}$

На рисунке 2.6 показан процесс возникновения устойчивого режима работы АГ с линейной L_m . Видно, что с появлением в начале процесса момента на валу приводного механизма начинается увеличение угловой скорости вращения ω частоты на выводах АГ. Подробнее на рисунке 2.7.

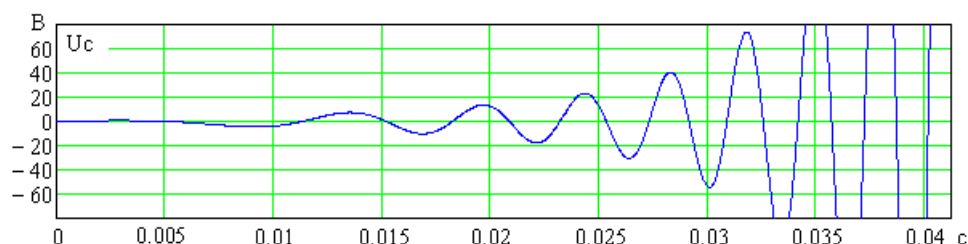


Рисунок 2.7 – Процесс нарастания частоты и амплитуды напряжения на емкости АГ при самовозбуждении

Величина ω растет, она проходит точку ω_m (рисунок 2.5), переменная A проходит точку p_m (рисунок 2.4), что приводит к изменению скольжения s . После этого величина ω снижается до точки p_1 (рисунок 2.4), пока за счет изменения сколь-

жения не выполняется условия баланса подводимой и расходуемой мощностей. С этого момента времени, с учетом инерции, АГ начинает выдавать энергию в нагрузку с возникновением устойчивого режима вращения ротора АГ с частотой ω . Рисунок 2.6 подтверждает это положение. Для трех режимов АГ с разными нагрузками величина суммарной расходуемой мощности в математической модели АГ в установившемся режиме постоянна (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Величины расчетных мощностей в АГ при разных нагрузках

Нагрузка АГ, Ом	Напряжение(ампл.), В	Мощность нагрузки, Вт	Мощность потерь в обмотках, Вт	Мощность потерь в $R_{пот}$, Вт	Общая мощность в АГ, Вт
20	131,191	430,279	17,211	4,413	451,903
80	262,295	429,992	4,3	17,641	451,933
180	385,137	412,028	1,83	38,033	451,891

Таким образом, нелинейность характеристики намагничивания АГ не является основным критерием для возникновения устойчивого режима при самовозбуждении АГ. Нелинейность L_m представляет собой элемент цепи, который ограничивают амплитуду автоколебаний или напряжение самовозбуждения генератора.

2.2 Разработка способа учета насыщения магнитной системы асинхронного генератора

При увеличении числа оборотов ветроколеса увеличивается напряжение на выводах асинхронного генератора. Моделирование различных нагрузочных режимов АГ возможно лишь при учете нелинейности его характеристики намагничивания, что ограничивает возрастание напряжения в АГ [7, 118].

В настоящее время уровень развития компьютерной техники и программного обеспечения, например программа Mathcad, позволяет решать задачи моделирования переходных процессов в электрической машине путем непосредственного решения систем дифференциальных уравнений. Однако традиционный подход к решению уравнений с учетом насыщения также вызывает ряд трудностей.

Индуктивные сопротивления рассеяния $x_{\sigma s}$ функционально связаны с током статорной обмотки i_s , поэтому для контроля изменений $x_{\sigma s}$ выделяем составляющие главного потокосцепления по осям (α, β, γ)

В результате решения системы (2.37) получаются значения потокосцепления всех обмоток АД и их токи. Их величины можно представить вектором $\Psi_{\alpha,\beta,\lambda}$, размер которого зависит от числа обмоток АД:

$$\Psi_{\alpha,\beta,\lambda} = m_{M,\sigma}(\Psi_0) \cdot M_{\alpha,\beta,\gamma} \cdot i_{\alpha,\beta,\gamma}, \quad (2.38)$$

где $M_{\alpha,\beta,\gamma}$ – матрица индуктивностей и взаимоиנדукций между обмотками АГ.

$$M_{\alpha,\beta,\gamma} = \begin{pmatrix} L_s & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & M & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 \\ -M \cdot 0,5 & L_s & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & M & -M \cdot 0,5 \\ -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & L_s & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & M \\ M & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & L_r & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 \\ -M \cdot 0,5 & M & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & L_r & -M \cdot 0,5 \\ -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & M & -M \cdot 0,5 & -M \cdot 0,5 & L_r \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

где M – взаимная индуктивность; $L_s = M + L_{\sigma s}$, $L_r = M + L_{\sigma r}$ – индуктивности обмоток статора и ротора.

Из составляющих главного потокосцепления по осям (α, β, γ) определяем модуль главного потокосцепления в воздушном зазоре:

$$\Psi_0 = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\Psi_{0\alpha})^2 + (\Psi_{0\beta})^2 + (\Psi_{0\gamma})^2 \right]}. \quad (2.40)$$

Токи обмоток по осям α, β, γ находятся в результате решения системы алгебраических уравнений методом обратной матрицы:

$$i_{\alpha,\beta,\gamma} = \left[M_*(B) \cdot M_{\alpha,\beta,\gamma} \cdot k \right]^{-1} \cdot \Psi_{\alpha,\beta,\lambda}, \quad (2.41)$$

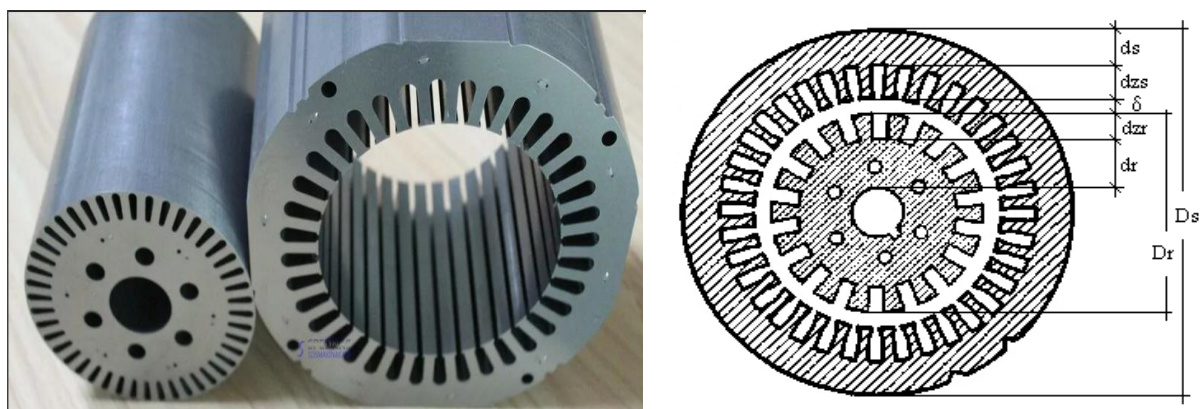
где $\left[m_{M,\sigma}(\Psi_0) \cdot M_{\alpha,\beta,\gamma} \right]^{-1}$ – обратная матрица индуктивностей и взаимоиנדукции между обмотками АГ.

Учитывать насыщение магнитной цепи в схеме модели предлагается с помощью $M_*(B)$ – функции учета нелинейности характеристики намагничивания АГ, где B – значение индукции в воздушном зазоре. $M_*(B)$ зависит от конструк-

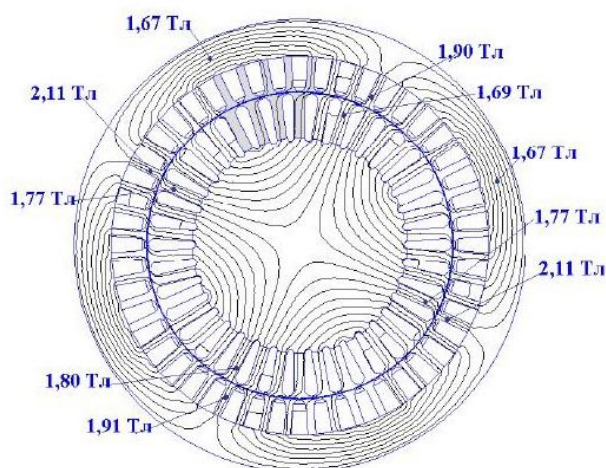
тивных особенностей АГ (расположения обмоток в расточке статора, материала сердечника и т. д.).

Зависимость $M_*(B)$ строится на основе кривой намагничивания электро-технической стали в функции магнитной индукции в воздушном зазоре. С её помощью учитывается как изменение значения взаимоиндукции M , так и индуктивности рассеяния обмоток.

Магнитная система, состоящая из статора и ротора, и распределение магнитного поля в поперечном сечении АД представлены на рисунке 2.8, а и б.



D_{si} , D_r – внешние диаметры статора и ротора, d_s и d_r – толщина ярма статора и ярма ротора, d_{zs} и d_{zr} – длины зубцов статора и ротора, δ – величина воздушного зазора
а)



б)

Рисунок 2.8 – Магнитная система АД (а) и распределение магнитного поля в поперечном сечении двигателя при номинальной нагрузке (б)

Анализ паспортных данных размеров асинхронных электродвигателей (рисунок) показывает, что соотношение диаметров статора и ротора находится в ос-

новном в пределах 1,4-1,8, а относительная длина зубцовой зоны в пути магнитного потока для машин с числом пар полюсов $p = 2$ составляет. 0,2-0,3.

Для приближенного учета нелинейности характеристики намагничивания будем использовать магнитную систему асинхронного электродвигателя. При сделанных допущениях магнитная цепь реальной электрической машины (рисунок 2.8) может быть заменена эквивалентным магнитопроводом (рисунок 2.9, а), в виде неоднородного магнитопровода с зазором, где l_z характеризует зубцовую зону, δ – воздушный зазор, а остальная часть магнитопровода l_m – железо статора и ротора.

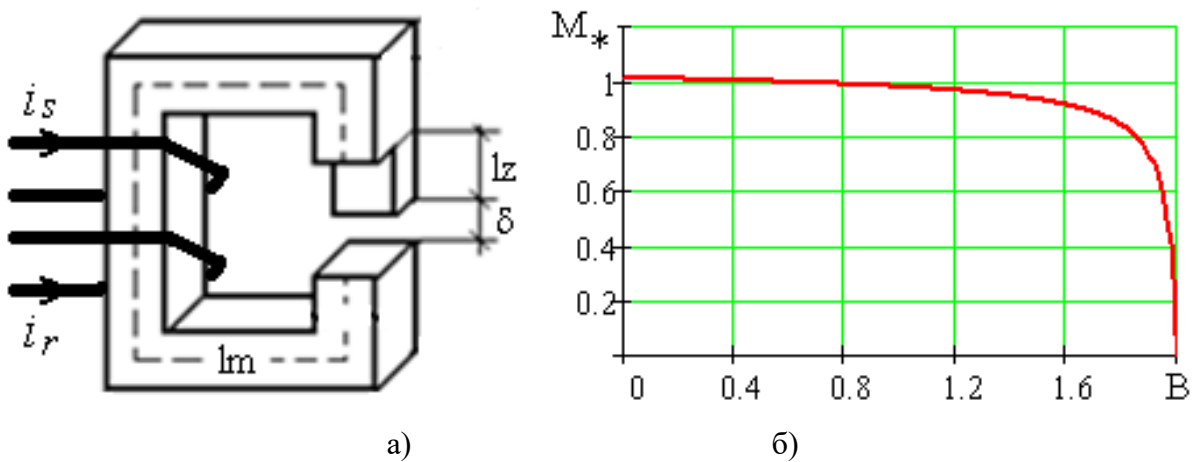


Рисунок 2.9 – Упрощенная модель неоднородного магнитопровода с зазором (а) и расчетная зависимость изменения взаимоиנדукции между обмотками

Для неоднородного сердечника с зазором представим кривую намагничивания материала в виде H от B , состоящую из трех частей: первая – характеристика основной части магнитопровода; вторая – характеристика зубцовой зоны; третья – характеристика зазора. Так как определение индукции в магнитопроводе математической модели производится при амплитудных значениях, то определим статическую характеристику. Кривую намагничивания для области $B > 0$ представим аналитически по формуле Фролиха:

$$H = \frac{B}{a-b \cdot B}, \quad (2.42)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимации, рассчитываемые для характеристики магнитного материала. Представим сумму $H \cdot l$ по участкам магнитной цепи как произведение $H_{\text{ср}} l_{\text{ср}}$:

$$H_{CP} l_{CP} = \frac{B \cdot kz}{a - b \cdot B \cdot kz} \cdot l_{m,д} + \frac{B}{a - b \cdot B} \cdot l_{z,д} + \frac{B}{\mu_0 \cdot kd} \cdot \delta_{,д} \quad (2.43)$$

где B – индукция; H – напряженность поля; a и b – коэффициенты аппроксимации; $\delta_{,д}$ – величина зазора в магнитопроводе; $l_{m,д}$ – длина средней линии по основному магнитопроводу; l_{cp} – полная средняя длина сердечника; kz – относительное значение индукции в основной части магнитопровода к величине индукции в зубцовой зоне; kd – относительная величины площади магнитного потока в зазоре за счет учета расширения зубцов.

Перейдем к относительным единицам для длины силовой линии магнитного потока. Примем за основу величину полную длину l_{cp} , тогда в относительных единицах для величины индукции B_i :

$$H_{CP,i} := \frac{B_i \cdot kz}{a - b \cdot B_i \cdot kz} \cdot (1 - l_{z*} - \delta_*) + \frac{B_i}{a - b \cdot B_i} \cdot l_{z*} + \frac{B_i}{kd \cdot \mu_0} \cdot \delta_*. \quad (2.44)$$

Статическая магнитная проницаемость:

$$\mu_{ст,i} = \frac{B_i}{H_{CP,i}} = \frac{1}{\frac{kz \cdot (1 - l_{z*} - \delta_*)}{a - b \cdot B_i \cdot kz} + \frac{l_{z*}}{a - b \cdot B_i} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}. \quad (2.45)$$

Относительное значение изменения $M_*(B)$ при изменении индукции будем определять, как отношение магнитной проницаемости при индукции $B = B_i$ к магнитной проницаемости в начальном состоянии магнитной системы $B = B_0$:

$$M_* := \frac{\frac{kz \cdot (1 - l_{z*} - \delta_*)}{a - b \cdot B_0 \cdot kz} + \frac{l_{z*}}{a - b \cdot B_0} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}{\frac{kz \cdot (1 - l_{z*} - \delta_*)}{a - b \cdot B_i \cdot kz} + \frac{l_{z*}}{a - b \cdot B_i} + \frac{\delta_*}{kd \cdot \mu_0}}. \quad (2.46)$$

Характерный вид зависимости $M_*(B)$ показан на рисунке 2.9, б.

Изменение индуктивности рассеяния учитывается с применением полученного значения M_* за счет изменения величин L_s и L_r в матрице $M_{* \alpha, \beta, \gamma}$:

$$M_{* \alpha, \beta, \gamma} = M \cdot M_* + L_\sigma [1 + k_\sigma (1 - M_*)], \quad (2.47)$$

где $k_\sigma \approx 0,2-0,4$ – коэффициент, учитывающий увеличение потоков рассеивания при насыщении магнитной системы машины.

2.3 Выводы по второй главе

1. На основе аналитического исследования установлены условия и физическая причина самовозбуждения АГ в автономном режиме. Показано, что для возникновения устойчивой генерации необходимы два фактора: остаточный магнитный поток и колебания, возникающие в системе с отрицательным сопротивлением на частотах, соответствующих балансу амплитуд и фаз для реактивных и активных мощностей основной гармонической составляющей автоколебаний в нелинейной системе. Механическая энергия, подводимая к ротору, компенсирует активные потери в сопротивлениях генератора и нагрузки, обеспечивая устойчивость режима генерации.

2. Определено критическое условие для величин емкости возбуждения. Установлено, что существует минимальное значение емкости, ниже которого самовозбуждение генератора невозможно. Расчеты показали, что при постоянных параметрах магнитной системы машины эта критическая емкость зависит исключительно от величины активного сопротивления нагрузки. При этом нелинейность магнитной системы влияет на амплитуду автоколебаний и напряжение генератора.

3. Разработан способ учета насыщения магнитной системы АГ, который позволяет построить адекватную математическую модель системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка». Способ основан на раздельном рассмотрении нелинейных характеристик трех зон магнитопровода: основной части магнитопровода, зубцовой зоны и воздушного зазора. Это позволило получить функцию изменения магнитной связи между обмотками.

4. Предложено учитывать изменение индуктивности рассеяния с применением полученного значения магнитной связи между обмотками за счет изменения величин собственных индуктивностей статора и ротора в матрице взаимоиנדуктивностей, что позволяет корректно модифицировать матрицы параметров машины при математическом моделировании в программных комплексах. Данный подход повышает точность расчетов переходных и установившихся режимов работы АГ по сравнению способами, использующими линейные параметры магнитной системы АГ.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

3.1 Разработка математической модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при дискретном регулировании тока возбуждения

Моделирование работы АГ выполнено на основании модели электрической асинхронной машины, составленной в трехфазной системе координат (рисунок 3.1). При составлении уравнений использовались следующие общепринятые допущения:

- фазные обмотки симметричны и сдвинуты в пространстве на угол $\frac{2\pi}{3}$;
- магнитодвижущая сила обмоток и поля рассеяния распределены синусоидально вдоль окружности ротора;
- распределенные обмотки статора и ротора заменены сосредоточенными с равными магнитодвижущими силами;
- не учитываются потери в стали, добавочные потери и влияние высших пространственных гармоник магнитодвижущих сил обмоток статора и ротора.

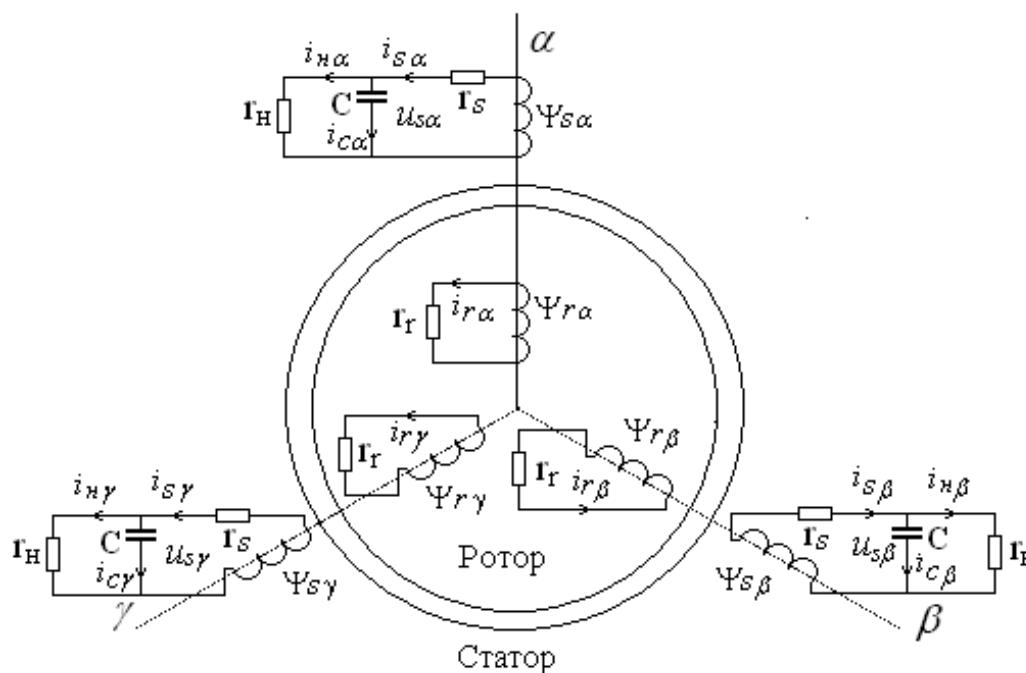


Рисунок 3.1 – Расчетная пространственная модель АГ с регулируемой емкостью

Дифференциальные уравнения АГ с учетом внешней емкости C и предварительно подключенной нагрузки (сопротивление r_h , ток i_h), включающие уравнения тока и напряжения статора i_s и u_s , потокосцепления статора и ротора (Ψ_s и Ψ_r), движения (угловая скорость ротора ω), момент ветроколеса $M(v, \omega, b)$, момент инерции J_Σ , а также время t в неподвижной системе координат (α, β, γ) имеют вид

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= -r_s i_{s\alpha} - u_{C\alpha}, \\
\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= -r_s i_{s\beta} - u_{C\beta}, \\
\frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} &= -r_s i_{s\gamma} - u_{C\gamma}, \\
0 &= -r_r i_{r\alpha} - p \cdot \varpi \cdot \frac{\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma}}{\sqrt{3}}, \\
0 &= -r_r i_{r\beta} - p \cdot \varpi \cdot \frac{\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha}}{\sqrt{3}}, \\
0 &= -r_r i_{r\gamma} - p \cdot \varpi \cdot \frac{\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta}}{\sqrt{3}}, \\
\frac{du_{C\alpha}}{dt} &= \frac{i_{s\alpha}}{C} - \frac{u_{C\alpha}}{r_h C}, \\
\frac{du_{C\beta}}{dt} &= \frac{i_{s\beta}}{C} - \frac{u_{C\beta}}{r_h C}, \\
\frac{du_{C\gamma}}{dt} &= \frac{i_{s\gamma}}{C} - \frac{u_{C\gamma}}{r_h C}, \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{p\sqrt{3}}{2J_\Sigma} m (\Psi_{r\gamma} i_{s\alpha} + \Psi_{r\alpha} i_{s\beta} + \Psi_{r\beta} i_{s\gamma} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\gamma} i_{s\beta} - \Psi_{r\alpha} i_{s\gamma}) - \frac{k_M \omega - k_T}{J_\Sigma} - \frac{M_{ВД}(v, \omega, b)}{J_\Sigma},
\end{aligned} \tag{3.1}$$

где p – число пар полюсов АГ; J_Σ – суммарный момент инерции ротора АГ и ротора ветродвигателя с учетом связи через редуктор; $m = m(u)$ – коэффициент учета насыщения магнитной системы АГ; $M_{ВД}(v, \omega, b)$ – момент вращения ветродвигателя, являющийся функцией скорости ветра v , угловой скорости ω и угла поворота лопасти b . Коэффициент k_M учитывает момент трения зависящий от скорости вращения ротора АГ, коэффициент k_T сухое трение.

В уравнениях (3.1) индексами « α , β и γ » отмечены переменные и параметры, относящиеся к осям α , β и γ . Так как моделируется симметричная нагрузка фаз и симметрия емкостей возбуждения, то их параметры определены как r_n и C .

3.2 Разработка математической модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при плавном регулировании тока возбуждения

Схему с трехфазным выпрямителем (рисунок 3.2, а) для моделирования меняем на расчетную схему, использующую резисторы в каждой фазе (рисунок 3.2, б). Корректность такой эквивалентной замены была подтверждена сравнением энергетических характеристик обеих схем. Расчеты приведены в приложении Г.

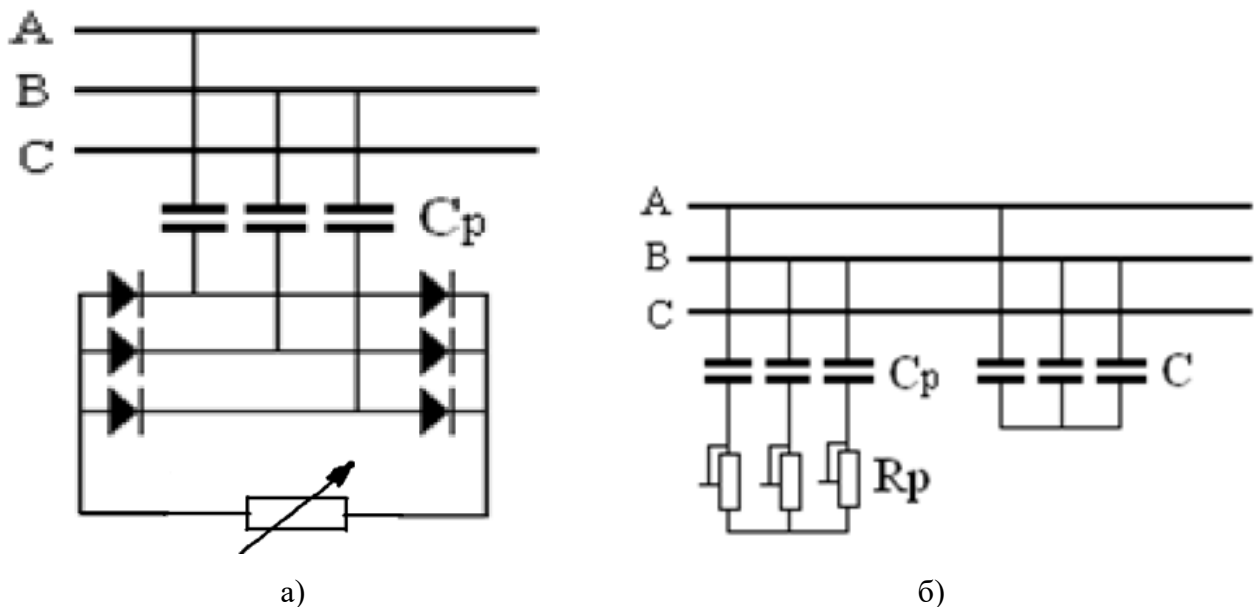


Рисунок 3.2 – Применяемая (а) и эквивалентная (б) схемы

При этом для устойчивого начального возбуждения и предотвращения срыва возбуждения при изменении сопротивления резисторов при регулировании, в схеме используется дополнительная емкость C (рисунок 3.3).

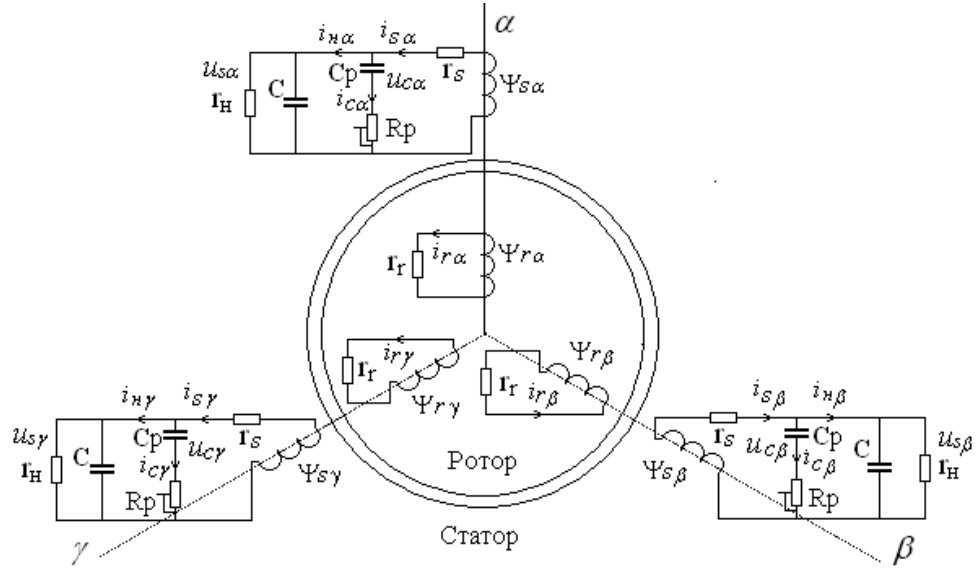


Рисунок 3.3 – Расчетная пространственная модель АГ с регулируемым R_p

Для расчетной схемы получим выражение для тока i_c :

$$\begin{aligned} i_c &= i_s - i_{c_p} - i_h = i_s - \frac{u_c - u_{c_p}}{R_p} - \frac{u_c}{r_h} = i_s + \frac{u_{c_p}}{R_p} - u_c \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{r_h} \right) = \\ &= i_s + \frac{u_{c_p}}{R_p} - u_c \frac{R_p + r_h}{R_p r_h} = i_s + \frac{1}{R_p} \left[u_{c_p} - u_c \left(\frac{R_p}{r_h} + 1 \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

и тогда для расчетной схемы АГ по осям α , β , γ (рис.) дифференциальные уравнения напряжений на ёмкостях C будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{du_{c\alpha}}{dt} &= \frac{i_{s\alpha}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{c_p\alpha} - u_{c\alpha} \left(1 + \frac{R_p}{r_h} \right) \right], \\ \frac{du_{c\beta}}{dt} &= \frac{i_{s\beta}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{c_p\beta} - u_{c\beta} \left(1 + \frac{R_p}{r_h} \right) \right], \\ \frac{du_{c\gamma}}{dt} &= \frac{i_{s\gamma}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{c_p\gamma} - u_{c\gamma} \left(1 + \frac{R_p}{r_h} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для определения напряжения u_{c_p} рассмотрим контур $C - C_p - R_p$. По обходу контура для напряжений имеем $u_c - u_{c_p} - i_{c_p} R_p = 0$, откуда $i_{c_p} = \frac{u_c - u_{c_p}}{R_p}$. Заменив $i_{c_p} = C \frac{du_{c_p}}{dt}$ получим $u_c - u_{c_p} - C_p R_p \frac{du_{c_p}}{dt} = 0$, откуда $\frac{du_{c_p}}{dt} = \frac{u_c - u_{c_p}}{C_p R_p}$. Тогда для 3-х фаз в осях α , β , γ для схемы на рисунке 3.3 будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{du_{c_p\alpha}}{dt} &= \frac{u_{c\alpha} - u_{c_p\alpha}}{C_p R_p}, \\ \frac{du_{c_p\beta}}{dt} &= \frac{u_{c\beta} - u_{c_p\beta}}{C_p R_p}, \\ \frac{du_{c_p\gamma}}{dt} &= \frac{u_{c\gamma} - u_{c_p\gamma}}{C_p R_p}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Полная система дифференциальных уравнения для моделирования работы АГ с приводом от ветродвигателя и плавным регулированием с помощью резистора в цепи регулирующих емкостей C_p будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= -r_s i_{s\alpha} - u_{C\alpha}, \\
\frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= -r_s i_{s\beta} - u_{C\beta}, \\
\frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} &= -r_s i_{s\gamma} - u_{C\gamma}, \\
0 &= -r_r i_{r\alpha} - p \cdot \varpi \cdot \frac{\Psi_{r\beta} - \Psi_{r\gamma}}{\sqrt{3}}, \\
0 &= -r_r i_{r\beta} - p \cdot \varpi \cdot \frac{\Psi_{r\gamma} - \Psi_{r\alpha}}{\sqrt{3}}, \\
0 &= -r_r i_{r\gamma} - p \cdot \varpi \cdot \frac{\Psi_{r\alpha} - \Psi_{r\beta}}{\sqrt{3}}, \\
\frac{du_{C\alpha}}{dt} &= \frac{i_{s\alpha}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\alpha} - u_{C\alpha} \left(1 + \frac{R_p}{r_H} \right) \right], \\
\frac{du_{C\beta}}{dt} &= \frac{i_{s\beta}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\beta} - u_{C\beta} \left(1 + \frac{R_p}{r_H} \right) \right], \\
\frac{du_{C\gamma}}{dt} &= \frac{i_{s\gamma}}{C} + \frac{1}{CR_p} \left[u_{Cp\gamma} - u_{C\gamma} \left(1 + \frac{R_p}{r_H} \right) \right], \\
\frac{du_{Cp\alpha}}{dt} &= \frac{u_{C\alpha} - u_{Cp\alpha}}{C_p R_p}, \\
\frac{du_{Cp\beta}}{dt} &= \frac{u_{C\beta} - u_{Cp\beta}}{C_p R_p}, \\
\frac{du_{Cp\gamma}}{dt} &= \frac{u_{C\gamma} - u_{Cp\gamma}}{C_p R_p}, \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{p\sqrt{3}}{2J_\Sigma} m \left(\Psi_{r\gamma} i_{s\alpha} + \Psi_{r\alpha} i_{s\beta} + \Psi_{r\beta} i_{s\gamma} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\gamma} i_{s\beta} - \Psi_{r\alpha} i_{s\gamma} \right) - \frac{k_M \omega - k_e}{J_\Sigma} - \frac{M_{ВД}(v, \omega, b)}{J_\Sigma}.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Так как первые 6 дифференциальных уравнений системы (3.5) связывают токи и потокосцепления обмоток статора и ротора по осям α , β , γ , то для определения токов фаз этих обмоток применяем метод обратной матрицы для этих 6-ти уравнений и тогда величины токов, через потокосцепления фазных обмоток статора и ротора:

$$i_{\alpha,\beta,\gamma} = M_S^{-1} \cdot \Psi_{\alpha,\beta,\gamma}, \quad (3.6)$$

где M_S^{-1} – обратная матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей АГ матрицы:

$$M_S = \begin{vmatrix} L_S & -0.5M & -0.5M & M & -0.5M & -0.5M \\ -0.5M & L_S & -0.5M & -0.5M & M & -0.5M \\ -0.5M & -0.5M & L_S & -0.5M & -0.5M & M \\ M & -0.5M & -0.5M & L_r & -0.5M & -0.5M \\ -0.5M & M & -0.5M & -0.5M & L_r & -0.5M \\ -0.5M & -0.5M & M & -0.5M & -0.5M & L_r \end{vmatrix}$$

где L_S, L_r – собственные индуктивности рассеяния статора и ротора; M – взаимная индуктивность.

3.3 Разработка алгоритма решения уравнений модели

«ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения для расчета параметров и режимов работы ВЭУ

Алгоритм расчета уравнений модели «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения показан на рисунке 3.4.

На первом этапе задаются параметры расчетной схемы. Начальные условия определяются из состояния системы после завершения переходного процесса возбуждения АГ.

На втором этапе по параметрам АГ рассчитывается характеристика нелинейности магнитной система $M(\psi_m)$ по предложенному способу, описанному в пункте 2.2, которая в дальнейшем будет использоваться для определения матрицы взаимных индуктивностей на каждом шаге расчета.

Расчет динамических процессов в системе ВД-АГ-стабилизатор начинается с блока 3.

Скорости ветров для моделирования выбраны в пределах 6,5-11,5 м/с, как наиболее встречающиеся в рабочем диапазоне рассматриваемого региона, и задаются в разных вариациях и с разными временными отрезками в блоке 4.

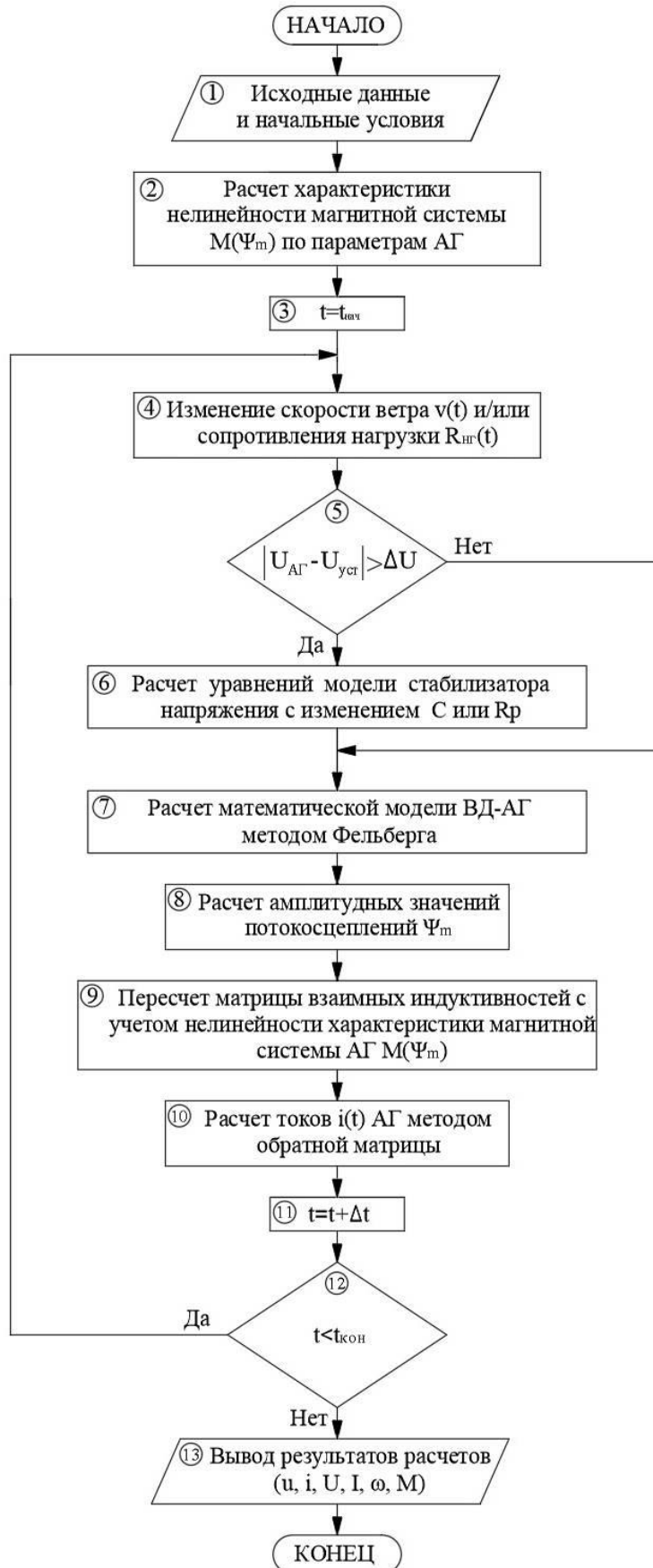


Рисунок 3.4 – Алгоритм решения уравнений модели «ВД-АГ-нагрузка» со стабилизатором напряжения для расчета параметров и режимов работы ВЭУ

Пятый блок исполняет условие нахождения выходного напряжения генератора (из начальных условий) в пределах диапазона стабилизации напряжения или зоны нечувствительности стабилизатора $\pm\Delta U$. При соблюдении условия $|U_{AG} - U_{уст}| > \Delta U$, то есть, когда значение выходного напряжения генератора находится за пределами зоны нечувствительности стабилизатора, осуществляется переход к блоку 6, где производится стабилизация напряжения путем исполнения функции ПИД-регулирования:

$$\mu = K_p \cdot \Delta U + K_i \int_0^t \Delta U dt + K_d \cdot \frac{d\Delta U}{dt} \approx K_p \cdot \Delta U + K_i \sum_0^t \Delta U \cdot h + K_d \frac{\Delta(\Delta U)}{h}, \quad (3.7)$$

использование которой позволяет получить любой закон регулирования изменением коэффициентов K_p , K_i и K_d .

Численный расчет математической модели АГ накладывает определенные требования к моделям регуляторов. Сложности с моделированием датчика выходного напряжения АГ заключаются в следующем:

- для расчета необходима величина амплитуды или действующего значения;
- частота напряжения переменна, что не позволяет организовать вычисления интегральной характеристики - действующего значения;
- метод бегущего окна для расчета действующего значения не гарантируют монотонности (гладкости) кривой изменения расчетного значения напряжения, что не позволяет определять амплитуду по изменению знака приращения на шаге расчета.

Поэтому напряжение, развиваемое на выводах АГ, рассчитывается по составляющим напряжений на емкости возбуждения по осям α и β для двухфазной модели:

$$U_{AG} = \sqrt{u_{c,\alpha}^2 + u_{c,\beta}^2}, \quad (3.8)$$

и по осям α , β , γ для трехфазной модели АГ:

$$U_{AG} = \sqrt{\frac{2}{3}(u_{c,\alpha}^2 + u_{c,\beta}^2 + u_{c,\gamma}^2)}. \quad (3.9)$$

Напряжение АГ зависит от изменения емкости конденсаторов, подключаемых параллельно нагрузке АГ. Для исследования процессов регулирования и определения приемлемых коэффициентов передачи регуляторов различного вида используется модель, в которой емкость имеет неограниченное число подключаемых ступеней (рисунок 3.5).

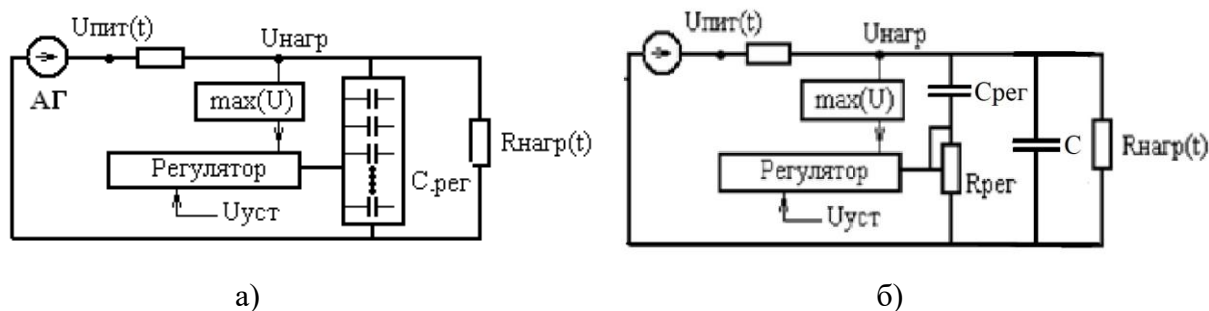


Рисунок 3.5 – Структурная схема регулирования напряжения АГ (а) и упрощенная схема для анализа возможностей регуляторов (б)

Если выходное напряжение генератора находится в зоне нечувствительности стабилизатора, то переход к блоку 7 происходит в обход блока 6.

В блоке 7 модели, основанные на выражениях (3.1), (3.5), позволяют рассчитывать и наблюдать всевозможные переходные процессы АГ, однако получаемые на ее основе динамические характеристики будут соответствовать «идеализированной машине», имеющей постоянные параметры. Расчеты в программном комплексе Mathcad показывают, что решение полученных систем дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка приводит к прекращению вычислений на некотором этапе, что характерно для решения «жестких» задач методами Рунге-Кутты. Поэтому для решения систем дифференциальных уравнений использовалась модификация метода Рунге-Кутты 5-го порядка – формула Фельберга, которая дает устойчивый процесс вычислений.

В блоке 8 напряжение, развиваемое на выводах АГ, рассчитывается из составляющих напряжений на емкости возбуждения по осям α , β , γ по формуле (3.9).

На девятом этапе осуществляется пересчет матрицы взаимных индуктивностей с учетом нелинейности характеристики магнитной системы АГ $M(\psi_m)$, рассчитанной в блоке 2.

На последнем расчетном этапе в блоке 10 определяются значения токов АГ методом обратной матрицы по формуле (3.6). Далее происходит переход к следующему расчетному шагу $t = t + \Delta t$ (блок 11).

Исполнение алгоритма производится по циклу до момента, когда исполнится условие блока 12 $t < t_{\text{кон}}$, после чего выводятся результаты вычислений в блоке 13 и расчет завершается.

При необходимости анализа процессов без стабилизации выходного напряжения АГ блоки 5 и 6 исключаются из алгоритма.

3.4 Расчет параметров и режимов работы ВЭУ при дискретном регулировании тока возбуждения

Алгоритм, представленный на рисунке 3.4, был реализован в программном комплексе Mathcad.

Регулирование величины емкости C возможно только ступенчатым образом, например, [116, 135, 148], когда величина емкости изменяется с помощью симисторного управления (рисунок 3.6).

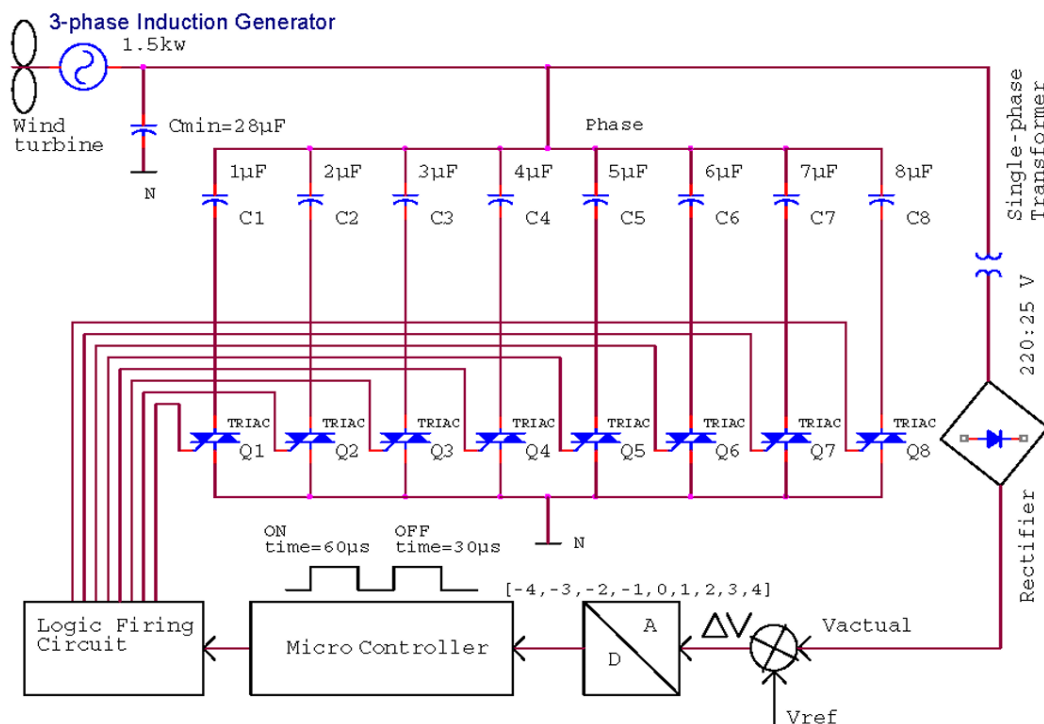
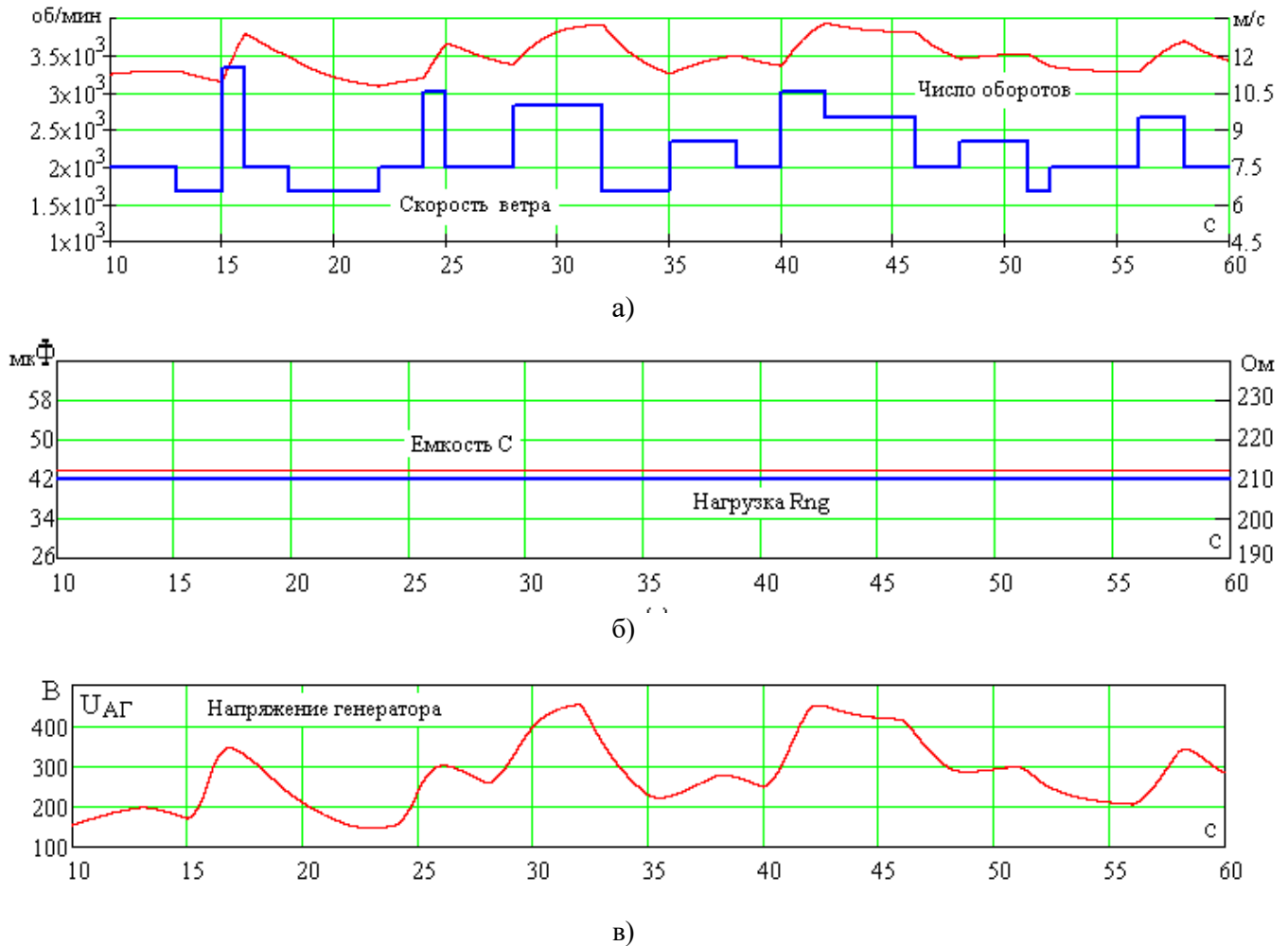
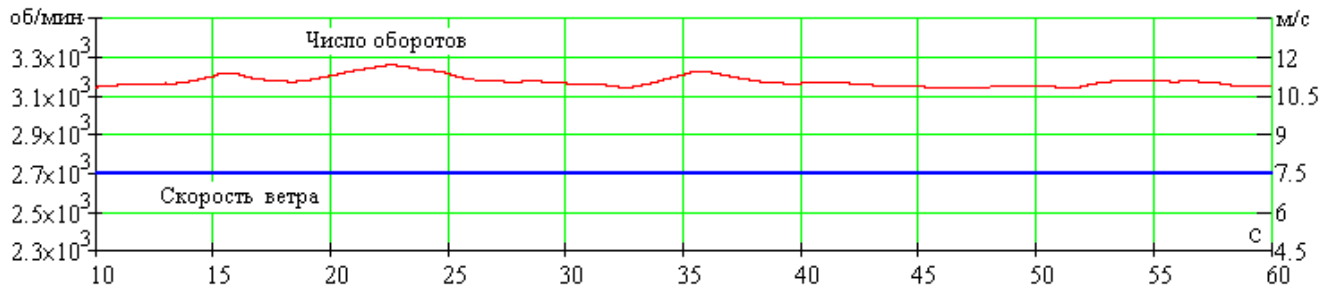


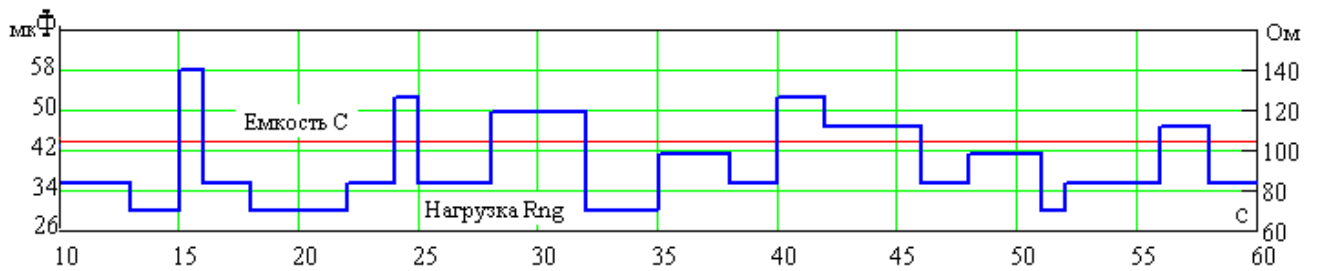
Рисунок 3.6 – Дискретное регулирование емкостей возбуждения АГ

На рисунках 3.7–3.10 представлены результаты моделирования работы ветроэнергетической установки на базе АГ с неизменным и регулируемым током возбуждения при различных дестабилизирующих факторах, таких как изменение скорости ветра и подключенной к АГ нагрузки. Показаны изменения скоростей ветра, величины нагрузки, числа оборотов ротора АГ, величины емкости возбуждения и величины действующего значения напряжения статора АГ.

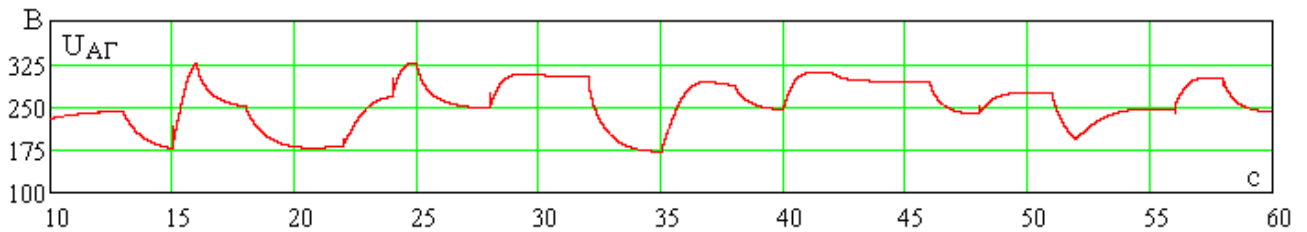




а)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при переменной нагрузке и постоянной скорости ветра без регулирования тока возбуждения:

- а) скорость ветра и число оборотов АГ; б) величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ; в) напряжение на выводах АГ

Как видно, изменение скорости ветра в пределах 6,5-11,5 м/с, как наиболее часто встречающиеся в регионе, вызывает отклонение скорости вращения ветродвигателя, и как следствие, соединенного с ним через редуктор ротора АГ (рисунок 3.7, а) в пределах 3200-3900 об/мин, что в свою очередь, при неизменной емкости возбуждения 44 мкФ вызывает отклонение действующего значения выходного напряжения АГ в широком диапазоне 150-450 В (рисунок 3.7, в). Изменение же нагрузки в пределах 70-140 Ом при постоянной скорости ветра 7,5 м/с (рисунок 3.8, б) ведет также к колебаниям скорости вращения вала АГ. Однако этот диапазон находится в пределах 3150-3280 об/мин (рисунок 3.8, а), что значительно уже, чем в случае с переменной скоростью ветра (рисунок 3.7, а). При этом диапазон изменения выходного напряжения АГ также уже предыдущего случая и

составляет 175-325 В (рисунок 3.8, в). То есть переменная нагрузка является менее значимым дестабилизирующим фактором, чем переменная скорость ветра.

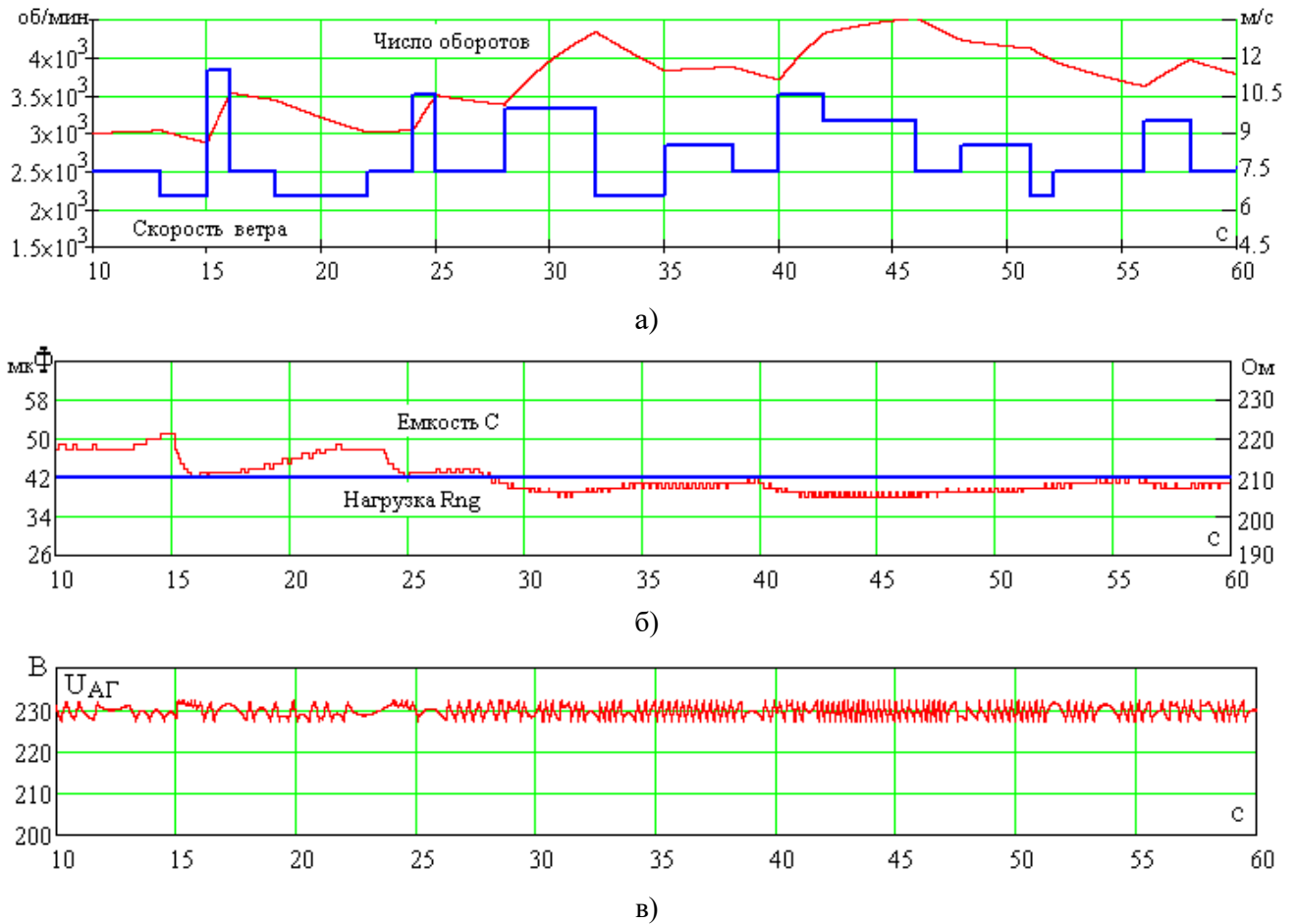


Рисунок 3.9 – Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при постоянной нагрузке и переменной скорости ветра со ступенчатым регулированием тока возбуждения:

- а) скорость ветра и число оборотов АГ, б) величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ, в) напряжение на выводах АГ

Регулирование емкости возбуждающих конденсаторов (рисунок 3.9, б) при изменяющихся скоростях ветра в тех же пределах, что и в предыдущем случае, (рисунок 3.9, а) приводит к изменению тока возбуждения и стабилизации выходного напряжения (рисунок 3.9, в). Однако за счет ступенчатого регулирования емкости возбуждения невозможно добиться четкого значения выходного напряжения, а лишь настроить таким образом, чтобы выходное напряжение АГ находилось в определенном интервале. На рисунке 3.9, в показано, что напряжение стабилизируется в диапазоне примерно 225-235 В, при этом шаг изменения емкости составляет 0,25 мкФ, а изменение емкости в пределах 38-51 мкФ.

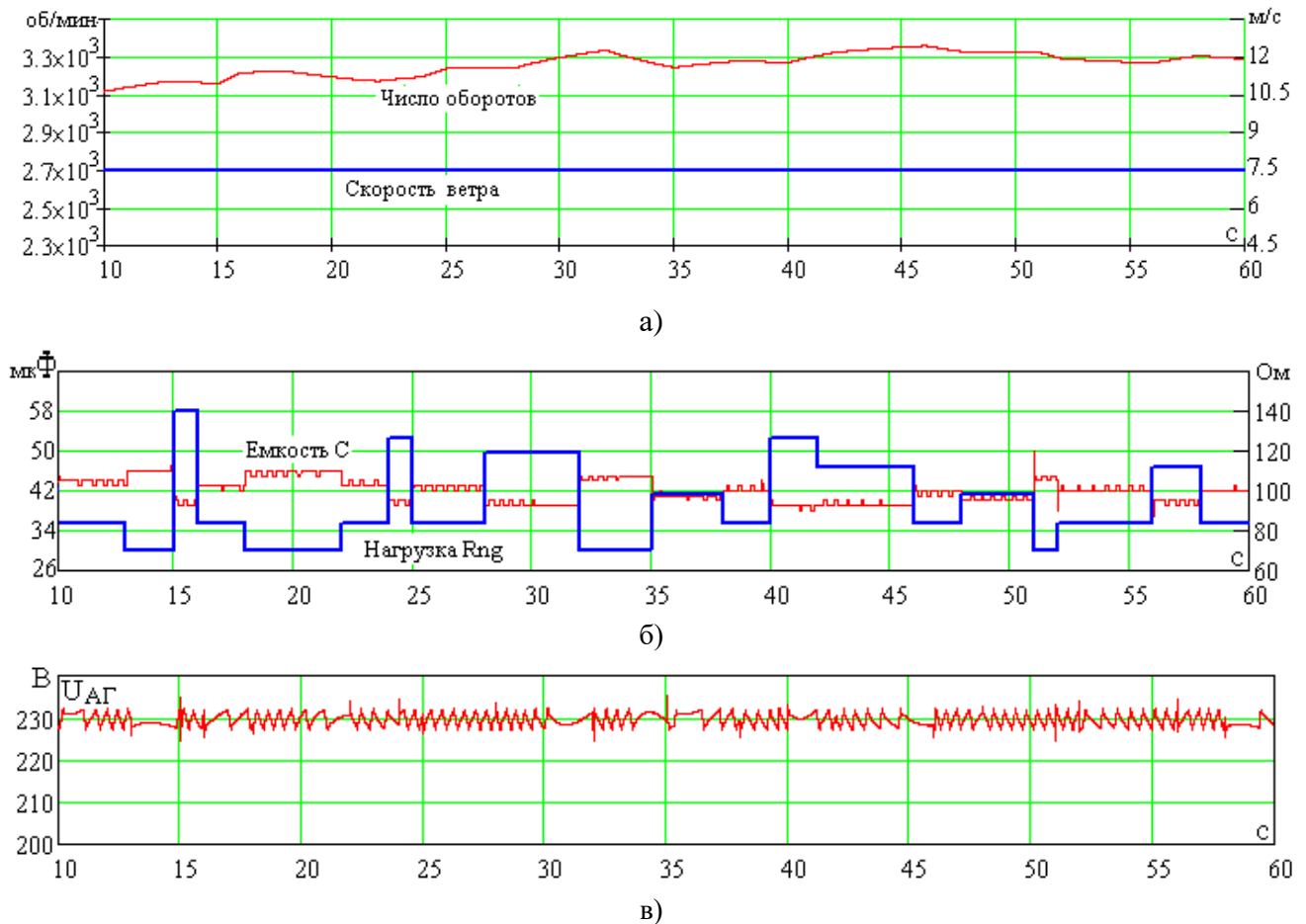


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при переменной нагрузке и постоянной скорости ветра со ступенчатым регулированием емкости возбуждения:

- а) скорость ветра и число оборотов АГ; б) величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ; в) напряжение на выводах АГ

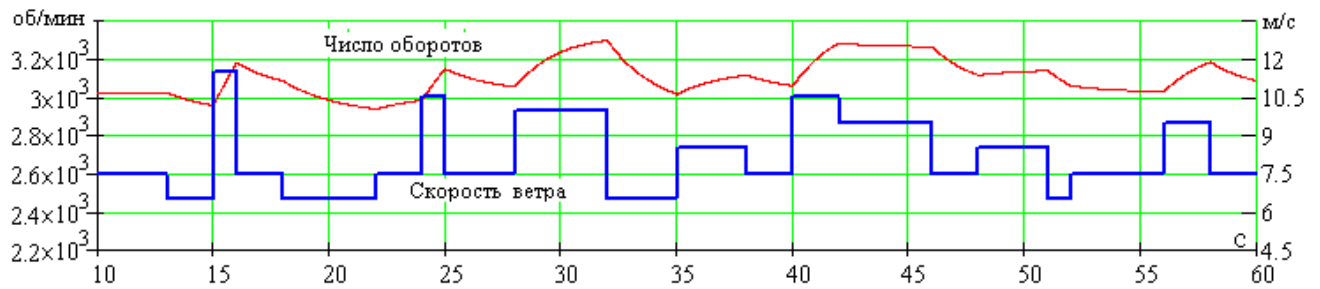
Диапазон скорости ротора АГ при регулировании тока возбуждения составляет 2900-4500 об/мин (рисунок 3.9, а), что значительно отличается от предыдущего случая (рисунок 3.7, а). Данное отличие объясняется тем, что при работе ВЭУ с неизменной емкостью возбуждения АГ вся мощность ветрового потока, преобразованная генератором, поступает в нагрузку. Однако, при регулировании емкости возбуждения происходит ограничение напряжения и нагрузкой потребляется не вся мощность, прикладываемая к ветродвигателю и преобразуемая генератором, что приводит к избытку мощности при неизменном моменте АГ, что в свою очередь приводит к значительному увеличению оборотов ветродвигателя, при этом происходит увеличение быстроходности, что грозит выходом режима работы ВЭУ за пределы аэродинамической характеристики, что недопустимо. В

этом случае, утилизация избыточной мощности происходит только за счет трения в узлах механизмов ВЭУ и более ничем не ограничивается. На практике для создания противодействующего момента используется электромагнитный тормоз, изменение положения ВЭУ относительно набегающего ветрового потока или дополнительная балластная нагрузка для создания дополнительного противодействующего момента.

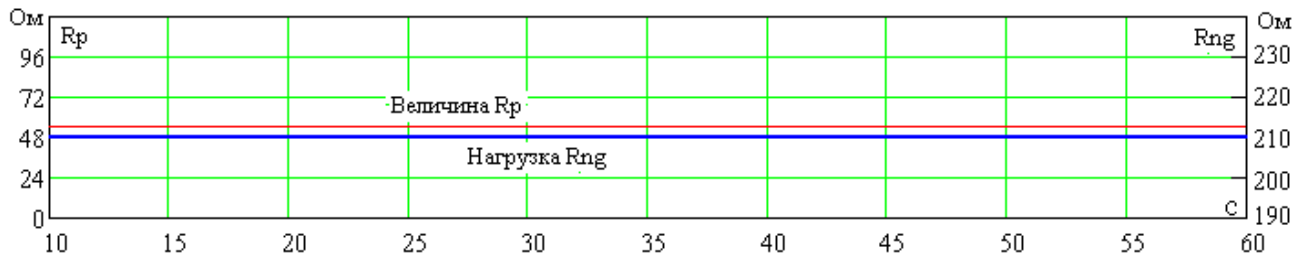
При изменении нагрузки в пределах 70-140 Ом при постоянной скорости ветра 7,5 м/с (рисунок 3.10, б) происходят колебания скорости вращения вала АГ. Этот диапазон находится в пределах 3110-3350 об/мин (рисунок 3.10, а), что значительно уже, чем в случае с переменной скоростью ветра (рисунок 3.9, а), но шире, чем в случае без стабилизации выходного напряжения АГ (рисунок 3.8, а). Это также объясняется тем, что в нагрузку поступает не вся мощность, развиваемая ВД. Напряжение АГ стабилизируется в тех же пределах, что и в случае с переменной скоростью ветра 225-235 В (рисунок 3.10, в) при том же шаге изменения емкости возбуждающих конденсаторов. При этом изменение емкости составляет 38-46 мкФ. Количество пульсаций напряжения меньше (рисунок 3.10, в) в сравнении с предыдущим случаем (рисунок 3.9, в) за счет меньшего количества переключений ступеней регулировочной емкости.

3.5 Расчет параметров и режимов работы ВЭУ при плавном регулировании тока возбуждения

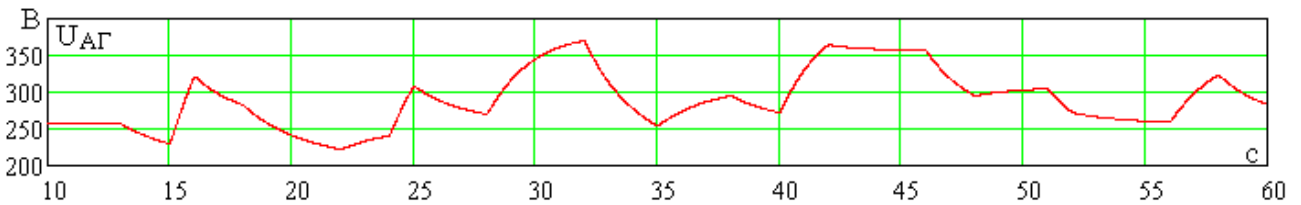
На рисунках 3.11–3.14 представлены результаты моделирования работы ветроэнергетической установки на базе АГ с неизменным и регулируемым сопротивлением R_p при изменяющихся значениях скоростей ветра и подключенной к АГ нагрузки. Показаны изменения скоростей ветра, величины нагрузки, числа оборотов ротора АГ, величины сопротивления регулировочного резистора R_p и величины действующего значения напряжения статора АГ.



а)



б)



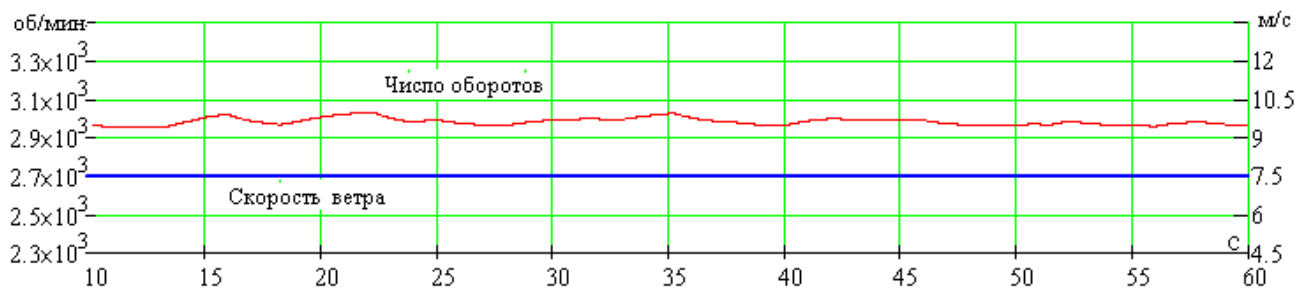
в)

Рисунок 3.11 – Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при постоянной нагрузке и переменной скорости ветра без регулирования тока возбуждения: а) скорость ветра и число оборотов АГ, б) величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ, в) напряжение на выводах АГ

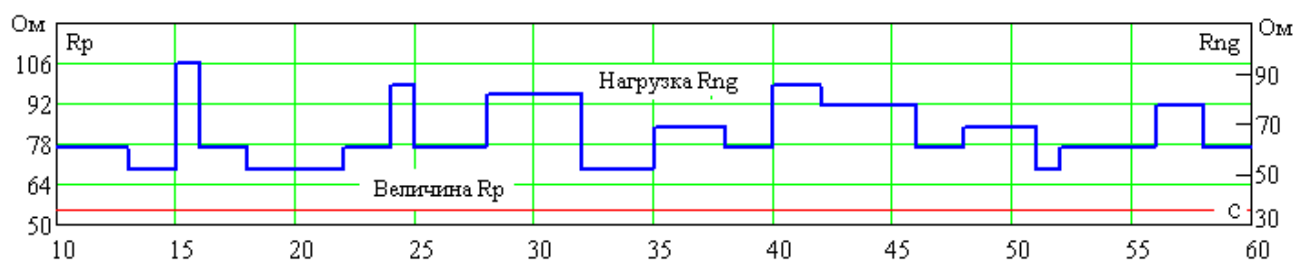
При переменной скорости ветра (рисунок 3.11, а) и неизменной нагрузке (рисунок 3.11, б), подключенной к АГ при отсутствии стабилизации напряжения, то есть при неизменном сопротивлении резистора R_p (рисунок 3.11, б) скорость вращения ротора АГ находится в пределах 2950-3300 об/мин (рисунок 3.11, а), что вызывает изменение действующего значения выходного напряжения АГ в диапазоне 225-370 В (рисунок 3.11, в).

Изменение нагрузки в пределах 55-95 Ом (рисунок 3.12, б) при постоянной скорости ветра 7,5 м/с (рисунок 3.12, а) ведет также к колебаниям скорости вращения вала АГ. Этот диапазон в данном случае находится в сравнительно узких пределах 2940-3030 об/мин (рисунок 3.12, а), что значительно уже, чем в случае с переменной скоростью ветра (рисунок 3.12, а). При этом диапазон изменения вы-

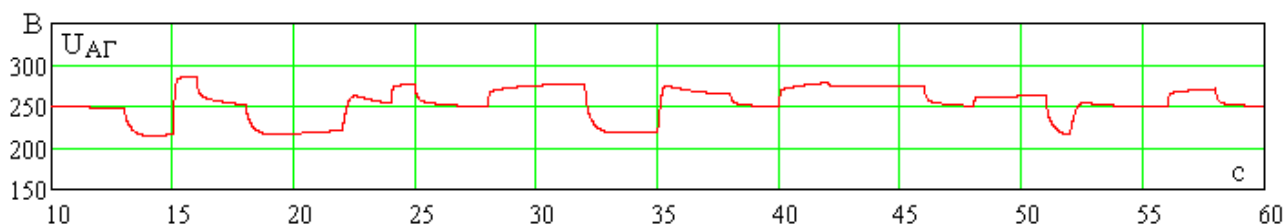
ходного напряжения АГ также уже предыдущего случая и составляет 220-285 В (рисунок 3.12, в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.12– Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при переменной нагрузке и постоянной скорости ветра без регулирования тока возбуждения: а – скорость ветра и число оборотов АГ, б – величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ, в – напряжение на выводах АГ

Регулирование тока возбуждения и, соответственно, стабилизация выходного напряжения АГ в рассматриваемом случае осуществляется за счет изменения напряжения на конденсаторах возбуждения путем изменения сопротивления резистора R_r (рисунок 3.13, б и 3.14, б). При таком регулировании удается плавно удерживать выходное напряжение АГ в узком диапазоне, который в случае переменной скорости ветра и неизменной нагрузке составляет 229-231 В (рисунок 3.13, в). Диапазон скорости ротора АГ в этом случае составляет 2700-3750 об/мин (рисунок 3.13, а), что несколько выше случая без регулирования сопротивления R_r (рисунок 3.11, а). Данное возрастание оборотов также обусловлено избытком вырабатываемой мощности по сравнению с потребляемой нагрузкой.

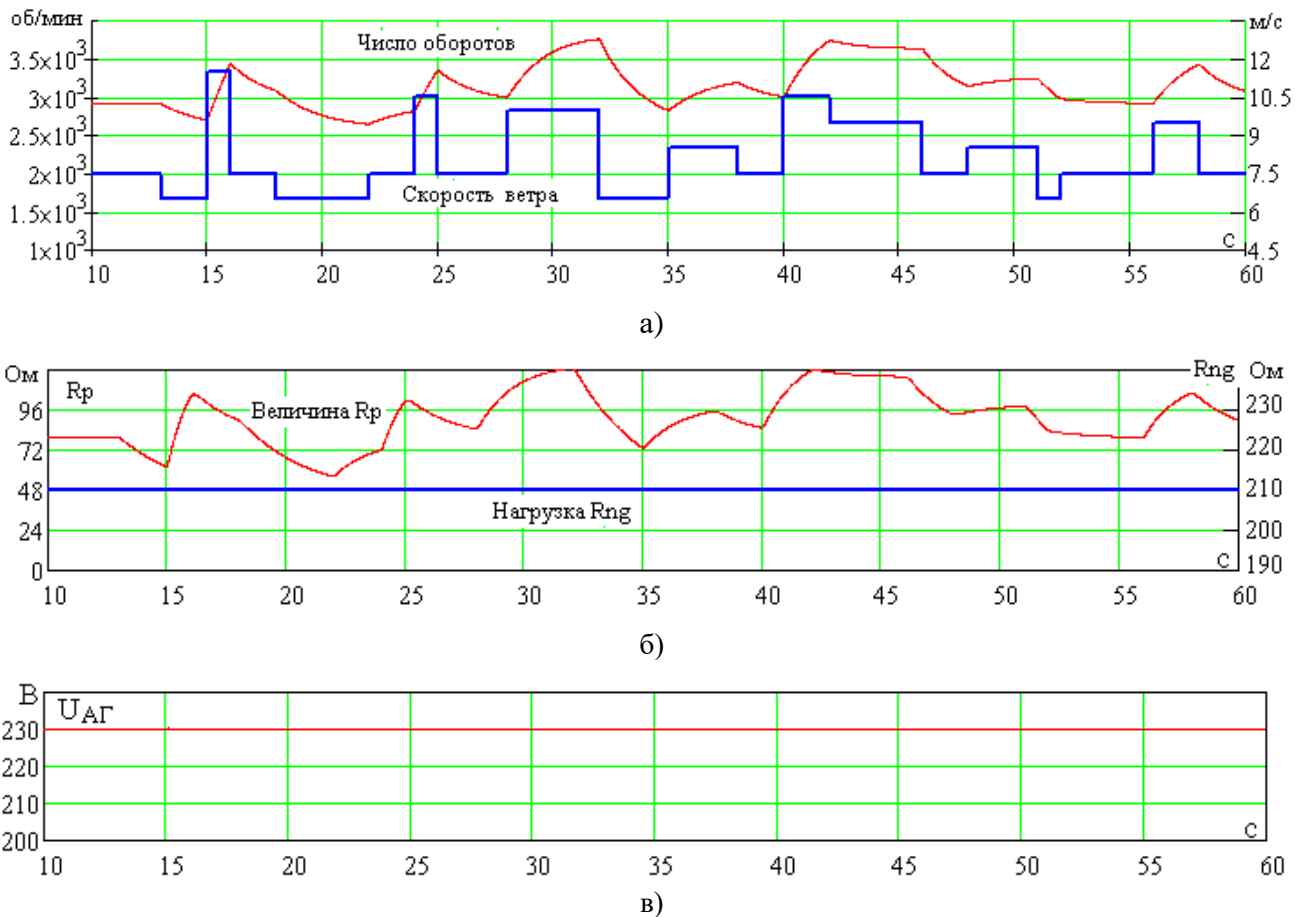


Рисунок 3.13 – Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при постоянной нагрузке и переменной скорости ветра с регулированием тока возбуждения: а – скорость ветра и число оборотов АГ, б – величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ, в – напряжение на выводах АГ

В случае стабилизации напряжения изменением R_p при постоянной скорости ветра 7,5 м/с и переменной нагрузке, изменяющейся в пределах 55-95 Ом (рисунок 3.14), диапазон выходного напряжения АГ находится в пределах 226-232 В (рисунок 3.14, в). Более широкий диапазон по сравнению с предыдущим случаем (рисунок 3.13, в) объясняется кратковременными всплесками выходного напряжения в моменты коммутации нагрузки, но эти всплески составляют не более 2-3 В. Диапазон скорости вращения вала АГ в данном случае находится в пределах 2980-3040 об/мин (рисунок 3.14, а).

При регулировании тока возбуждения путем изменения сопротивления резистора R_p (рисунки 3.13 и 3.14) обороты ротора генератора поднимаются на меньшую величину по сравнению с дискретным регулированием тока изменением емкости конденсаторов возбуждения (рисунки 3.9 и 3.10). Обуславливается это

тем, что резистор R_p является дополнительной нагрузкой для генератора и создает дополнительный электромагнитный момент на валу АГ.

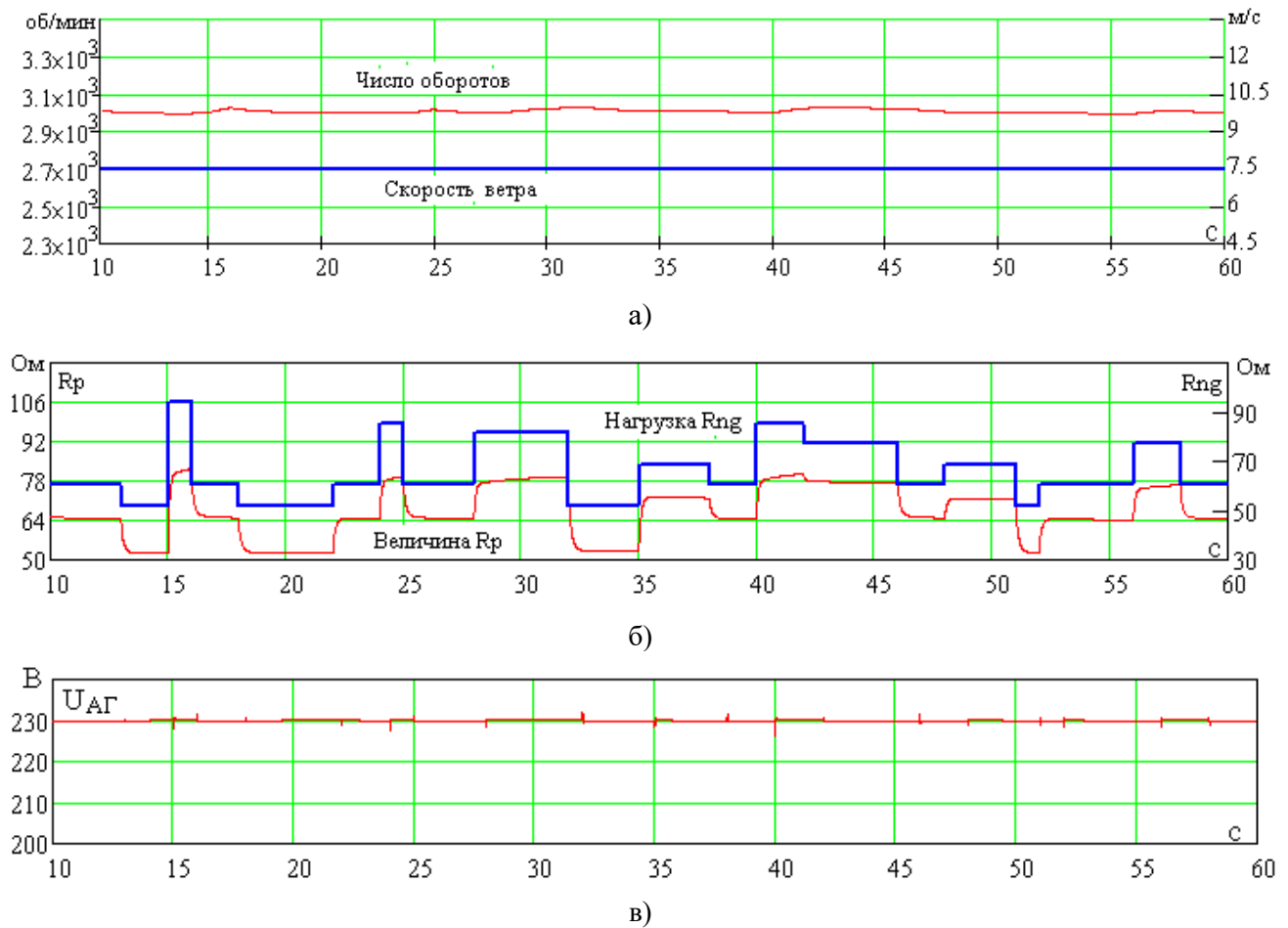


Рисунок 3.14 – Результаты моделирования работы системы ВД-АГ-нагрузка со стабилизатором напряжения при переменной нагрузке и постоянной скорости ветра с регулированием тока возбуждения: а – скорость ветра и число оборотов АГ, б – величина емкости возбуждения и величина нагрузки АГ, в – напряжение на выводах АГ

Таким образом, регулирование тока возбуждения АГ через изменение сопротивления R_p является более эффективным решением для стабилизации напряжения в автономных ВЭУ на базе АГ с короткозамкнутым ротором, работающих в условиях переменных скорости ветра и нагрузки. Основным недостатком являются потери мощности на резисторе R_p , однако, как показало моделирование, эти потери выполняют полезную функцию демпфирования и являются «платой» за существенное повышение стабильности и безопасности работы ВЭУ.

3.6 Разработка функциональной и принципиальной электрической схем стабилизатора напряжения асинхронного генератора ветроэнергетической установки

Функциональная схема нового технического решения для стабилизации напряжения при плавном регулировании емкостного тока возбуждения асинхронного генератора [105], в котором регулируется общий ток после трехфазного выпрямителя емкостных токов, показано на рисунке 3.15. Способ, реализованный в данном техническом решении, позволяет плавно изменять выходное напряжение АГ по сравнению со ступенчатой коммутацией конденсаторов возбуждения.

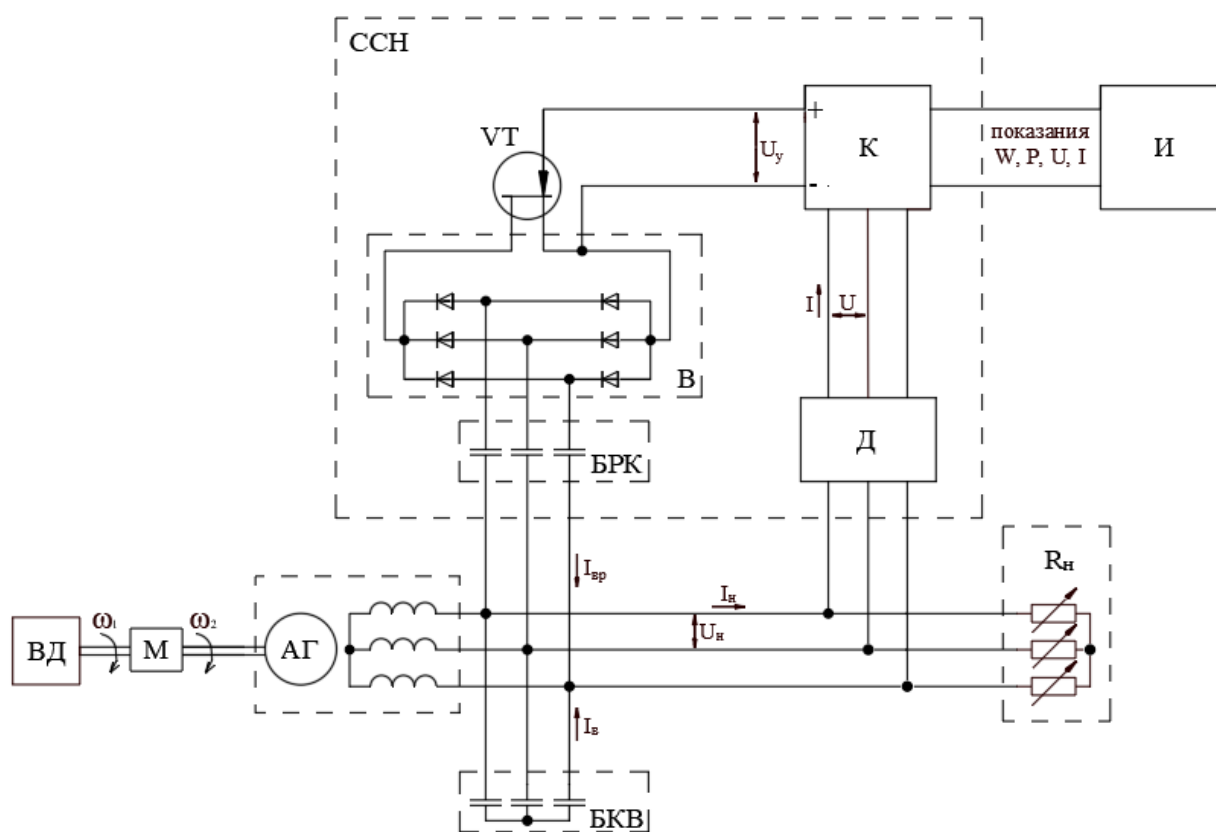


Рисунок 3.15 – Функциональная схема устройства стабилизации напряжения ветроэнергетической установки

Устройство стабилизации напряжения ветроэнергетической установки содержит ветродвигатель ВД, соединенный с мультипликатором М (редуктором), выход которого соединен через ведущий вал с короткозамкнутым ротором асинхронного генератора АГ, к выводам которого подключается нагрузка R_n , блок

конденсаторов возбуждения БКВ и система стабилизации напряжения ССН. Система стабилизации напряжения содержит блок регулировочных конденсаторов БРК, выпрямительный блок В, полевой транзистор VT, контроллер К, блок датчиков напряжения и тока Д. Кроме этого, визуализация показаний осуществляется посредством блока вывода информации И.

Устройство стабилизации напряжения ветроэнергетической установки работает следующим образом.

Мультипликатор М увеличивает частоту вращения ветроколеса ВК с ω_1 до ω_2 (рисунок 3.15). Ведущий вал и, соответственно, короткозамкнутый ротор асинхронного генератора АГ также вращаются с частотой ω_2 . Асинхронный генератор АГ самовозбуждается за счет емкостного тока блока конденсаторов возбуждения БКВ. После наведения напряжения на выводах генератора на входах выпрямительного блока В возникает разность потенциалов. Одновременно с этим, сигнал с блока датчиков Д поступает в контроллер К, в котором формируется соответствующее полученным данным с блока Д управляющее напряжение и прикладывается к электродам (затвор-исток) полевого транзистора VT, канал «сток-исток» транзистора приоткрывается и через блок регулировочных конденсаторов БРК возникает ток, то есть система стабилизации напряжения ССН включается. При этом АГ возбуждается одновременно от блока конденсаторов возбуждения БКВ и блока регулировочных конденсаторов БРК. Емкость блока конденсаторов возбуждения БКВ выбирается таким образом, чтобы обеспечить устойчивое возбуждение асинхронного генератора АГ при полностью отключенном блоке регулировочных конденсаторов БРК, и при этом обеспечивающих напряжение на выводах генератора, соответствующее нижней границе диапазона стабилизации напряжения. Емкость блока регулировочных конденсаторов БРК выбирается таким образом, чтобы суммарная емкость конденсаторов блока конденсаторов возбуждения БКВ и блока регулировочных конденсаторов БРК обеспечивала напряжение на выводах генератора, соответствующее верхней границе диапазона стабилизации напряжения. При дестабилизирующих факторах: изменениях частоты вращения ветро-

колеса ВК и величины нагрузки, система стабилизации напряжения ССН автоматически осуществляет стабилизацию напряжения. Кроме того, контроллер осуществляет расчет подключенной к генератору мощности и потребленной энергии. Расчитанные показания выводятся в информационном блоке И.

Система стабилизации напряжения ССН работает следующим образом.

Данные о напряжении и токе с выводов АГ считываются блоком датчиков напряжения и тока Д и подаются в контроллер К, где производится расчет их действующих значений. Далее производится расчет величины управляющего напряжения, соответствующее выходному напряжению генератора АГ и прикладывается на затвор и исток полевого транзистора VT, это напряжение регулирует ширину канала «сток-исток» полевого транзистора VT и, как следствие, его активное сопротивление. Изменение сопротивления «сток-исток» полевого транзистора VT приводит к изменению напряжения на нем и на подключенном к нему через выпрямительный блок В блоке регулировочных конденсаторов БРК, что приводит к изменению тока возбуждения и стабилизации выходного напряжения асинхронного генератора АГ.

На рисунке 3.16 приведена принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения асинхронного генератора согласно функциональной схеме, приведенной на рисунке 3.15.

С выхода асинхронного генератора сигнал поступает на вход стабилизатора напряжения, где в качестве датчиков напряжения выступает модуль измерения напряжения ZMPT101B, основанный на маломощном трансформаторе, за счет чего показания не искажаются и полностью повторяют форму сигнала на выходе датчика. Датчик имеет гальваническую развязку от высоковольтного входа. При измерении напряжения для настройки на модуле присутствует подстроечный резистор, при помощи которого производится калибровка. Отслеживание напряжения производится по всем трем фазам для того, чтобы при несимметрии выходного напряжения отключить нагрузку от АГ.

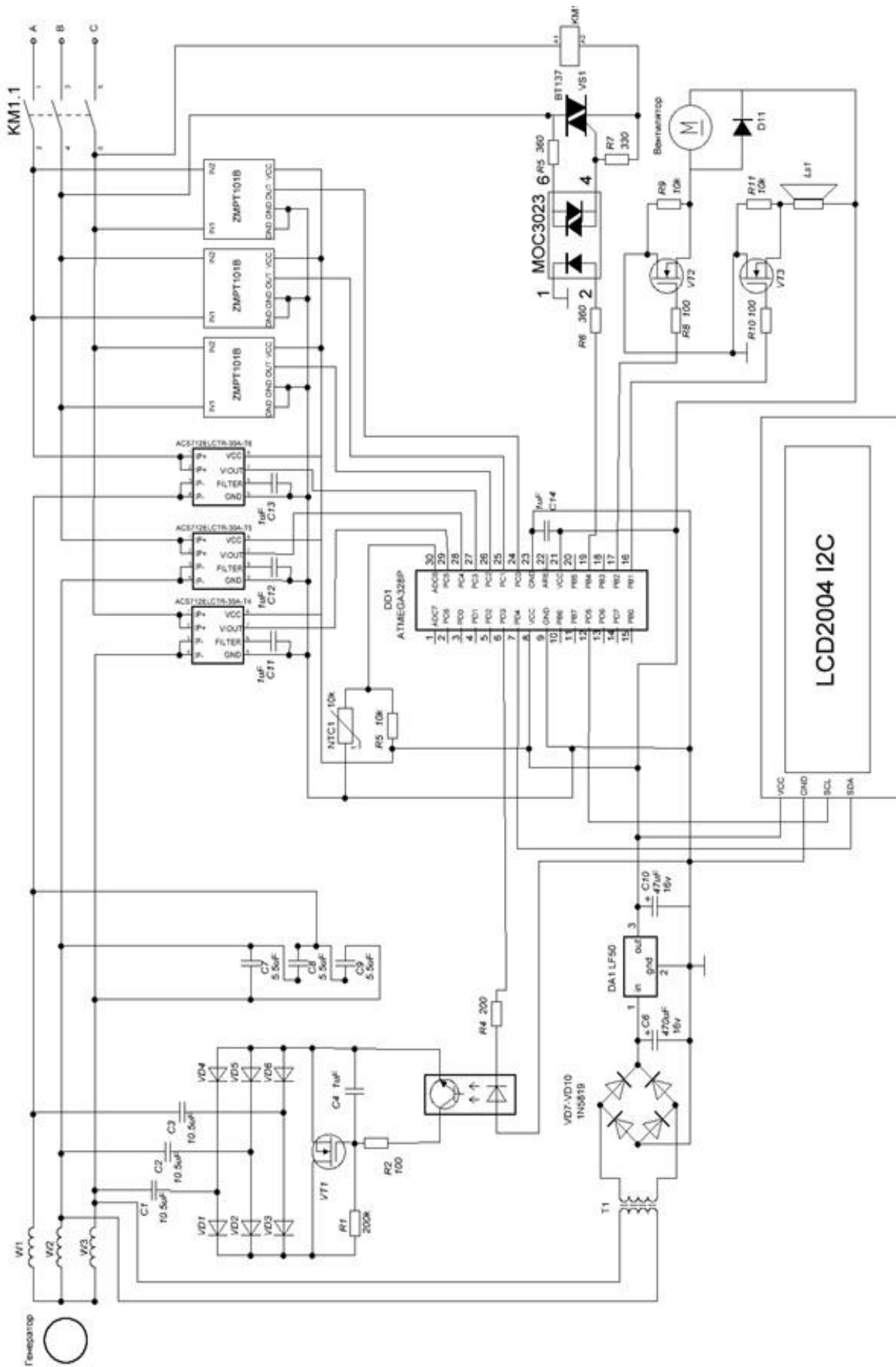


Рисунок 3.1.6 – Принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения АГ

Сигнал с датчиков напряжения поступает на аналоговые входы восьмибитного микроконтроллера Atmega328p, с помощью которого осуществляется управление стабилизатором напряжения согласно алгоритму, представленному на рисунке 3.17.

Питание контроллера осуществляется также от выхода генератора. Напряжение понижается трансформатором Т1, выпрямляется диодным мостом VD1-VD4 и подается на маломощный линейный стабилизатор напряжения положительной полярности DA1 (LF50CDT-TR) с выходным напряжением 5 В, от которого питается микроконтроллер и все периферийные модули. Конденсаторы С6 и С10 выступают в роли входного и выходного фильтров стабилизатора DA1. Конденсатор С14, включенный между выводами питания контроллера, выполняет роль блокировочного конденсатора, отсекающего высокочастотные всплески напряжения. Также стабилизатор оснащен датчиками тока ACS712, позволяющими отслеживать ток нагрузки. Датчик тока ACS712 состоит из датчика Холла и медного шунта. Ток через шунт создает магнитное поле, которое воспринимается элементом Холла. ACS712 датчик построен на эффекте Холла и имеет линейную зависимость измеряемого тока и выходного сигнального напряжения, то есть уровень выходного напряжения сенсора пропорционально зависит от измеряемого тока. Конденсаторы С11-С13 выступают в роли низкочастотного фильтра и улучшают соотношение сигнал/шум, и, следовательно, разрешение выходного сигнала датчиков.

Гальваническая развязка между контроллером и силовой частью схемы осуществляется с помощью транзисторной оптопары U1 (PC817). Выход оптопары посредством цифроаналогового преобразователя, выполненного по схеме фильтра низких частот, соединен с затвором и истоком силового полевого транзистора VT1, к которому прикладывается управляющее напряжение с выхода ЦАП. Сток-исток полевого транзистора VT1 соединен с блоком регулировочных конденсаторов С1-С3 посредством трехфазного выпрямительного моста, выполненного по схеме Ларионова. Базовая емкость в виде конденсаторов С7-С9, соединенных по схеме «треугольник», обеспечивает устойчивое возбуждение асинхронного генератора и в регулировании напряжения не участвуют.

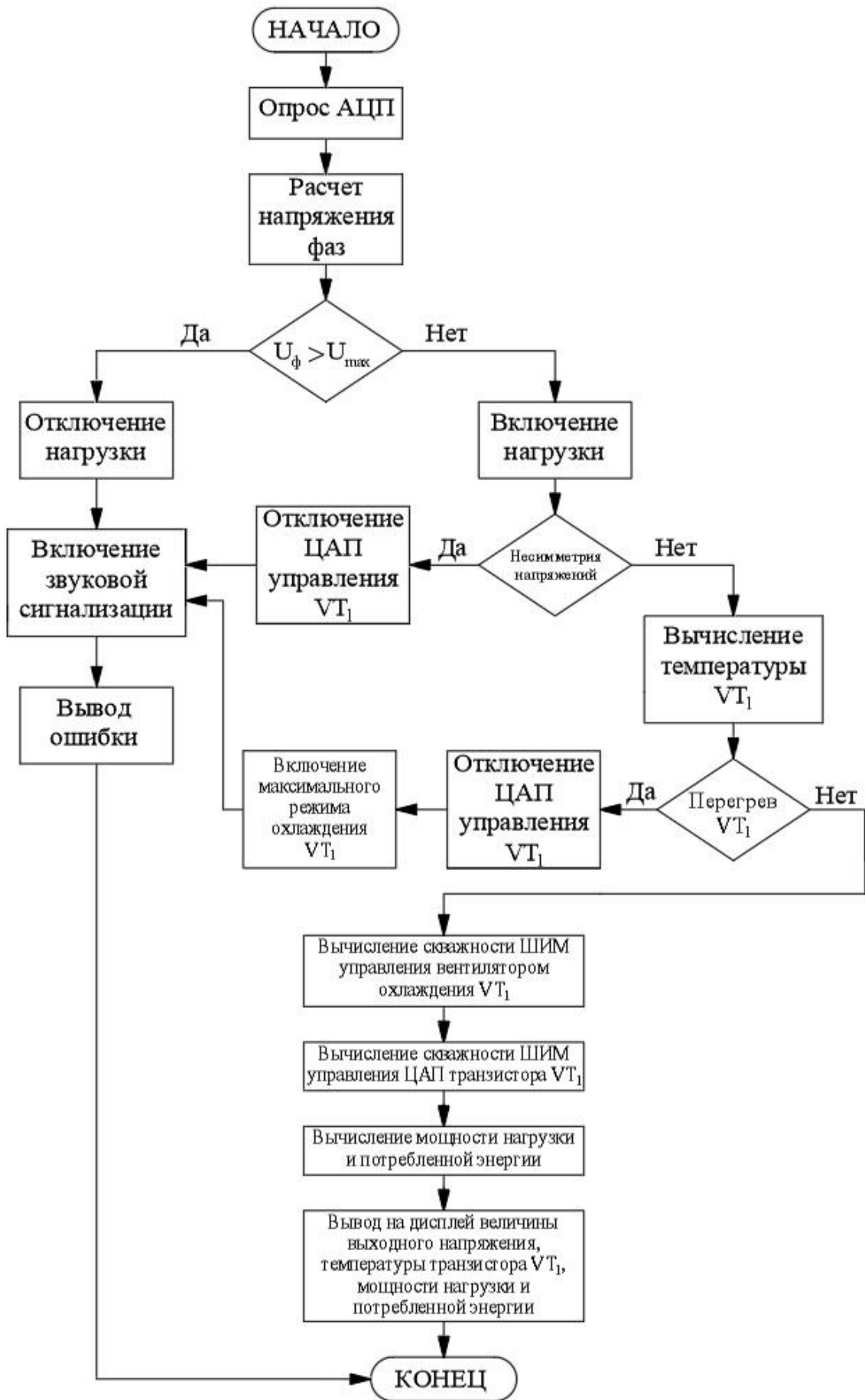


Рисунок 3.17 – Алгоритм работы системы управления стабилизатором напряжения

В схеме предусмотрено слежение за температурой силового транзистора VT1 с помощью аналогового датчика температуры NTC1. Значение температуры, считываемой указанным датчиком, определяется из уравнения Стейнхарта-Харта:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C [\ln(R)]^3, \quad (3.20)$$

где A, B, C – коэффициенты, зависящие от параметров терморезистора.

В зависимости от температуры контроллер формирует ШИМ сигнал и регулирует скорость вентилятора для охлаждения радиатора транзистора VT1, чтобы температура не превышала максимальное рабочее значение для данного типа транзисторов.

Подключение нагрузки и отключение ее в аварийном режиме осуществляется контактором K1 при подаче управляющего сигнала контроллером через симистор VS1 (BT137), посредством симисторной оптопары МОС3083.

Сведения о выходном напряжении, температуре транзистора VT1, мощности подключенной нагрузки и потребленной энергии, а в случае аварийного режима сведения об ошибке выводятся на двухстрочный дисплей LCD2004.

Кроме того, в схеме стабилизатора напряжения предусмотрена звуковая сигнализация, выполненная с помощью звукового излучателя Z1 и срабатывающая при возникновении аварийного режима работы стабилизатора.

Принцип работы стабилизатора основывается на алгоритме работы системы управления, показанном на рисунке 3.17. При включении стабилизатора напряжения (начало каждого цикла) контроллер в первую очередь производит опрос всех каналов АЦП, на которые информация поступает с датчиков напряжения, тока и температуры. Далее работа производится с полученными данными. Программа для программирования микроконтроллера согласно приведенному алгоритму представлена в приложении Д.

В первую очередь производится расчет напряжения фаз генератора. Сигнал с датчиков напряжения, поступает на аналоговые входы микроконтроллера, где с помощью встроенного аналого-цифрового преобразователя переводится в числовое значение переменной, которая дает представление о действительном значении выходного напряжения генератора. Далее контроллер выполняет условие, сравни-

вая фактическое напряжение на выходе генератора с заложенным в контроллер значением U_{\max} , тем самым проверяя работоспособность силового транзистора VT1 (NTHL050N65S3HF). То есть при пробитии канала сток-исток, его сопротивление будет равно нулю и ток регулирующих конденсаторов будет максимальным, поднимая напряжение выше U_{\max} . При выполнении этого условия контроллер подает сигнал на выключение контактора KM1, тем самым отключая нагрузку (при первом цикле работы контроллера не происходит включения нагрузки), включает звуковую сигнализацию и выводит на дисплей сведения об ошибке. При невыполнении условия контроллер подключает нагрузку.

После включения нагрузки проводится проверка несимметрии напряжений фаз. При фиксации несимметрии подается сигнал на отключение ЦАП управления транзистором VT1 и, как следствие, отключение блока стабилизирующих конденсаторов с последующей подачей звукового сигнала и выводом сведения об ошибке на дисплей.

При фиксации симметрии нагрузки следующим этапом контроллер вычисляет температуру на транзисторе VT1 и проверяет условие его перегрева. При увеличении температуры выше предельного значения, контроллер отключает ЦАП управления транзистором VT1, включает максимальный режим работы вентилятора охлаждения и запускает звуковую сигнализацию с выводом ошибки на дисплей. При отсутствии перегрева контроллер вычисляет скважность ШИМ сигнала управления вентилятором в зависимости от текущей температуры транзистора VT1.

Следующим шагом ПИД регулятор контроллера сравнивает величину фактического напряжения, полученную с датчиков напряжения в начале цикла с заданным (требуемым) значением напряжения и вырабатывает ШИМ сигнал определенной скважности и подает на оптопару U1. С выхода оптопары сигнал подается на цифро-аналоговый преобразователь и сформировавшееся на конденсаторе C4 напряжение прикладывается к затвору и истоку транзистора VT1. Это напряжение регулирует ширину канала сток-исток транзистора VT1, тем самым меняя активное сопротивление перехода и, как следствие, величину напряжения на кон-

денсаторах С1-С3, подключенных к транзистору VT1 через трехфазный выпрямитель. При этом меняется ток возбуждения генератора и, следовательно, выходное напряжение генератора. Если разница между входным и заданным значением напряжения отсутствует, то на выходе ПИД регулятора будет отсутствовать изменение ШИМ сигнала, то есть регулировка не требуется.

На последнем этапе производится расчет подключенной к стабилизатору мощности нагрузки и потребленной электроэнергии с последующим выводом всей информации (выходное напряжение генератора, температура транзистора VT1, мощность нагрузки и потребленная электроэнергия) на дисплей.

3.7 Выводы по третьей главе

1. Для исследования работы стабилизатора разработаны математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» при стабилизации напряжения путем дискретного и плавного регулирования тока возбуждения. Разработанные модели позволяют рассчитывать и наблюдать различные переходные процессы в АГ, получать мгновенные, амплитудные и действующие значения токов и напряжений в АГ, скорость вращения ВД, момент на валу АГ.

2. Разработан алгоритм расчета параметров и режимов работы ВЭУ, в котором для решения уравнений модели «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения применена модификация метода Рунге-Кутты 5-го порядка – формула Фельберга.

3. Показано, что в диапазонах изменения скорости ветра 6,5-11,5 м/с стабилизация выходного напряжения АГ путем плавного регулирования тока возбуждения изменением сопротивления R_p обеспечивает более узкий диапазон выходного напряжения в пределах ± 2 В в сравнении с дискретным регулированием, где диапазон изменения выходного напряжения АГ зависит от шага изменения емкости и составляет ± 5 В при шаге регулирования емкости возбуждения 0,25 мкФ,

4. Стабилизация выходного напряжения АГ приводит к изменению обо-

ротов ВД. При дискретном регулировании тока возбуждения и переменной скорости ветра 6,5-11,5 м/с диапазон скоростей ротора АГ расширяется с 3200-3900 об/мин (без стабилизации) до 2900-4500 об/мин (со стабилизацией), создавая риск выхода ВЭУ в недопустимый режим работы. Стабилизация выходного напряжения АГ путем плавного регулирования тока возбуждения изменением сопротивления R_p сужает диапазон скоростей вращения вала АГ с 2900-4500 об/мин (при дискретном регулировании тока возбуждения) до 2700-3750 об/мин (при плавном регулировании тока возбуждения) за счет того, что резистор R_p является нагрузкой и создает дополнительный электромагнитный момент на валу АГ. Таким образом, стабилизация напряжения путем плавного регулирования тока возбуждения ограничивает разгон ротора, преобразуя часть избыточной мощности в тепло на резисторе.

5. Разработана функциональная схема стабилизатора напряжения для ВЭУ с АГ, раскрыты особенности её работы при стабилизации напряжения. Применение полевого транзистора в качестве переменного регулируемого резистора в цепи постоянного тока выпрямительного моста позволяет плавно регулировать ток возбуждения АГ и исключить из схемы большое количество коммутационной аппаратуры, используемой при ступенчатом изменении емкости, что позволяет уменьшить массу и габаритные размеры стабилизатора напряжения.

6. Разработана принципиальная электрическая схема стабилизатора напряжения, выполненная на основе 8-разрядного микроконтроллера типа Atmega 328p, которая позволяет работать с высоким быстродействием и точностью. Приведён алгоритм работы системы управления стабилизатором напряжения, на базе которого создана программа для программирования микроконтроллера.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Экспериментальная проверка результатов моделирования состояла из двух-этапов:

1. Проверка адекватности предложенного способа учета нелинейности магнитных свойств магнитопровода АГ.
2. Проверка валидности математических моделей стабилизации напряжения путем дискретного изменения емкости возбуждающих конденсаторов и плавным изменением напряжения на возбуждающих конденсаторах.

4.1 Проверка адекватности учета нелинейности магнитных свойств магнитопровода

В качестве проверки адекватности предложенного подхода к учету нелинейности характеристики асинхронной машины был проведен опыт холостого хода, результатом которого является определение характеристики холостого хода (рисунок 4.1). При моделировании рассматривается электрическая машина на базе электродвигателя. Для оценки работоспособности разработанной модели были получены характеристики АД с короткозамкнутым ротором серии АО32–4Т, средняя номинальная мощность которого составляла $P_{ном}=1$ кВт, номинальная частота вращения $n_n=1472$ об/мин, номинальное фазное напряжение $U_{фн}=220$ В; номинальный фазный ток $I_{фн}=4,2$ А; КПД $\eta=0,78,5$; коэффициент мощности $\cos\varphi_n=0,79$; величина воздушного зазора $\delta=0,4$ мм.

В трехфазной системе координат приведенная к виду Коши для расчета в пакете Mathcad система уравнения для асинхронного двигателя будет иметь вид:

$$F(i, t, y, m(\Psi)) := \begin{bmatrix} -R_s \cdot i_0 + U_n \cdot \sin(314 \cdot t) \\ -R_s \cdot i_1 + U_n \cdot \sin(314 \cdot t - \frac{2\pi}{3}) \\ -R_s \cdot i_2 + U_n \cdot \sin(314 \cdot t - \frac{4\pi}{3}) \\ -R_r \cdot i_3 - \frac{y_4 - y_5}{\sqrt{3}} \cdot y_6 \cdot p \\ -R_r \cdot i_4 - \frac{y_5 - y_3}{\sqrt{3}} \cdot y_6 \cdot p \\ -R_r \cdot i_5 - \frac{y_3 - y_4}{\sqrt{3}} \cdot y_6 \cdot p \\ \frac{p}{J} \cdot \frac{1,73}{2} \cdot M \cdot m(\Psi) \cdot (i_0 \cdot i_5 + i_1 \cdot i_3 + i_2 \cdot i_4 - i_0 i_4 - i_1 i_5 - i_2 i_3) - \frac{Mng}{J} \end{bmatrix}$$

где

i_0 – ток статора по оси α ; i_3 – ток ротора по оси α ;

i_1 – ток статора по оси β ; i_4 – ток ротора по оси β ;

i_2 – ток статора по оси γ ; i_5 – ток ротора по оси γ ;

потокосцепления

y_0 – статора по оси α ; y_3 – ротора по оси α ;

y_1 – статора по оси β ; y_4 – ротора по оси β ;

y_2 – статора по оси γ ; y_5 – ротора по оси γ ;

y_6 – угловая скорость ротора;

$m(\Psi)$ – коэффициент учета насыщения магнитной системы.

Результаты расчета характеристики холостого хода.

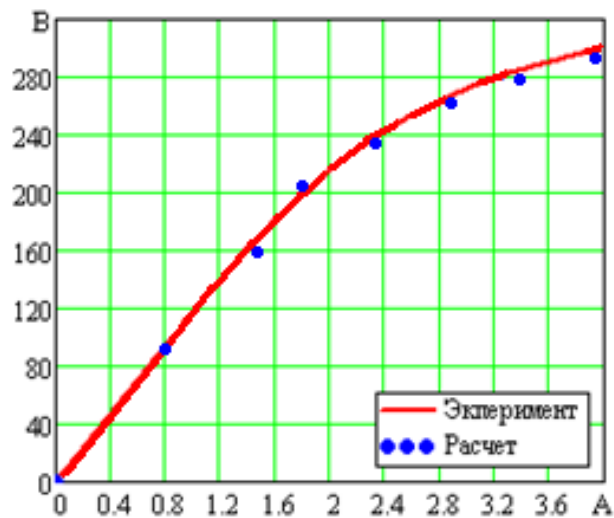


Рисунок 4.1 – Характеристика холостого хода АД (опытная и экспериментальная)

Искажение токов статора становится заметным при увеличении подаваемого напряжения до 300-320 В. При подаче напряжения 320 В происходит заметное насыщение магнитной системы АД и токи, полученные в этом режиме опытным и расчетным по программе путем показаны ниже.

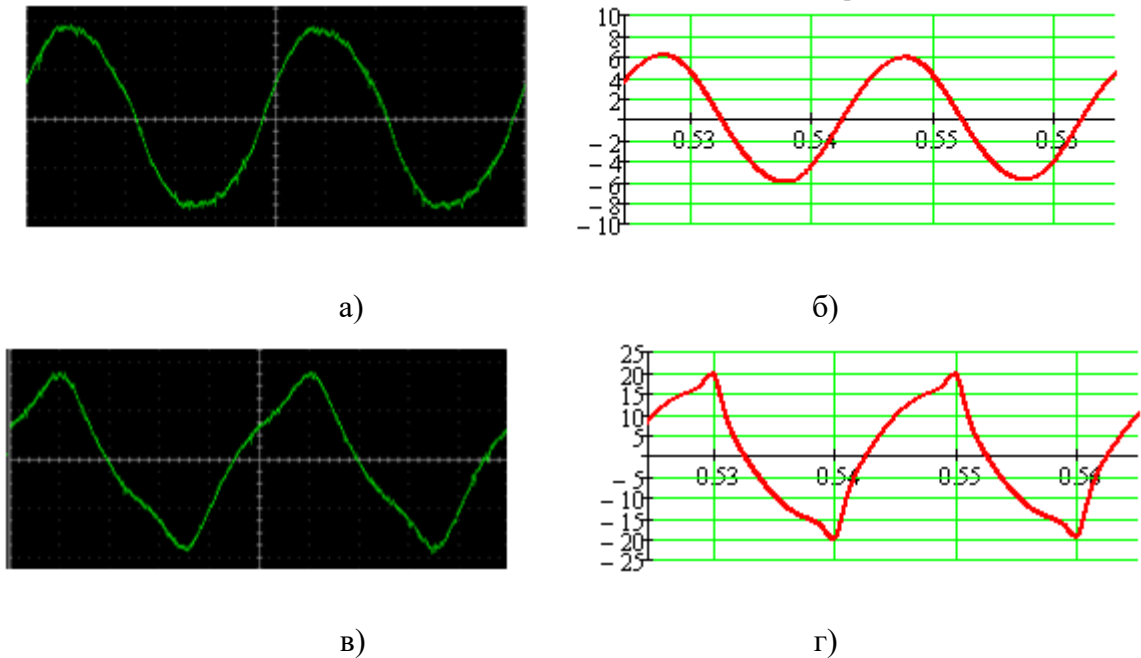


Рисунок 4.2 – Ток фазы АД при подаче напряжения 220 В (а – опыт, б – расчет) и при подаче напряжения 380 В (в – опыт, г – расчет)

Как видно из графика на рисунке 4.1 отклонение теоретических данных от экспериментальных составило не более 5 %. При статистическом сравнении полученных теоретических и опытных данных расчетный t-критерий при уровне значимости $p = 0,05$ был меньше его критического значения, что говорит о том, что между теоретическими и опытными данными с 95 % вероятностью нет никаких статистических различий.

Полученные уравнения использовались для построения математических моделей, в которых выполняется расчет динамических характеристик АД с учетом насыщения магнитной цепи главного потокосцепления и по пути потокосцепления рассеяния обмоток статора.

4.2 Проверка валидности математического моделирования стабилизации напряжения асинхронного генератора при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения

Экспериментальная проверка проводилась на испытательном стенде, внешний вид которого показан на рисунке 4.3. Ветродвижитель был представлен с помощью ДПТ, скорость которого изменялась во времени по тому же закону, что и при математическом моделировании системы «ветрогенератор-АГ-регулятор-нагрузка».

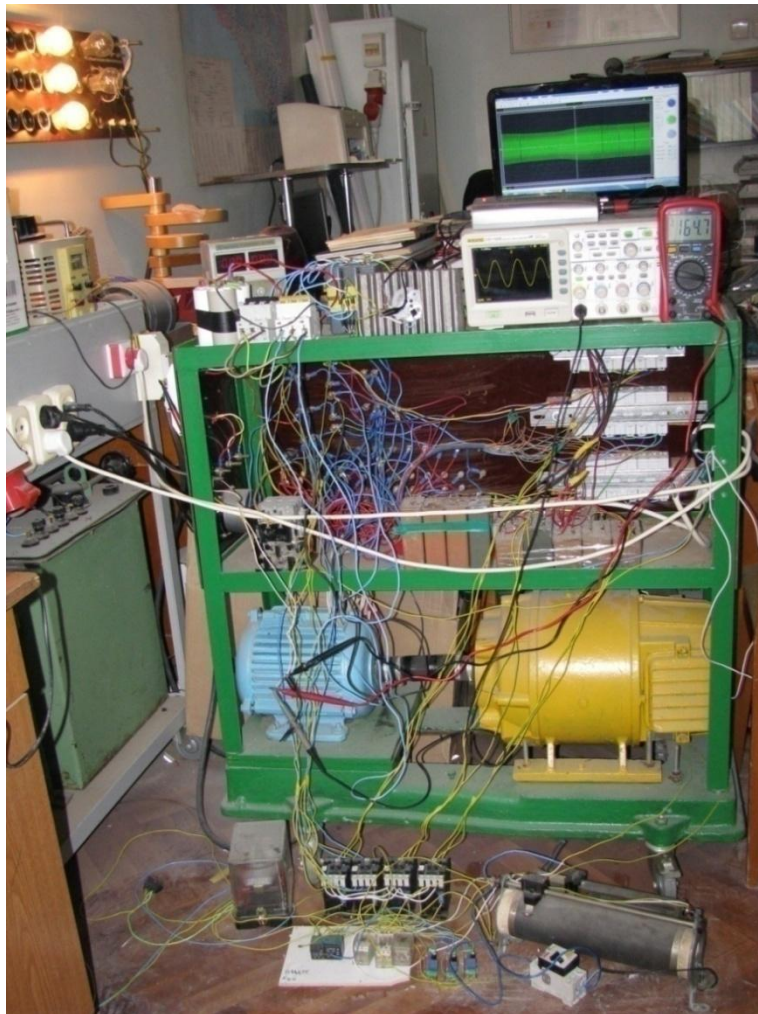


Рисунок 4.3 – Внешний вид испытательного стенда

В качестве имитации ветродвигателя использовался двигатель постоянного тока П-31: $n=1500$ об/мин; ток обмотки возбуждения $I_b=0,35$ А; ток обмотки якоря $I_a=8,6$ А; мощность 1,5 кВт (возбуждение независимое). Для имитации колебания скорости ветра и, соответственно, изменения оборотов и момента приводного двигателя в цепь

NTHL050N65S3HF, ширина канала «сток-исток» которого регулируется за счет изменения напряжения на переменном резисторе R_p .

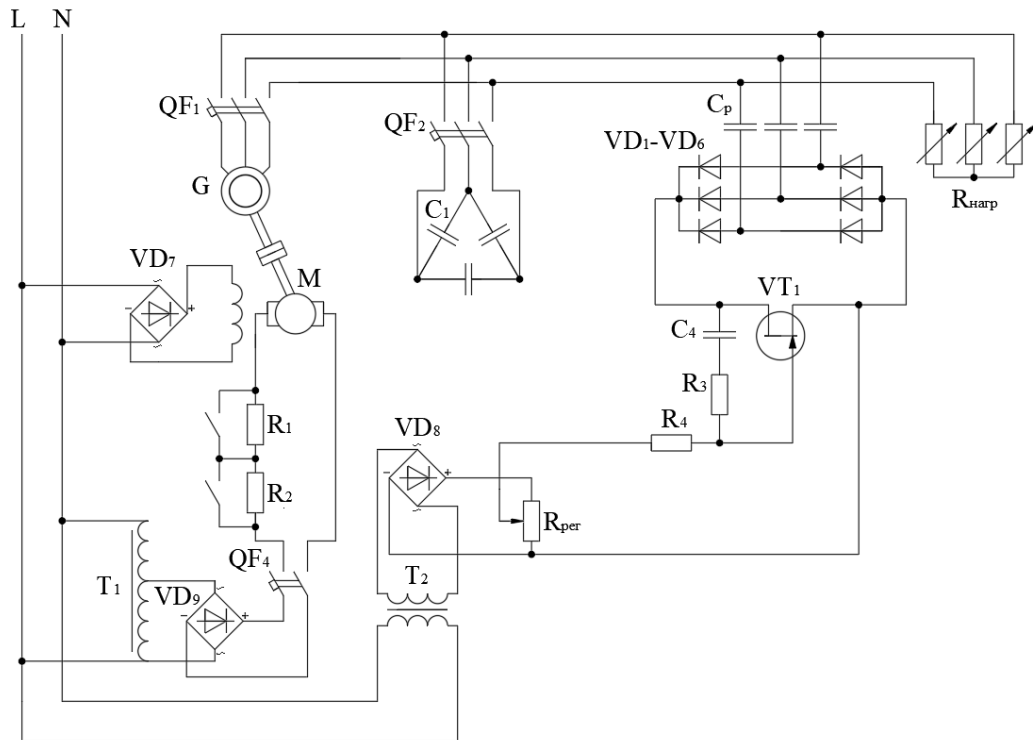


Рисунок 4.5 – Электрическая схема лабораторного стенда для проверки валидности математической модели при плавном регулировании тока возбуждения

Эксперимент заключался во введении в цепь якоря приводного ДПТ активных сопротивлений с целью изменения числа оборотов вала и, следовательно, изменения выходного напряжения АГ. Сопротивления вводились в автоматическом режиме с помощью электромагнитных реле и настраиваемых реле времени. Алгоритм введения сопротивлений по интервалам времени следующий: $(0 \div t_1) - R_1 \rightarrow (t_1 \div t_2) - R_1 + R_2 \rightarrow (t_2 \div t_3) - 0 \rightarrow (t_3 \div t_4) - R_1$. При данном алгоритме проводилось 2 независимых эксперимента по стабилизации выходного напряжения АГ:

- 1) дискретным изменением тока возбуждения ($C_1 - C_6$);
- 2) плавным регулированием тока возбуждения путем изменения активного сопротивления канала «сток-исток» полевого транзистора VT1.

При этом в каждом случае эксперимент проводился в 2 этапа: без стабилизации и со стабилизацией выходного напряжения.

Для расчета была использована математическая модель двигателя постоянного тока, разработанная для экспериментов [46]. Сравнительные данные модели

и экспериментального режима применяемого ДПТ, работающего на постоянную нагрузку при стабилизации выходного напряжения АГ, показаны на рисунке 4.6.

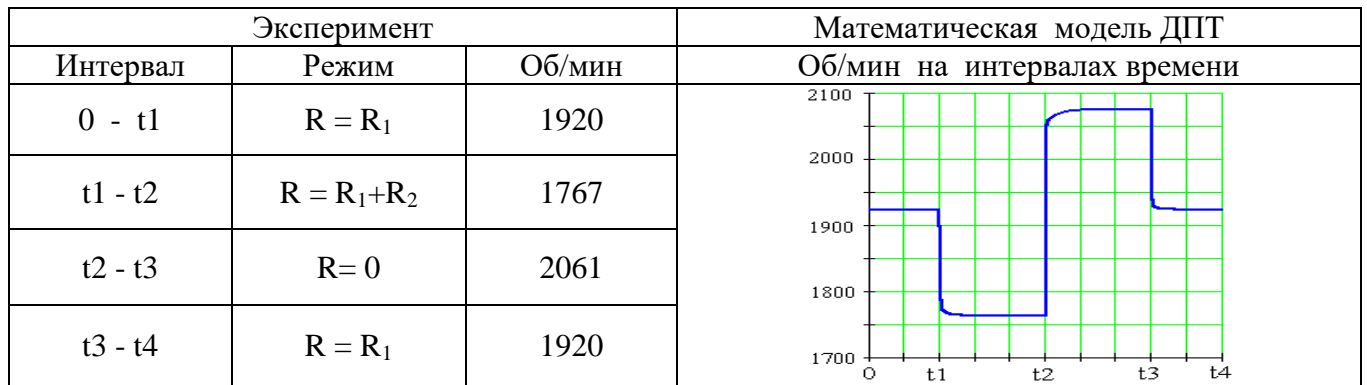


Рисунок 4.6 – Изменение числа оборотов ДПТ при разных величинах сопротивлений в цепи якоря

При проведении сравнительных экспериментов с АГ, имеющим различные варианты регулирования тока возбуждения в расчетах использовалась математическая модель, в которой механический момент, развиваемый ВЭУ, представляемый в уравнении движения ротора АГ в системе «ветродвигатель – асинхронный генератор – стабилизатор напряжения»

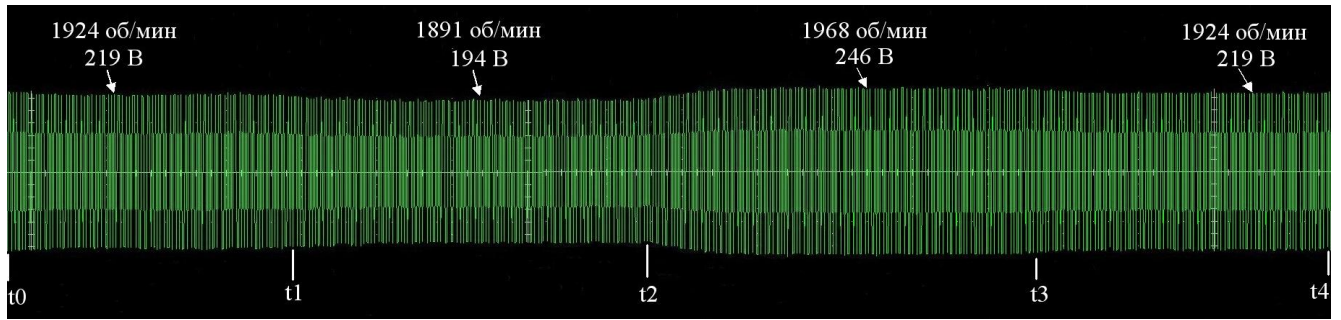
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p\sqrt{3}}{2J_{\Sigma}} m (\Psi_{r\gamma} i_{s\alpha} + \Psi_{r\alpha} i_{s\beta} + \Psi_{r\beta} i_{s\gamma} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\gamma} i_{s\beta} - \Psi_{r\alpha} i_{s\gamma}) - \frac{k_M \omega - k_T}{J_{\Sigma}} - \frac{M_{ВД}(v, \omega, b)}{J_{\Sigma}},$$

как $M_{ВД}(v, \omega, b)$ был заменен механическим моментом ДПТ $M_{ДПТ}(R_1, R_2)$, в котором резисторы R_1 и R_2 включались по вышеприведенному алгоритму. Уравнение движения ротора АГ в этом случае представлялось следующим образом

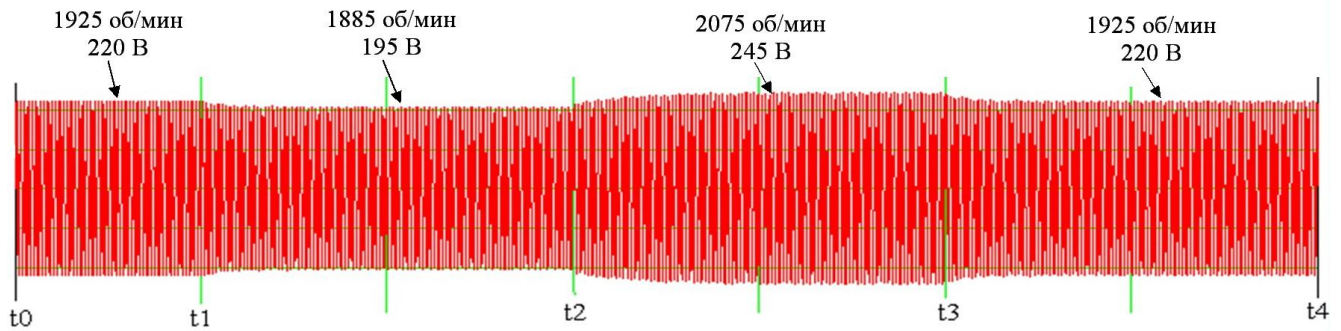
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p\sqrt{3}}{2J_{\Sigma}} m (\Psi_{r\gamma} i_{s\alpha} + \Psi_{r\alpha} i_{s\beta} + \Psi_{r\beta} i_{s\gamma} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\gamma} i_{s\beta} - \Psi_{r\alpha} i_{s\gamma}) - \frac{k_M \omega - k_T}{J_{\Sigma}} - \frac{M_{ДПТ}(R_1, R_2)}{J_{\Sigma}},$$

где суммарный момент инерции J_{Σ} учитывал момент инерции ДПТ.

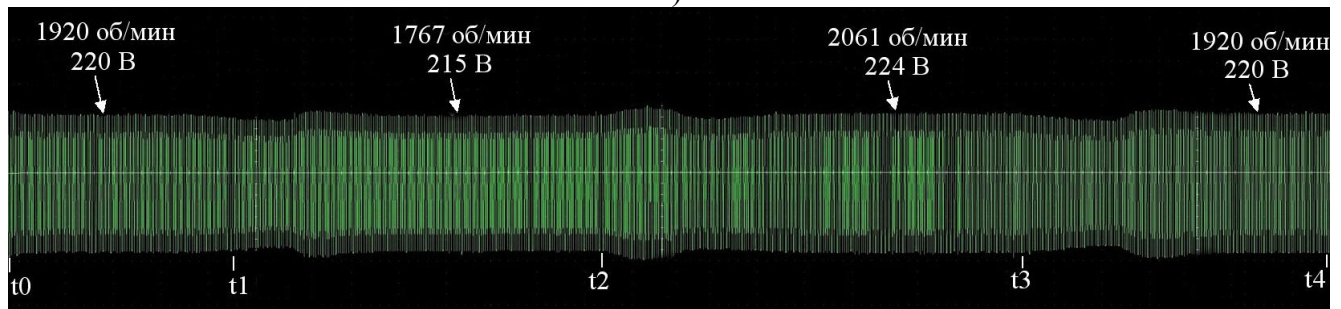
На рисунке 4.7 приведены экспериментальные осциллограммы напряжений при дискретном изменении емкости возбуждения без стабилизации (рисунок 4.7, а) и со стабилизацией напряжения (рисунок 4.7, в), а также соответствующие им результаты моделирования (рисунок 4.7, б и 4.7, г) на математической модели системы «ВД-АГ-стабилизатор напряжения - нагрузка».



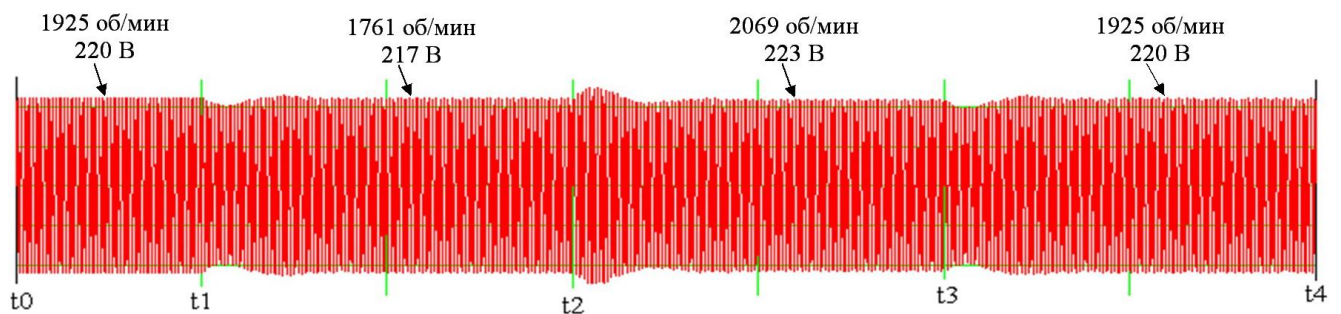
а)



б)



в)



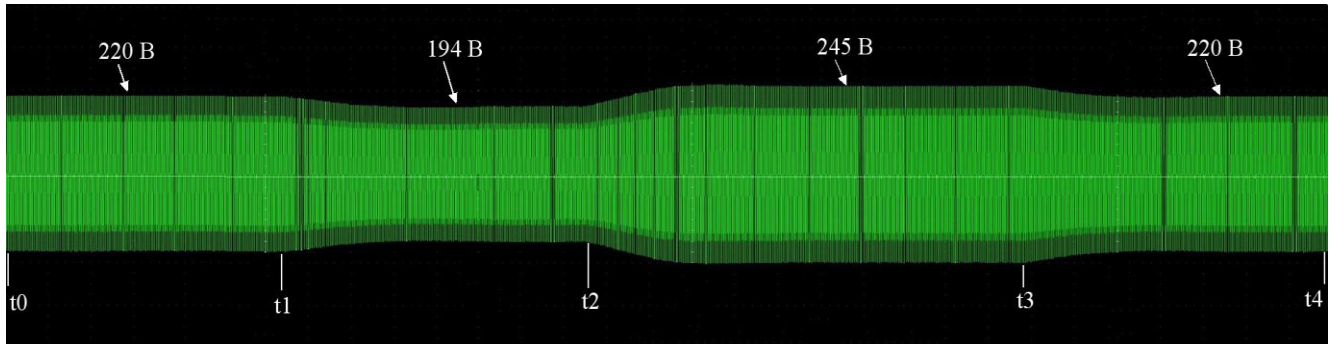
г)

Рисунок 4.7 – Результаты экспериментальной проверки процесса стабилизации напряжения на стенде с ДПТ путем дискретного регулирования тока возбуждения:

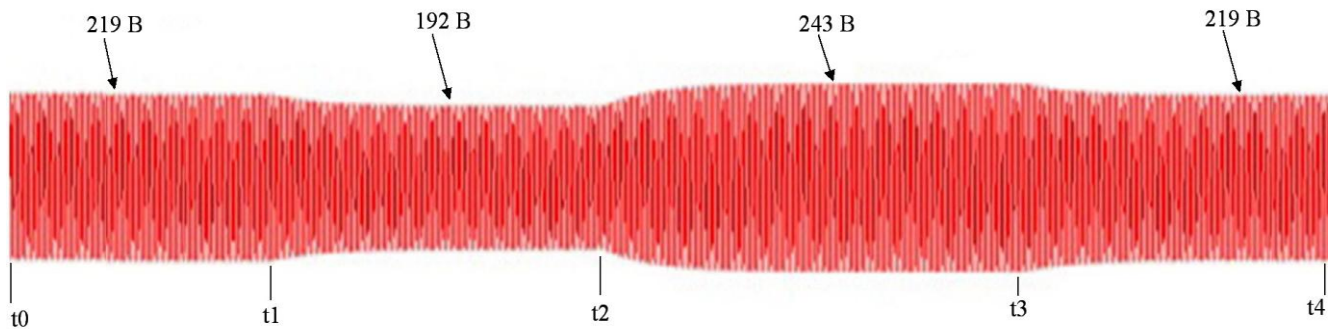
а – экспериментальная осциллограмма без стабилизации напряжения; б – расчетная осциллограмма без стабилизации напряжения; в – экспериментальная осциллограмма со стабилизацией напряжения; г – расчетная осциллограмма со стабилизацией напряжения

На рисунке 4.8 приведены экспериментальные осциллограммы напряжений при плавном изменении тока возбуждения без стабилизации (рисунок 4.8, а) и со стабилизацией напряжения (рисунок 4.8, в), а также соответствующие им резуль-

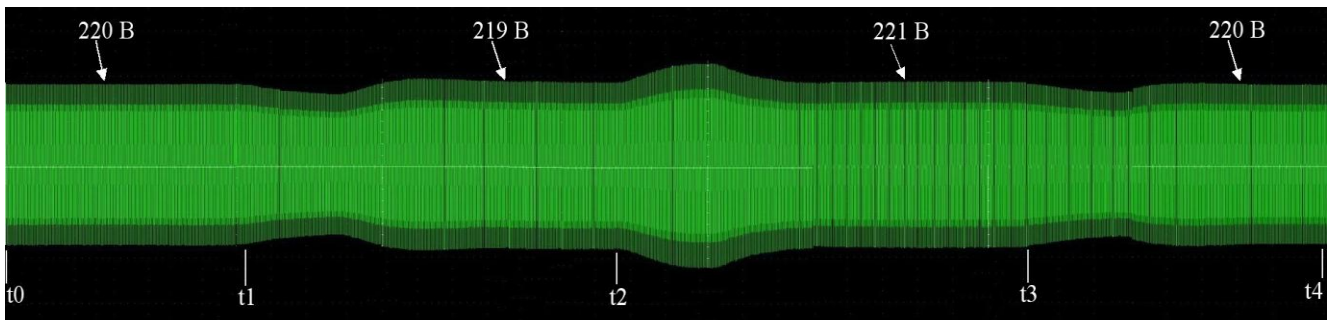
таты моделирования (рисунок 4.8,б и 4.8,г) на математической модели системы «ВД-АГ-стабилизатор напряжения - нагрузка».



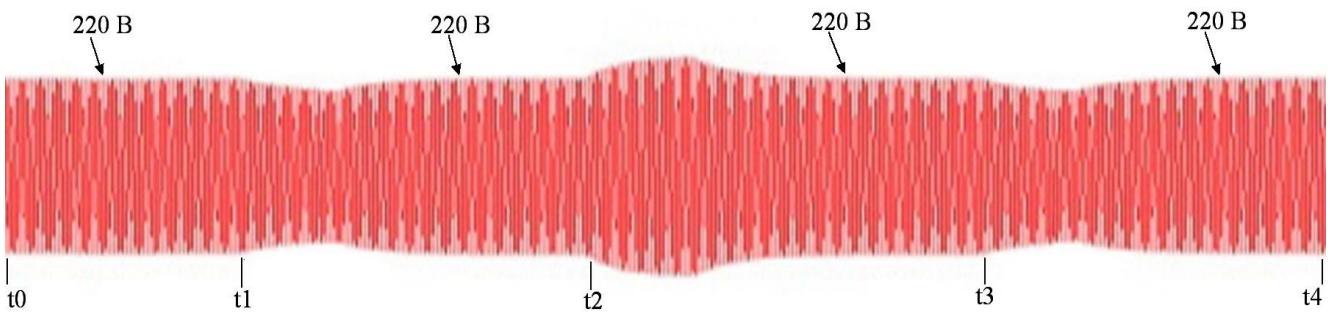
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.8 – Результаты экспериментальной проверки процесса стабилизации напряжения на стенде с ДПТ путем плавного регулирования тока возбуждения:

- а – экспериментальная осциллограмма без стабилизации напряжения;
- б – расчетная осциллограмма без стабилизации напряжения;
- в – экспериментальная осциллограмма со стабилизацией напряжения;
- г – расчетная осциллограмма со стабилизацией напряжения

Для сравнения данных использовался парный t-критерий Стьюдента, так как он является корректным методом для данных с временной зависимостью [143].

Согласно алгоритму проведения эксперимента весь опыт разбивается на 4 временных участка (на первом этапе вводится сопротивление R_1 , на втором этапе R_1+R_2 , на третьем этапе сопротивление выводится, то есть равно 0, на четвертом этапе возвращается R_1). На каждом участке через равные промежутки времени многократно (10 раз) снималось 5 показаний напряжений. Усредненные показания внесены в таблицу 4.1. Каждому показанию, полученному экспериментально, соответствует расчетное значение напряжения математической модели. В таблице 4.1 показаны экспериментальные и расчетные показания без стабилизации и со стабилизацией выходного напряжения АГ при дискретном изменении емкости возбуждения, а также их абсолютное Δ и относительное отклонение δ .

Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований (ЭИ) и математического моделирования (ММ) стабилизации напряжения при дискретном изменении тока возбуждения

№	Без стабилизации напряжения				Со стабилизацией напряжения			
	Значения измерений, В		Δ , В	δ , %	Значения измерений, В		Δ , В	δ , %
	ЭИ	ММ			ЭИ	ММ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	219,3	220,3	-1,0	-0,46	219,5	220,3	-0,8	-0,36
2	220,5	220,3	+0,2	+0,09	220,0	220,3	-0,3	-0,14
3	220,0	220,3	-0,3	-0,14	220,5	220,3	+0,2	+0,09
4	219,8	220,3	-0,5	-0,23	219,7	220,3	-0,6	-0,27
5	221,2	220,3	+0,9	+0,41	219,5	220,3	-0,8	-0,36
6	194,5	194,9	-0,4	-0,21	215,1	217,4	-2,3	-1,07
7	194,1	194,9	-0,8	-0,41	216,1	217,4	-1,3	-0,60
8	195,2	194,9	+0,3	+0,15	215,3	217,4	-2,1	-0,98
9	194,1	194,9	-0,8	-0,41	215,9	217,4	-1,5	-0,69
10	194,6	194,9	-0,3	-0,15	216,4	217,4	-1,0	-0,46
11	245,2	245,3	-0,1	-0,04	225,0	223,1	+1,9	+0,84
12	245,5	245,3	+0,2	+0,08	224,5	223,1	+1,4	+0,62
13	246,4	245,3	+1,1	+0,45	224,3	223,1	+1,2	+0,54
14	244,8	245,3	-0,5	-0,2	224,5	223,1	+1,4	+0,62

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	245,2	245,3	-0,1	-0,04	224,1	223,1	+1,0	+0,45
16	220,1	220,3	-0,2	-0,09	220,8	220,3	+0,5	+0,23
17	220,2	220,3	-0,1	-0,05	220,0	220,3	-0,3	-0,14
18	222,0	220,3	+1,7	+0,77	219,5	220,3	-0,8	-0,36
19	219,5	220,3	-0,8	-0,36	220,1	220,3	-0,2	-0,09
20	221,5	220,3	+1,2	+0,54	221,6	220,3	+1,3	+0,59

Перед применением парного t-критерия Стьюдента было проведено тестирование предпосылки о нормальности распределения разностей между экспериментальными и модельными значениями с использованием теста Шапиро-Уилка [71, 76]. Во всех случаях распределение разностей не противоречило нормальному ($p > 0.05$) (Приложение Е).

Как видно из таблицы 4.1 отклонение расчетных данных от данных, полученных экспериментально при отсутствии стабилизации выходного напряжения АГ составило не более 1,7 В в абсолютном выражении и 0,766 % в относительном. При статистическом сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных среднеквадратическое отклонение составило 0,698 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 0,585 В или 0,267 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил $-0,32; +0,33$ В (с вероятностью 95 %), а расчетный t-критерий равен 0,032 при его критическом значении $t_{\text{крит}}=2,093$.

При введении стабилизации выходного напряжения АГ в эксперимент и математическую модель отклонение теоретических данных от экспериментальных составило до 2,3 В в абсолютном выражении и 1,01 % в относительном. При статистическом сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных среднеквадратическое отклонение составило 1,13 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 1,02 В или 0,464 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил $-0,56; +0,51$ В. Расчетный t-критерий равен $-0,098$ при его критическом значении $t_{\text{крит}}=2,093$.

В обоих случаях при уровне значимости $\alpha = 0,05$ расчетный t-критерий оказался меньше его критического значения, а доверительный интервал для средней разности включает ноль. Это означает, что различия между теоретическими и экспериментальными данными статистически незначимы с вероятностью 95 %. Модель является валидной, а незначительное расхождение данных на втором и третьем участках для случая с введением стабилизации объясняется более широким шагом изменения емкости возбуждения в физической модели по сравнению с математической моделью.

В таблице 4.2 показаны экспериментальные и расчетные показания без стабилизации и со стабилизацией выходного напряжения АГ при плавном изменении тока возбуждения, а также их абсолютное Δ и относительное отклонение δ .

Таблица 4.2 – Результаты экспериментальных исследований (ЭИ) и математического моделирования (ММ) стабилизации напряжения при плавном изменении тока возбуждения

№	Без стабилизации напряжения				Со стабилизацией напряжения			
	Значения измерений, В		Δ , В	δ , %	Значения измерений, В		Δ , В	δ , %
	ЭИ	ММ			ЭИ	ММ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	220,3	219,2	+1,1	+0,50	220,7	220,1	+0,6	+0,27
2	219,9	219,2	+0,7	+0,32	220,4	220,1	+0,3	+0,14
3	219,0	219,2	-0,2	-0,09	219,9	220,1	-0,2	-0,09
4	218,3	219,2	-0,9	-0,41	219,5	220,1	-0,6	-0,27
5	218,7	219,2	-0,5	-0,23	220,2	220,1	+0,1	+0,05
6	193,1	191,8	+1,3	+0,67	218,7	219,8	-1,1	-0,50
7	192,5	191,8	+0,7	+0,36	219,5	219,8	-0,3	-0,14
8	192,4	191,8	+0,6	+0,31	219,5	219,8	-0,3	-0,14
9	190,4	191,8	-1,4	-0,74	220,0	219,8	+0,2	+0,09
10	190,9	191,8	-0,9	-0,47	220,1	219,8	+0,3	+0,14
11	244,0	243,1	+0,9	+0,37	221,2	220,3	+0,9	+0,41
12	244,4	243,1	+1,3	+0,53	221,0	220,3	+0,7	+0,32
13	243,7	243,1	+0,6	+0,25	220,7	220,3	+0,4	+0,18
14	242,1	243,1	-1,0	-0,41	220,1	220,3	-0,2	-0,09
15	243,0	243,1	-0,1	-0,04	219,7	220,3	-0,6	-0,27

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	220,5	219,2	+1,3	+0,59	219,1	220,1	-1,0	-0,46
17	219,1	219,2	-0,1	-0,05	219,4	220,1	-0,7	-0,32
18	218,8	219,2	-0,4	-0,18	220,0	220,1	-0,7	-0,32
19	220,2	219,2	+1,0	+0,45	220,6	220,1	+0,5	+0,23
20	219,6	219,2	+0,4	+0,18	220,5	220,1	+0,4	+0,18

Как видно из таблицы 4.2 отклонение расчетных данных от данных, полученных экспериментально при отсутствии стабилизации выходного напряжения АГ составило не более 1,4 В в абсолютном выражении и 0,735 % в относительном. При статистическом сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных среднеквадратическое отклонение составило 0,86 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 0,72 В или 0,33 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал составил -0,12; +0,69 В (с вероятностью 95 %), а расчетный t-критерий равен 1,487 при его критическом значении $t_{\text{крит}}=2,093$.

При введении стабилизации выходного напряжения АГ в эксперимент и математическую модель отклонение теоретических данных от экспериментальных составило не более 1,1 В в абсолютном выражении и 0,503 % в относительном. При статистическом сравнении полученных теоретических и экспериментальных данных среднеквадратическое отклонение составило 0,568 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 0,475 В или 0,216 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал составил -0,3; +0,23 В с вероятностью 95 %. Расчетный t-критерий равен -0,276 при его критическом значении $t_{\text{крит}}=2,093$.

Как и в случае с дискретным изменением емкости возбуждения, в обоих вариантах при уровне значимости $p = 0,05$ расчетный t-критерий был меньше его критического значения, что говорит о том, что между теоретическими и экспериментальными данными различия незначимы с вероятностью 95 %. Модели валидны.

4.3 Расчет технико-экономических показателей постановки ветроэнергетических установок малой мощности на серийное производство

В настоящее время на территории Южного федерального округа насчитывается около 5 млн голов овец, из которых на сельскохозяйственные организации приходится порядка 9 %. Остальное поголовье выращивается в МФХ и ЛПХ. В Краснодарском крае ситуация обстоит еще острее: из общего количества овец на ЛПХ и МФХ приходится почти 95 % поголовья [41]. То есть почти вся продукция овцеводческой отрасли поставляется на рынок частными производителями.

Для обеспечения МФХ и ЛПХ ВЭУ малой мощности (до 1 кВт) необходимо организовать серийное производство адаптированных к овцеводческим хозяйствам ВЭУ. Такое производство может быть организовано на базе известных в крае предприятий ООО «Солнечный центр», ООО «Депар», ООО «Энерготехнологии-Сервис», ООО «Аврора» и др., которые имеют соответствующее оборудование и производственные мощности. Расчет технико-экономических показателей проведем исходя из годового производства в 100 штук.

На первом этапе необходимо произвести расчет затрат на стадии исследования и разработки. Основным допущением при расчете принято, что производство работ сторонними организациями, командировочные расходы, амортизационные отчисления на оборудование не будут учитываться.

Общие затраты на проведение НИОКР (общий фонд зарплаты с начислениями) определяется путем суммирования отдельных составляющих [93]:

$$Z_{\text{НИОКР}} = Z_{\text{НИР}} + Z_{\text{О}} + Z_{\text{Д}} + Z_{\text{Э}} + H + Z_{\text{СК}} \cdot K_{\text{ТР}}, \quad (4.1)$$

где $Z_{\text{НИР}}$ – затраты на научно-исследовательскую работу; $Z_{\text{О}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{Д}}$ – дополнительная заработная плата; $Z_{\text{Э}}$ – затраты на энергоресурсы; H – накладные расходы; $Z_{\text{СК}}$ – суммарные затраты на функциональные элементы установки и комплектующие; $K_{\text{ТР}} = 1,05$ – коэффициент транспортно-заготовительных расходов.

Учитывая высокую квалификацию персонала для выполнения НИР, такую работу можно примерно оценить в 1 млн рублей. Эту сумму следует счи-

тать ориентировочной, и она может значительно отличаться в большую сторону. Однако в меньшую сторону она если и может отличаться, то не значительно ввиду причины, указанной ранее: относительно небольшое количество квалифицированных работников на рынке труда, способных выполнять подобную работу.

В общем случае затраты на разработку ВЭУ складываются из расходов по следующим статьям: заработная плата разработчиков; затраты на энергоносители; затраты на комплектующие.

Сведения расходов на заработную плату разработчиков ВЭУ приведены в таблице 4.3. Данные по зарплате брались по среднему уровню по соответствующей отрасли в Краснодарском крае за 2023 год на примере ООО «Депар», ООО «Энерготехнологии-Сервис» и ООО «Аврора».

Таблица 4.3 – Зарботная плата разработчиков ВЭУ

№ п/п	Этапы разработки	Исполнители	Почасовая ставка руб.	Количество исполнителей	Трудоемкость, ч.	Затраты руб.
1	Получение ТЗ и разработка ТУ на схемное решение установки	Ведущий инженер	600	1	12	7200
2	Разработка схемы установки	Инженер	470	1	10	4700
3	Изготовление (сборка) лабораторного образца	Техник	290	2	24	13920
4	Испытания новой установки	Инженер	470	1	16	7520
		Техник	290	1	16	4640
5	Оформление протоколов испытаний	Инженер	470	1	8	3760
6	Разработка ТУ на конструкцию	Ведущий инженер	600	1	12	7200
7	Оформление документации	Техник	290	1	6	1740
		Инженер	470	1	8	3760
ИТОГО						56320

Для повышения качества и ускорения работ устанавливается надбавка к зарплате в размере 20 % от основной:

$$Z_d = 56320 \cdot 0,2 \approx 11300 \text{ руб.}$$

Общий процент начислений на ПФР, ФМС, ФСС, ФСС травматизм с 2022 г составляет величину в 30 %. Таким образом, суммарный коэффициент начислений $K_H = 1,30$. Общий фонд заработной платы с начислениями:

$$Z_{\text{ОБЩ}} = (Z_o + Z_d) K_H. \quad (4.2)$$

Тогда общие затраты на заработную плату составят:

$$Z_{\text{ОБЩ}} = (56320 + 11300)1,30 \approx 87900 \text{ руб.}$$

Принимаем накладные расходы в размере 30 % от общего фонда заработной платы. Эти включают в себя стоимость проведения патентного поиска, изучение технической и научной литературы, а также стоимость заявки на оформление патента (полезной модели)

$$H = 87900 \cdot 0,3 \approx 26400 \text{ руб.}$$

Затраты на энергоносители включают в себя затраты на расход электроэнергии, водоснабжение, газ и канализацию. С учётом опыта работы перечисленных ранее предприятий эти затраты на период проведения НИОКР не превышают $Z_{\text{Э}} = 1100 \text{ руб.}$

В таблице 4.4 приведены сведения о стоимости основных функциональных элементов ВЭУ мощностью 1,1 кВт и комплектующих.

Таблица 4.4 – Комплектующие ВЭУ мощностью 1,1 кВт

№ п/п	Наименование	Стоимость, руб
1	Мачта	15000
2	Ветроколесо	24000
3	Хвостовая гондола	12000
4	Асинхронный генератор	12200
5	Конденсаторы возбуждения	1200
6	Стабилизатор напряжения	6850
7	Комплектующие	6000
	Итого	77250

За базовую модель принята ВЭУ YASHEL FT-1000 / 24 мощностью 1 кВт (при номинальной скорости ветра 15 м/с). Однако в стоимости комплектующих учтена стоимость ветроколеса от ВЭУ YASHEL DMWT-5KW, так как оно обеспечит выходную мощность в 1,1 кВт при скорости ветра 7 м/с. Кроме того, необходимо заменить хвостовую гондолу базовой модели, которая не обеспечивает

буревую защиту, на аналогичный элемент с механической защитой складыванием хвостового стабилизатора. СГПМ базовой модели мощностью 1 кВт заменен на асинхронный генератор с емкостным возбуждением мощностью 1,1 кВт. Таким образом, суммарные затраты на функциональные элементы СФЭУ и комплектующие ЗСК = 77250 руб.

Общие затраты на проведение НИОКР составляют:

$$Z_{\text{НИОКР}} = 1000000 + 87900 + 11300 + 1100 + 26400 + 77250 \cdot 1,05 \approx 1210000 \text{ руб.}$$

В таблице 4.5 приведена полная калькуляция себестоимости производства одной ВЭУ мощностью 1,1 кВт на номинальную скорость ветра 7 м/с. Основная заработная плата производственных рабочих начисляется с учетом выполнения технологических операций, связанных с выполнением сборочно-монтажных и регулировочных работ составляет примерно 15000 рублей на одну установку.

Аренда оборудования для производства ВЭУ на перечисленных ранее предприятиях составляет примерно 100 тыс. рублей в месяц. В перерасчете на одну штуку продукции, исходя из годового выпуска ВЭУ в 100 штук, стоимость аренды составит 12000 рублей.

Далее для расчета себестоимости производства ВЭУ определяем укрупнено объем затрат в процентах от стоимости комплектующих ВЭУ:

- вспомогательные материалы – 5 %;
- топливо и энергия на технологические нужды – 1 %;
- транспортно-заготовительные расходы – 3 %;
- общепроизводственные расходы – 5 %.

Отчисления на социальные нужды составляют 30 % от суммы расходов на оплату труда производственных рабочих.

Коммерческие расходы принимаются в размере 1 % от производственной себестоимости продукции.

Таким образом, полная себестоимость производства одной ВЭУ составляет:

$$C_{\text{П}} \approx 121000 \text{ руб.}$$

Валовую прибыль примем в размере 25 % от себестоимости:

$$P_B = C_{II} \cdot 0,25 = 121000 \cdot 0,25 = 30250 \text{ руб.}$$

Тогда цена установки составит:

$$C = C_{II} + P_B = 121000 + 30250 \approx 151000 \text{ руб.}$$

Таблица 4.5 – Полная калькуляция себестоимости производства одной ВЭУ мощностью 1,1 кВт

Статья калькуляции	Сумма, руб		
	на одну ВЭУ, руб.	на годовой выпуск, руб.	на квартал, руб.
Стоимость функциональных элементов ВЭУ (мачта, хвостовая гондола, ветроколесо, генератор, конденсаторы возбуждения, стабилизатор напряжения)	77250	7725000	1931250
Вспомогательные материалы	3862,5	386250	96562,5
Топливо и энергия на технологические нужды	772,5	77250	19312,5
Транспортно-заготовительные расходы	2317,5	231750	57937,5
Аренда оборудования	12000	1200000	300000
Основная зарплата производственных рабочих	15000	1500000	375000
Отчисления на социальные нужды	4500	450000	112500
Общепроизводственные расходы	3862,5	386250	96562,5
Итого производственная стоимость	119565	11956500	2989125
Коммерческие расходы	1191	119100	29775
Полная себестоимость	120761	12076100	3019025
Выручка от реализации	150951	15095100	3773775

Годовая прибыль от реализации 100 СФЭУ составит:

$$P_{Г1} = 3019000 \text{ руб.}$$

Предпроизводственные затраты определяются по формуле:

$$K_{III.3} = Z_{НИОКР} + K_{ОСВ},$$

где $K_{ОСВ}$ – затраты на освоение производства и доработку опытных образцов, редакцию технической документации. $K_{ОСВ}$ принимаются в размере 20 % от суммарной стоимости годового объема выпуска продукции.

$$K_{ОСВ} = 0,2(n \cdot C_{II}) = 0,2(100 \cdot 121000) \approx 2420000 \text{ руб.},$$

тогда:

$$K_{III.3} = 1210000 + 2420000 = 3630000 \text{ руб.}$$

Оборотные средства принимаются в размере 10 % от себестоимости среднегодового выпуска продукции:

$$K_{OC} = 0,1(n \cdot C_{II}) = 0,1(100 \cdot 121000) = 1210000 \text{ руб.}$$

Таким образом, первичные капиталовложения составляют:

$$K_{\Pi} = K_{\text{III.3}} + K_{\text{OC}} = 3630000 + 1210000 = 4840000 \text{ руб.}$$

Соответственно, для реализации проекта необходима сумма порядка $K_K = 4,85 \text{ млн руб.}$

Рассмотрим 3 возможных варианта эффективности проекта:

- 1) с привлечением инвестиций за счет кредитных средств при существующей ключевой ставке Центрального Банка;
- 2) с привлечением инвестиций за счет кредитных средств при оптимистичном среднесрочном прогнозе величины ключевой ставки Центрального Банка;
- 3) за счет собственных средств.

1-й вариант.

Для оценки эффективности проекта необходимо учесть источники инвестиций. Соответственно, для организации производства предусматриваем использование собственных средств в размере 1 млн рублей под 8,9 % годовых (8,9 % - уровень инфляции [121]) и кредитных средств в размере оставшейся суммы, то есть 3,85 млн рублей под 29 % годовых.

Далее для оценки эффективности проекта определены индекс рентабельности PI, дисконтированный период окупаемости DPP, внутренняя норма доходности IRR, чистый дисконтированный доход NPV.

Чистый дисконтированный доход с учетом всех положительных и отрицательных денежных потоков проекта определяется по формуле:

$$NPV = \sum_{m=1}^n \frac{\Pi_m}{(1+E)^m} - \sum_{m=1}^n \frac{K_m}{(1+E)^m}, \quad (4.3)$$

где Π_m – чистая прибыль, получаемая на m -том шаге; E – норма дисконта; K_m – капитальные вложения на m -том шаге.

Экономические показатели и денежные потоки проекта рассчитаны по методике В.В. Прохорова с использованием таблиц Excel [112]. Средневзвешенная стоимость капитала по первому варианту расчета экономической эффективности показана на рисунке 4.9 и в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Средневзвешенная стоимость капитала при уровне ключевой ставки 16 %

Источник средств	Сумма	Стоимость, % годовых	Налоговый щит 1-есть, 0-нет	Доля от общей суммы инвестиций	Взвешенная стоимость, % годовых	Взвешенная стоимость с учетом щита
Собственные средства	1 000 000,00	8,9%	0	20,62%	1,84%	1,84%
Банк А	3 850 000,00	27,00%	1	79,38%	21,43%	17,15%

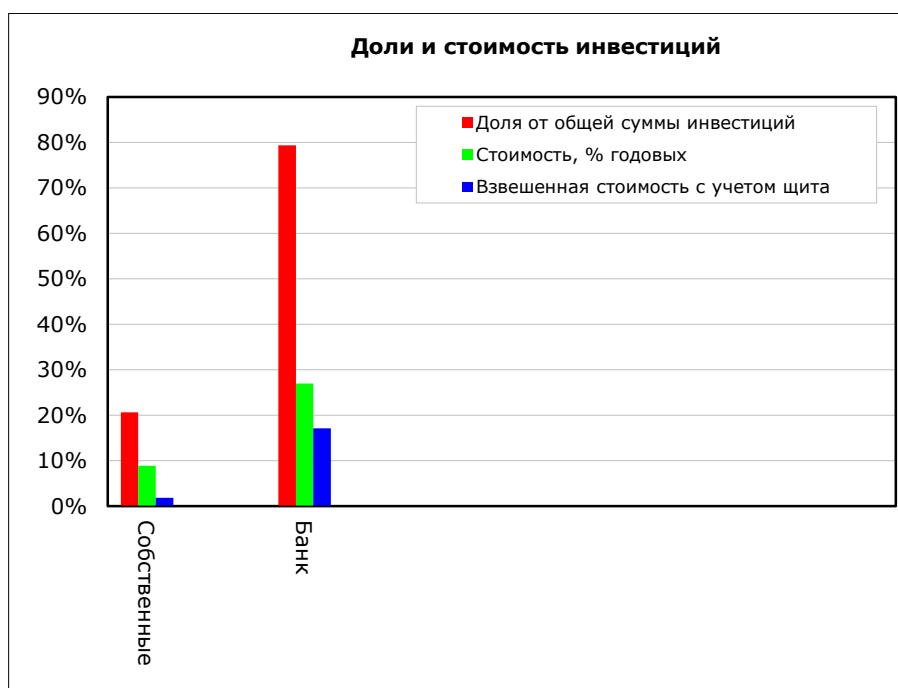


Рисунок 4.9 – Доли и стоимость инвестиций при уровне ключевой ставки 16,0 %

Главными факторами, влияющими на финансовый результат деятельности предприятия, являются затраты на производство и объем продаж. Спрогнозированный объем продаж анализировался с точки зрения спроса и объема производства. На 100 % уровень продаж предприятие выходит на 4-й год производства ВЭУ (1-й год – организационные и наладочные мероприятия, 2-й год – 70 % уровень продаж, 3-й год – 90 % уровень продаж). Интервал планирования равен одному году, период – 16 лет, что позволяет оценить инвестиционный проект в долгосрочной перспективе. При расчете чистой прибыли ставка налога на прибыль составляет 20 %.

Расчет денежного потока по шагам нарастающим итогом приведен в Приложении Ж.

Расчет доходов и расходов по шагам (шаг – 1 год) приведен в Приложении И.

На рисунках 4.10 и 4.11 представлены графики денежного потока по шагам и нарастающим итогом для первого варианта расчета.

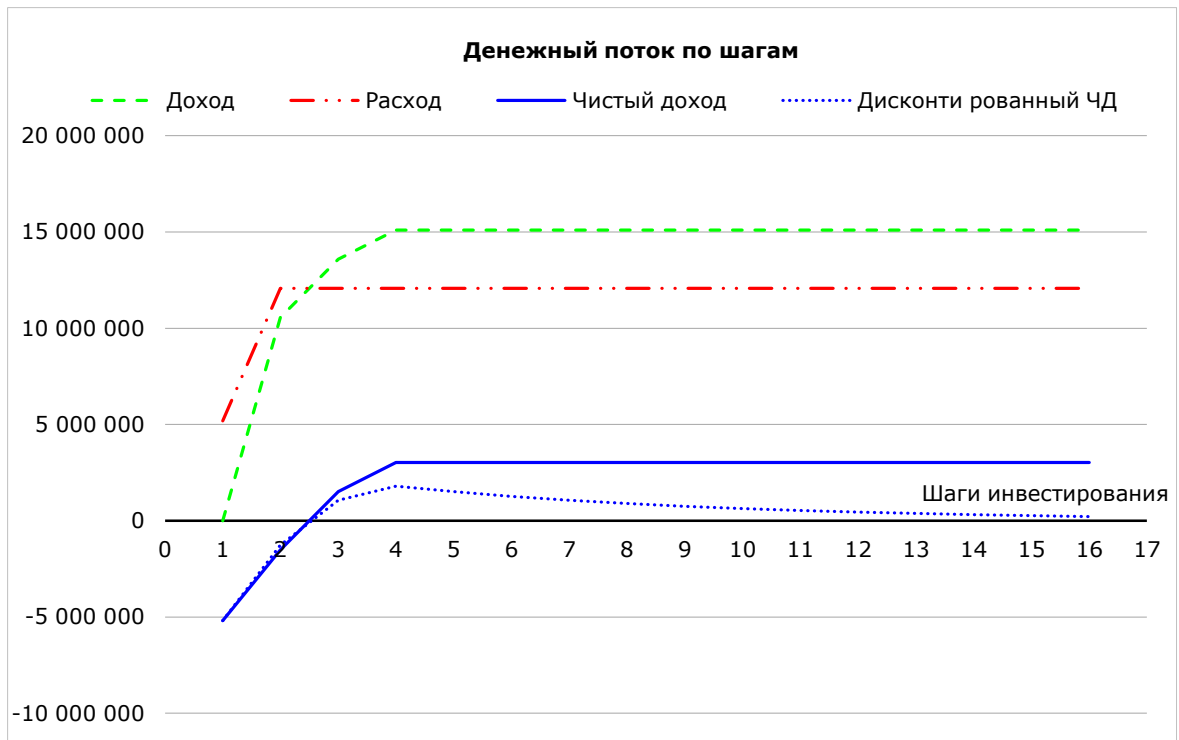


Рисунок 4.10 – Денежный поток по шагам при уровне ключевой ставки 16 %

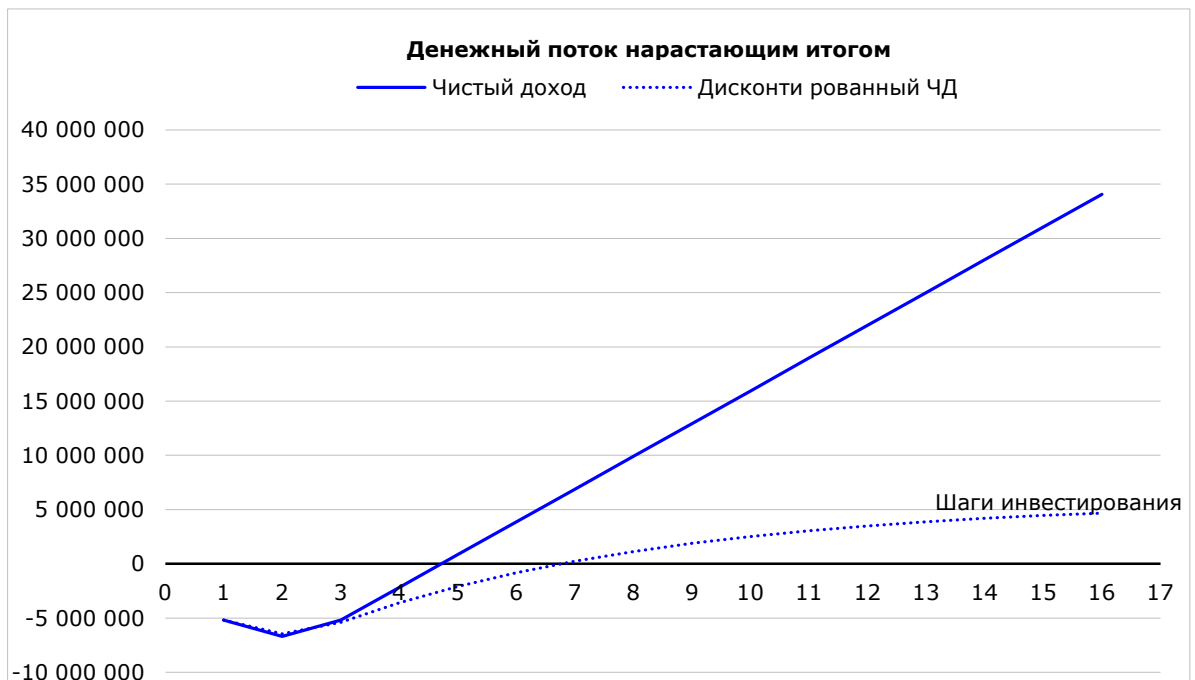


Рисунок 4.11 – Денежный поток по шагам с нарастающим итогом при уровне ключевой ставки 16 %

Показатели окупаемости проекта приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Показатели окупаемости проекта при привлечении кредитных средств и уровне ключевой ставки 16,0 %

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Величина
Ставка дисконтирования в годовом исчислении	D	%	18,98
Ставка реинвестирования в годовом исчислении для расчётов MIRR	-	%	22
Суммарные инвестиции	Inv	руб.	4850000,00
Минимальные суммарные инвестиции, рассчитанные по потоку платежей	InvMin	руб.	6690402,00
Максимальные суммарные инвестиции, рассчитанные по потоку платежей	InvMax	руб.	18766002,00
Чистый доход	ЧД	руб.	34073088,00
Чистый дисконтированный доход	NPV	руб.	4680571,20
Внутренняя норма доходности в годовом исчислении	IRR	%	31,21
Модифицированная внутренняя норма доходности в годовом исчислении	MIRR	%	25,23
$ROI = (\text{Чистый доход})/Inv$	ROI	%	702,54
$PI = NPV/Inv$ Индекс прибыльности	PI	%	96,51
Срок окупаемости	PBP	год	4,72
Дисконтированный срок окупаемости (лет)	DPBP	год	6,77

Так как величина NPV оказалась положительной, мы можем сделать вывод о том, что рассматриваемый проект эффективен, то есть принесет как минимум доходность, заложенную в ставке дисконтирования (18,98 %). То есть внутренняя норма доходности инвестиционного проекта превышает требуемый уровень доходности в 18,98 %. При расчете дисконтированного периода окупаемости (DPBP) ориентируются на «дисконтированный суммарный денежный поток нарастающим итогом». Таким образом, показатель дисконтированного периода окупаемости составил 6,77 лет (6 лет и 9 месяцев).

2-й вариант.

На основании среднесрочного прогноза Центрального Банка России ключевая ставка в будущем будет снижаться и в 2026 г. ее среднее значение за год составит 13,0 %-15,0 %, а в 2027-2028 годах будет в пределах 7,5 %-8,5 % [121]. В связи с этим процентная ставка по кредитам тоже будет снижаться. В этом случае произведем расчеты тех же экономических показателей проекта, но с учетом сниженных процентных ставок по кредитам. Доли привлекаемых средств остаются такими же, как в первом варианте. Средневзвешенная стоимость капитала по вто-

рому варианту расчета экономической эффективности показана на рисунке 4.12 и в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Средневзвешенная стоимость капитала при уровне ключевой ставки 7,5-8,5 %

Источник средств	Сумма	Стоимость, % годовых	Налоговый щит 1-есть, 0-нет	Доля от общей суммы инвестиций	Взвешенная стоимость, % годовых	Взвешенная стоимость с учетом щита
Собственные средства	1 000 000,00	4,00 %	0	20,62 %	0,82 %	0,82 %
Банк А	3 850 000,00	15,00 %	1	79,38 %	11,91 %	9,53 %

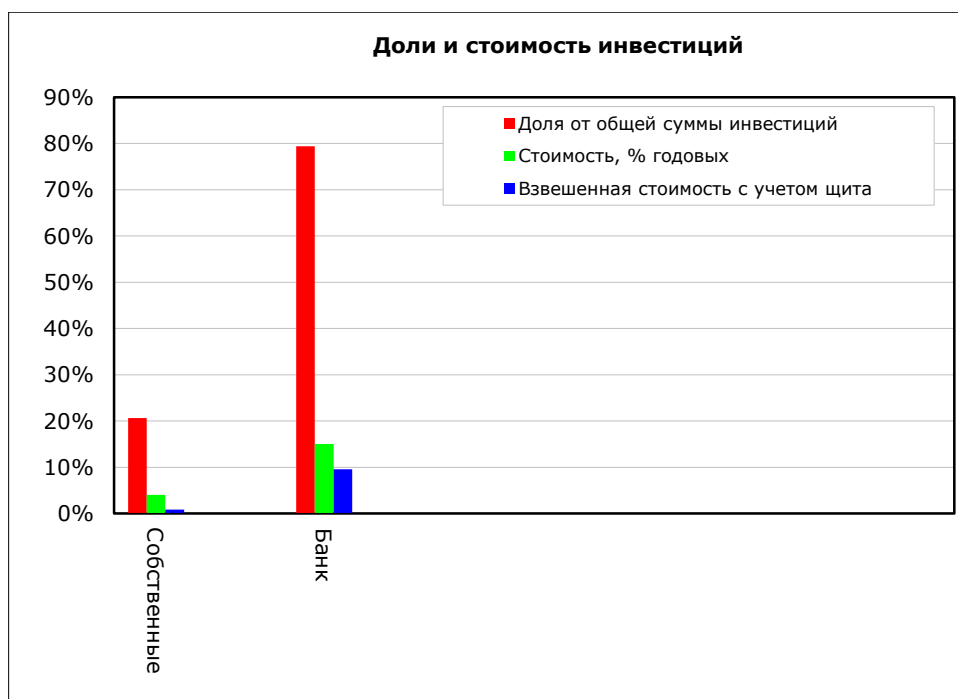


Рисунок 4.12 – Доли и стоимость инвестиций при уровне ключевой ставки 7,5-8,5 %

Объем продаж, интервал и период планирования принимаются такими же, как в первом варианте.

Расчет денежного потока по шагам нарастающим итогом приведен в Приложении К.

Расчет доходов и расходов по шагам (шаг – 1 год) совпадает с первым вариантом.

На рисунках 4.13 и 4.14 представлены графики денежного потока по шагам и нарастающим итогом для второго варианта расчета (при прогнозируемом уровне инфляции 4 % и уровне ключевой ставки 7,5-8,5 %).

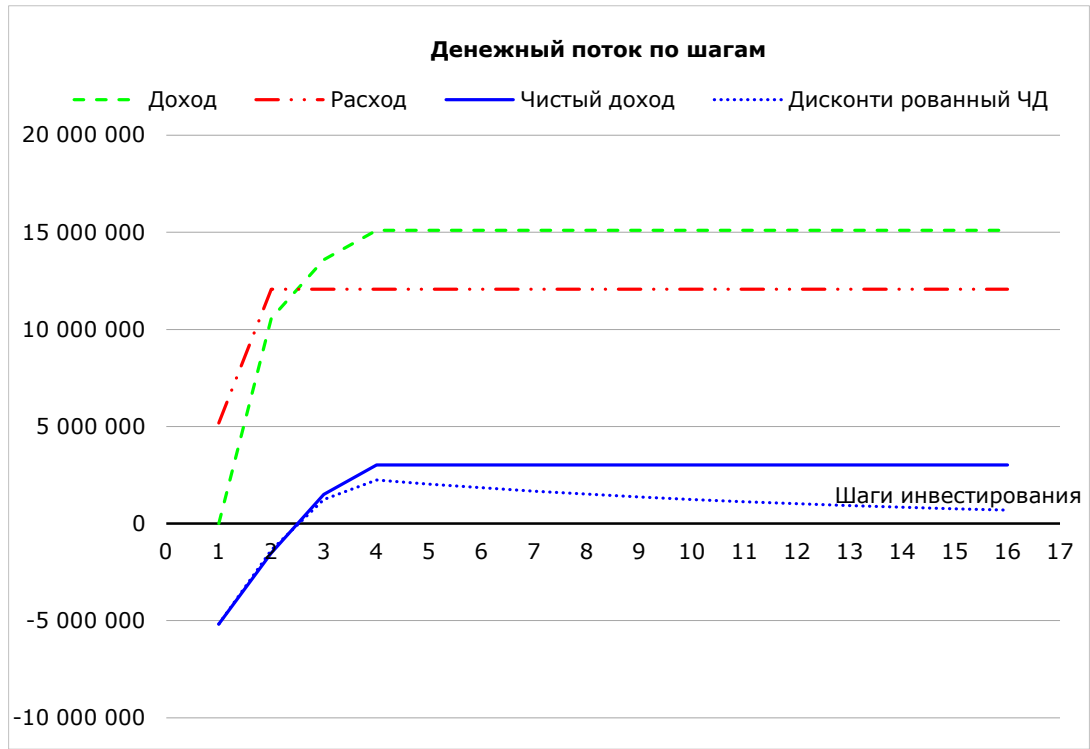


Рисунок 4.13 – Денежный поток по шагам при уровне ключевой ставки 7,5-8,5 %



Рисунок 4.14 – Денежный поток по шагам с нарастающим итогом при уровне ключевой ставки 7,5-8,5 %

Показатели окупаемости проекта при втором варианте расчета приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Показатели окупаемости проекта при привлечении кредитных средств и уровне ключевой ставки 7,5-8,5%

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Величина
Ставка дисконтирования в годовом исчислении	D	%	10,35
Ставка реинвестирования в годовом исчислении для расчётов MIRR	-	%	12
Суммарные инвестиции	Inv	руб.	4850000,00
Минимальные суммарные инвестиции, рассчитанные по потоку платежей	InvMin	руб.	6690402,00
Максимальные суммарные инвестиции, рассчитанные по потоку платежей	InvMax	руб.	18766002,00
Чистый доход	ЧД	руб.	34073080,00
Чистый дисконтированный доход	NPV	руб.	11989490,16
Внутренняя норма доходности в годовом исчислении	IRR	%	31,21
Модифицированная внутренняя норма доходности в годовом исчислении	MIRR	%	19,20
$ROI = (\text{Чистый доход})/Inv$	ROI	%	702,54
$PI = NPV/Inv$ Индекс рентабельность	PI	%	247,21
Срок окупаемости	PBP	год	4,72
Дисконтированный срок окупаемости (лет)	DPBP	год	5,56

Очевидно, что при уменьшенной ключевой ставке ЦБ и, соответственно, сниженных процентных ставках по кредитам, прибыльность проекта оказалась выше. При той же норме внутренней доходности в годовом исчислении 31,21 % ставка дисконтирования составляет 10,31 %. При этом чистый дисконтированный доход составил почти 12 млн рублей и срок окупаемости проекта снизился до 5 лет и 7 месяцев.

3-й вариант.

В этом варианте рассматривается вложение в проект собственных средств без привлечения сторонних инвестиций. Вложение этих средств в проект предполагается под 4% в годовом исчислении для исключения инфляционных потерь. Произведем расчеты тех же экономических показателей проекта. Средневзвешенная стоимость капитала по третьему варианту расчета экономической эффективности показана на рисунке 4.15.

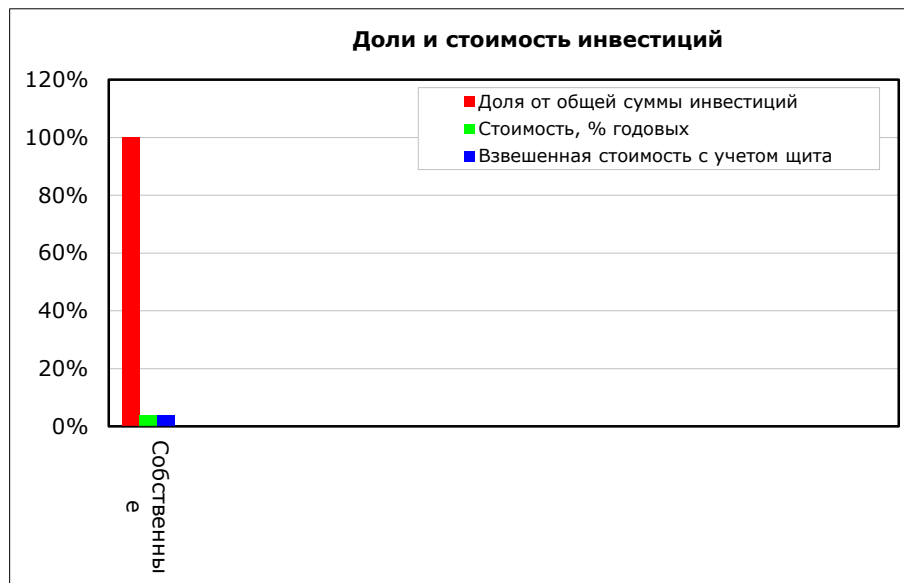


Рисунок 4.15 – Стоимость инвестиций при вложении собственных средств под 4% годовых
Объем продаж, интервал и период планирования принимаются аналогичными предыдущим вариантам.

Расчет денежного потока по шагам нарастающим итогом приведен в Приложении Л.

Расчет доходов и расходов по шагам (шаг – 1 год) совпадает с предыдущим вариантом.

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены графики денежного потока по шагам и нарастающим итогом.

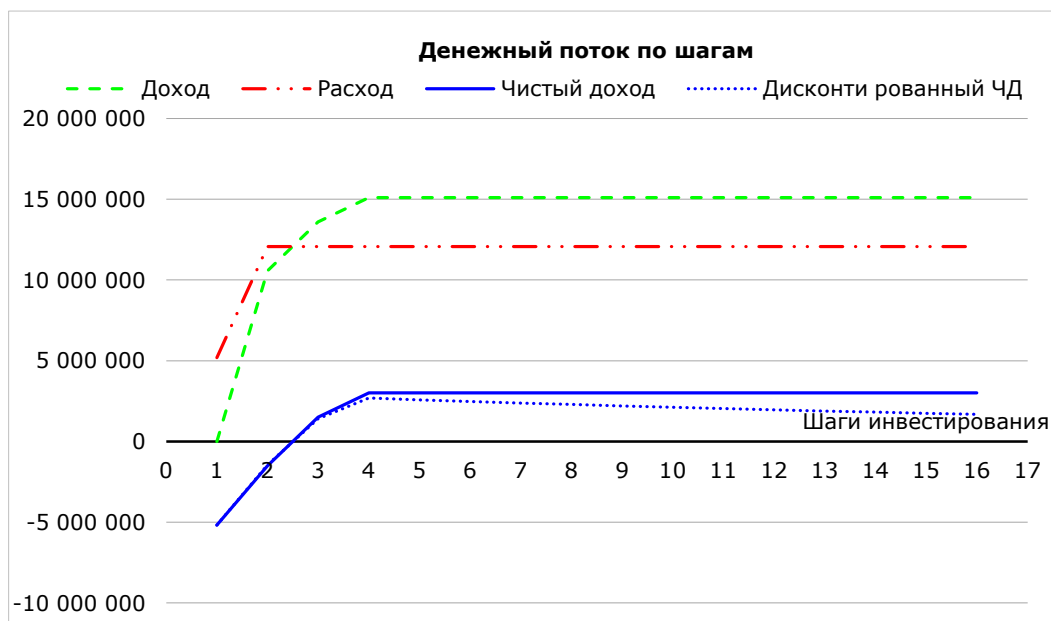


Рисунок 4.16 – Денежный поток по шагам при вложении собственных средств под 4% годовых

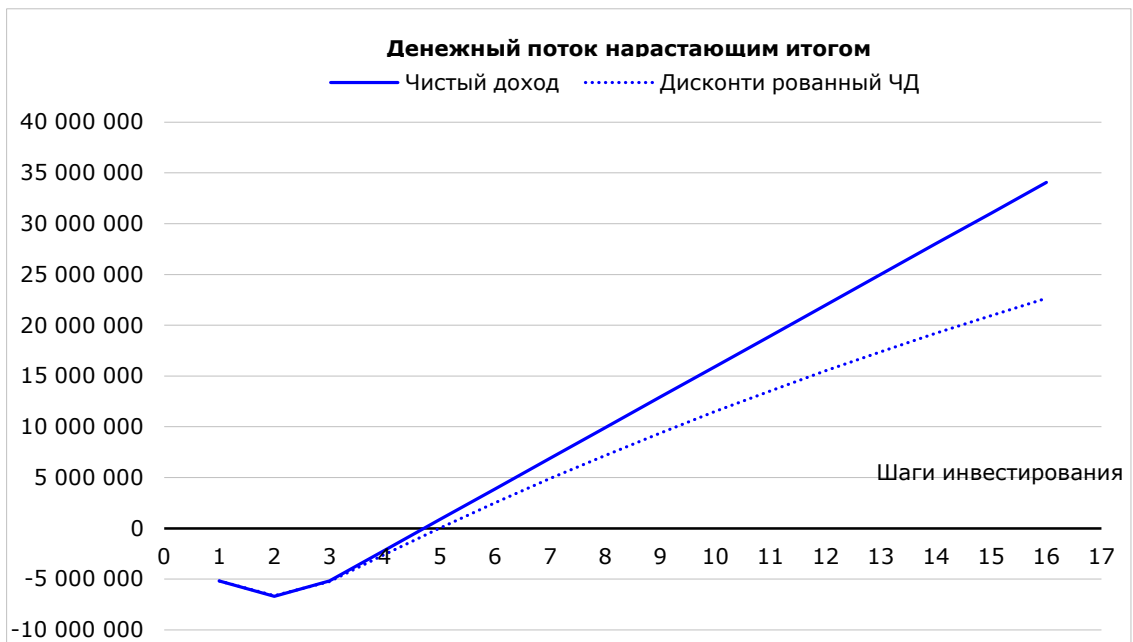


Рисунок 4.17 – Денежный поток по шагам с нарастающим итогом при вложении собственных средств под 4% годовых

Показатели окупаемости проекта третьего варианта расчета приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Показатели окупаемости проекта при вложении собственных средств под 4% годовых

Показатель	Условное обозначение	Единица измерения	Величина
Ставка дисконтирования в годовом исчислении	D	%	4
Ставка реинвестирования в годовом исчислении для расчётов MIRR	-	%	5
Суммарные инвестиции	Inv	руб.	4850000,00
Минимальные суммарные инвестиции, рассчитанные по потоку платежей	InvMin	руб.	6690402,00
Максимальные суммарные инвестиции, рассчитанные по потоку платежей	InvMax	руб.	18766002,00
Чистый доход	ЧД	руб.	34073088,00
Чистый дисконтированный доход	NPV	руб.	22640616,23
Внутренняя норма доходности в годовом исчислении	IRR	%	31,21
Модифицированная внутренняя норма доходности в годовом исчислении	MIRR	%	15,33
ROI = (Чистый доход)/Inv	ROI	%	702,54
PI = NPV/Inv Индекс рентабельность	PI	%	466,82
Срок окупаемости	PBP	год	4,72
Дисконтированный срок окупаемости (лет)	DPBP	год	4,99

При вложении собственных средств под 4 % годовых доходность проекта оказалась наивысшей из рассмотренных вариантов. При той же норме внутренней

доходности в годовом исчислении 31,21 % ставка дисконтирования составила 4 %. При этом чистый дисконтированный доход составил 22,64 млн рублей, а срок окупаемости проекта снизился до 5 лет.

4.4 Выводы по четвертой главе

Для подтверждения результатов теоретических исследований были проведены эксперименты по:

- проверке адекватности предложенного способа учета нелинейности магнитных свойств магнитопровода АГ;
- проверке валидности математических моделей стабилизации напряжения путем дискретного и плавного регулирования тока возбуждения.

1. Эксперимент, проведенный на АГ показал, что предложенный учет насыщения магнитной системы с её разделением на три зоны дает отклонение теоретических данных от экспериментальных не более 5 % в расчетных и реальных вольтамперных характеристиках.

2. Для подтверждения результатов математического моделирования был разработан испытательный стенд и проведены экспериментальные исследования. При дискретном регулировании тока возбуждения без стабилизации выходного напряжения АГ сравнение полученных теоретических и экспериментальных данных показало, что среднеквадратическое отклонение составило 0,698 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 0,585 В или 0,267 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил -0,32; +0,33 В. При введении стабилизации выходного напряжения АГ в эксперимент и математическую модель среднеквадратическое отклонение составило 1,13 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 1,02 В или 0,464 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил -0,56; +0,51 В, а отклонение напряжения от заданного составило не более 5 В.

Сопоставление результатов математического моделирования и экспериментальных исследований при плавном регулировании тока возбуждения при отсут-

ствии стабилизации показало, что среднеквадратическое отклонение составило 0,86 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 0,72 В или 0,33 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил -0,12; +0,69 В. При введении стабилизации выходного напряжения АГ в эксперимент и математическую модель среднеквадратическое отклонение составило 0,568 В, при этом среднее абсолютное отклонение равно 0,475В или 0,216 %. При уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил -0,3; +0,23 В, а отклонение напряжения от заданного составило не более 1,3 В.

3. Расчет эффективности постановки ВЭУ с разработанным стабилизатором на серийное производство при выпуске 100 штук в год проведен для 3-х вариантов привлечения средств на первичные капиталовложения: при существующей ключевой ставке ЦБ РФ, при оптимистичном среднесрочном прогнозе величины ключевой ставки и за счет собственных средств. Во всех трех случаях интервал планирования составлял 1 год, период – 16 лет, что позволило оценить инвестиционный проект в долгосрочной перспективе. Экономические показатели и денежные потоки проекта рассчитывались по методике В.В. Прохорова [112].

В первом варианте ЧДД составил 4680 тыс. рублей при сроке окупаемости 6 лет и 9 месяцев. Во втором варианте ЧДД составил 11989 тыс. рублей при сроке окупаемости проекта 5 лет и 7 месяцев. В третьем варианте ввиду использования собственных средств ЧДД оказался самым высоким и составил 22640 тыс. рублей при сроке окупаемости проекта 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие научные результаты:

1. Получены критерии возникновения режима устойчивого самовозбуждения АГ при линейной характеристике магнитной системы, когда выходное напряжение ограничено мощностью приводного двигателя, и показана необходимость учета нелинейности характеристики для корректного анализа процессов стабилизации напряжения АГ.

2. Предложен способ учета насыщения магнитной системы АГ с применением расчетной функции изменения магнитной связи между обмотками для разработки математической модели АГ, позволяющей анализировать процессы в системе «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка».

3. Разработаны математические модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка», позволяющие анализировать параметры переходных и установившихся процессов в системе при дискретном и плавном регулировании тока возбуждения АГ и показывающие преимущество плавного регулирования тока.

4. На основе разработанного алгоритма решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты 5-го порядка в модификации Фельберга модели системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» определены параметры и режимы работы ВЭУ. Установлено, что стабилизация напряжения путем плавного регулирования тока возбуждения является более эффективной по сравнению с дискретным изменением емкости за счет того, что при диапазонах изменения скорости ветра 6,5-11,5 м/с обеспечивает более узкий диапазон выходного напряжения в пределах ± 2 В в сравнении с дискретным регулированием, где диапазон составляет ± 5 В при шаге регулирования емкости возбуждения 0,25 мкФ, а также ограничивает скорость вращения ротора АГ диапазоном 2700-3750 об/мин за счет демпфирования части избыточной мощности регулировочным резистором по сравнению с дискретным регулированием тока, при котором ско-

рость составляет 2900-4500 об/мин, создавая риск выхода ВЭУ в недопустимый режим работы.

5. Разработаны функциональная и принципиальная электрические схемы стабилизатора напряжения ВЭУ с плавным регулированием тока возбуждения (патент на изобретение РФ № 2724622) на базе микроконтроллера ATmega 328p, а также алгоритм работы системы управления.

6. Изготовлена экспериментальная установка с АГ на базе АД марки 4A100S4Y3 с приводным ДПТ марки П-31, на которой получены осциллограммы выходного напряжения АГ при изменении скорости приводного двигателя в режимах без стабилизации и со стабилизацией выходного напряжения АГ. Сопоставление результатов математического моделирования и экспериментальных исследований показало, что различия между ними статистически незначимы: при дискретном регулировании тока возбуждения отклонение экспериментальных значений от расчетных составило не более 2,3 В в абсолютном выражении и 1,01 % в относительном и при уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил $-0,56; +0,51$ В, а отклонение напряжения от заданного составило не более 5,0 В; при плавном регулировании тока возбуждения отклонение экспериментальных значений от расчетных составило не более 1,1 В в абсолютном выражении и 0,503 % в относительном и при уровне значимости $p = 0,05$ доверительный интервал для средней разности составил $-0,3; +0,23$ В, а отклонение напряжения от заданного составило не более 1,3 В.

7. Выполнена оценка экономической эффективности серийного производства ВЭУ с предложенным стабилизатором. Установлено, что при объеме выпуска 100 штук в год ЧДД составит от 4680 до 22640 тыс. рублей при сроках окупаемости проекта 5-7 лет.

Рекомендации производству

Для разработки и серийного выпуска энергоэффективных ВЭУ малой мощности на базе АГ с разработанным стабилизатором напряжения, предназначенных для электроснабжения рассредоточенных потребителей АПК, необходимо ис-

пользовать функциональную и принципиальную электрическую схемы предложенного стабилизатора напряжения как базовое, патентно-защищенное решение, обеспечивающее плавную стабилизацию выходного напряжения.

Проектным и монтажным организациям, занимающимся созданием АСЭ для сельского хозяйства, целесообразно включать предлагаемую ВЭУ с АГ и стабилизатором напряжения в качестве рекомендуемого источника энергии для МФХ и ЛПХ. Это повысит надежность электроснабжения технологических процессов (обогрев молодняка, водоподъем), улучшит условия труда и, как следствие, рентабельность животноводства.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование технико-экономических и эксплуатационных характеристик как всей ВЭУ, так и ее ключевых функциональных элементов.

Совершенствование системы стабилизации и управления:

Необходимо продолжить исследования по интеграции в контроллер алгоритмов управления балластной активной нагрузкой (ТЭНами) для утилизации избыточной энергии на технологические нужды (подогрев воды, отопление) и создания дополнительного демпфирующего момента на валу АГ.

Целесообразна разработка адаптивных алгоритмов управления, самонастраивающихся под параметры конкретного экземпляра ВЭУ с АГ.

Перспективным направлением является создание на базе разработанной ВЭУ гибридных энергокомплексов «ветро-дизель» или «ветро-солнце» с единой системой управления, обеспечивающей приоритетное использование возобновляемой энергии.

Конструктивные и схемные решения стабилизатора применимы для систем стабилизации напряжения в других типах автономных генераторных установок (на базе двигателей внутреннего сгорания, микро-ГЭС).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев, И.И. Асинхронный генератор с гарантированным самовозбуждением / И.И. Алиев, В.Я. Беспалов, Р.О. Чернов // Электротехника. – 1999. – №9. – С. 53–55.
2. Алиев, И.И. Особенность работы асинхронного генератора с гарантированным самовозбуждением в автономных источниках электроснабжения при индуктивной нагрузке / И.И. Алиев, Р.О. Чернов // Энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ВИЭСХ, 2000. – С. 448–454.
3. Алиев, И.И. Переходные режимы асинхронного генератора с гарантированным самовозбуждением при симметричной нагрузке / И.И. Алиев, В.Я. Беспалов, Р.О. Чернов // Электротехника. – 1999. – №9. – С. 53–55.
4. Амерханов, Р. А. Ветро-солнечные электростанции фермерских хозяйств / Р. А. Амерханов, А. В. Квитко, А. А. Азарян // Сельский механизатор. – 2023. – № 12. – С. 2–3. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-12-2-3-7.
5. Андреев, Р. В. Ветроэнергетическая установка для автономного электротехнического комплекса малой мощности / Р. В. Андреев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 4(207). – С. 49–60.
6. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора / Н. И. Богатырев, В. Н. Ванурин, А. С. Креймер, П. П. Екименко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2010. – № 59. – С. 184–210.
7. Баль, В. Б. Математическое моделирование индукторной машины с учётом насыщения магнитной цепи / В. Б. Баль, Т. А. Тан // Электричество. – 2014. – № 6. – С. 34–37.
8. Баракин, Н.С. Параметры обмотки статора и режимы асинхронного генератора, повышающие качество электроэнергии для питания электрооборудования почвенно-экологической лаборатории: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Баракин

Николай Сергеевич. – Краснодар, 2014. – 191 с.

9. Бесконтактные генераторы в автономных системах электроснабжения / А. С. Оськина, А. В. Квитко, А. Ю. Попов, А. М. Хмелевский // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 29. – С. 183–186.

10. Богатырев, Н.И. Обоснование источников резервного и автономного электроснабжения с асинхронными генераторами / Н.И. Богатырев // Энерго- и ресурсосберегающие технологии и установки: материалы 4-й Южнорос. науч. конф. Т. 1. – Краснодар: КВАИ, 2005. – С. 104 – 108.

11. Богдан, А. В. Устойчивое самовозбуждение асинхронного генератора без насыщения его магнитной системы / А. В. Богдан, В. А. Богдан, А. В. Квитко // Сельский механизатор. – 2022. – № 2. – С. 34–36.

12. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

13. Бутузов, В. А. Российская ветроэнергетика / В. А. Бутузов, П. П. Безруких, С. В. Грибков // Энергетик. – 2021. – № 5. – С. 24–35.

14. Ванурин, В.Н. Электрические машины: учебник для вузов / В.Н. Ванурин. – М.: Колос, 1995.–256с.

15. Ветрогенератор: защита от сильного ветра своими руками [Электронный ресурс]. – URL : <https://energo.house/veter/vetrogenerator-ot-silnogo-vetra.html>(Дата обращения 22.02.2026).

16. Ветрогенераторы для дома [Электронный ресурс]. – URL: <https://yashel.shop/collection/vetrogenerator> (Дата обращения 15.02.2026).

17. Ветрогенераторы в Краснодаре [Электронный ресурс]. – URL: <https://krasnodar.rosvetrogenerator.ru> (Дата обращения 15.02.2026).

18. Ветроэлектрические станции / А. В. Квитко, О. В. Григораш, А. Ю. Попов [и др.]. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – 192 с.

19. Военцов, Д. В. Классификация и основные требования к ветроэлектрическим установкам / Д. В. Военцов, А. В. Квитко, В. В. Алмазов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 39. – С. 143–147.

20. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo.ru> (Дата обращения 15.02.2026).

21. Возобновляемые источники электроэнергии: термины, определения, достоинства и недостатки / О.В.Григораш, Ю.П.Степура, А.Е.Усков, А.В.Квитко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 32. – С. 189–192.

22. Востребованность возобновляемых источников энергии / Р. А. Амерханов, Д. П. Харченко, А. В. Квитко, В. И. Таразанов // Сельский механизатор. – 2023. – № 11. – С. 19–21. – DOI 10.47336/0131-7393-2023-11-19-20-21.

23. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

24. Глубинные насосы для скважин 220 В [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vseinstrumenti.ru/tag-page/glubinnye-nasosy-dlya-skvazhin-220-v-98406/?asc=asc&orderby=price>(Дата обращения 14.02.2026).

25. ГОСТ 7217-87-2003 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – Введ. 01.01.1988. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987 – 38 с.

26. ГОСТ Р54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.01.2013. – М.: Технический комитет по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств», 2010 – 15 с.

27. Грибков, С. В. Электрические генераторы для ветроустановок / С. В. Грибков // Малая энергетика. – 2014. – № 1–2. – С. 102–106.

28. Грибков, С. В. Модульные вертикально-осевые ветроустановки турбинного типа. Особенности построения на их основе многомодульных вертикально-осевых ветроустановок / С. В. Грибков // Новое в российской электроэнергетике. – 2021. – № 6. – С. 6–15.

29. Григораш, О. В. К вопросу стабилизации напряжения возобновляемых

источников электроэнергии / О. В. Григораш, А. В. Квитко, В. И. Таразан // Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 31 марта 2023 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Манускрипт», 2023. – С. 197–199.

30. Григораш, О. В. Малая энергетика России: состояние и перспективы / О. В. Григораш, А. В. Квитко // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы : Материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 15–16 июня 2023 года. – Краснодар: ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ-филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2023. – С. 63–67.

31. Григораш, О.В. Расчет мощности и выбор элементов ветроэлектрической установки / О.В. Григораш, А.В. Квитко, Т.А. Сторожук // Труды Кубанского государственного университета. – 2013. – № 43. – С. 300–303.

32. Григораш, О.В. Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края / О.В.Григораш, А.А.Хамула, А.В.Квитко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92(08). – С. 630–641.

33. Григораш, О. В. Стабилизаторы напряжения и частоты тока ветроэлектрических установок на непосредственных преобразователях частоты / О. В. Григораш, А. В. Квитко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92. – С. 589–617.

34. Григораш, О. В. Стабилизатор напряжения и частоты ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, А. В. Квитко, Ю. М. Петренко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2010. – № 26. – С. 140–143.

35. Григораш, О. В. Энергоэффективные автономные системы электроснабжения на ветроэнергетических установках : монография / О. В. Григораш, А. В. Квитко. – Краснодар : КубГАУ, 2021. – 167 с.

36. Григораш, О. В. Энергоэффективный стабилизатор параметров электроэнергии бесконтактного генератора ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, А. В. Квитко, Е. А. Власенко // Технические и технологические системы : Материалы тринадцатой Международной научной конференции, Краснодар, 23–25 ноября 2022 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Дом – Юг», 2022. – С. 198–199.

37. Джендубаев, А.-З. Р. К определению границ области устойчивого самовозбуждения асинхронного генератора с двумя обмотками статора / А.-З. Р. Джендубаев // Электричество. – 1993. – № 10. – С. 28–33.

38. Джендубаев, А.-З. Р. Математическая модель асинхронного генератора с учетом потерь в стали / А.-З. Р. Джендубаев // Электричество. – 2003. – № 7. – С. 36–45.

39. Джендубаев, З. Р. Схемы замещения асинхронной машины с двумя старторными обмотками / З. Р. Джендубаев, Л.Я. Шапиро // Электричество. – 1993. – № 10. – С. 71–74.

40. Домбровский, В.В. Асинхронные машины. Теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.М. Зайчик. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.

41. Ежегодник по племенной работе в овцеводстве и козоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2024 год) [Электронный ресурс]. – URL: <https://vniiplem.ru/wp-content/uploads/2025/07/Ежегодник.Овцеводство.Козоводство.2025.pdf?ysclid=mlpwzd0lu1794850086> (Дата обращения 17.02.2026).

42. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / Под ред. Л. А. Жукова. – М., Энергия, 1979. – 456 с.

43. Змитрович, В.С. Усовершенствованная система автоматической стабилизации напряжения асинхронного генератора переносной бензоэлектрической станции / В.С. Змитрович, Н.И. Богатырев // Использование электроэнергии для автоматизации основных производственных процессов сельского хозяйства. – (Тр. / Куб. СХИ; Вып. 166 (194). – Краснодар, 1978. – С. 10–15).

44. Зубков, Ю. Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением / Ю. Д. Зубков ; Акад. наук Казах. ССР. – Алма-Ата : Изд-во и тип. Акад. наук Каз. ССР, 1949 (Ленинград : тип. Западугля). – 112 с.

45. Зубков, Ю.Д. Режим холостого хода асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением / Ю.Д. Зубков // Изв. АН КазССР. Сер. Энергетика: Вып. 3. – Алма-Ата, 1950. – С. 62–74.

46. Ильченко, Я.А. Асинхронный генератор с улучшенными эксплуатационными характеристиками для электротехнологических установок при производстве прудовой рыбы: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Ильченко Яков Андреевич. – Краснодар, 2012. – 162 с.

47. Интегрированная система электропитания с применением ВИЭ для децентрализованных потребителей / Н. И. Богатырев, Е. А. Денисенко, А. В. Квитко, В. А. Пархоменко // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 12(318). – С. 39–41. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-12-39-41.

48. Казовский, Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – Л.: Изд. АН СССР, 1962. – 626 с.

49. Квитко, А. В. Автономные ветроэлектрические установки и системы / А. В. Квитко, Я. А. Семенов, Г. С. Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 112. – С. 1003–1015.

50. Квитко, А. В. Ветроэнергетические станции: перспективы и структурно-схемные решения : монография / А. В. Квитко, О. Я. Ивановский. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 110 с.

51. Квитко, А. В. Генераторы для ветроэлектрических установок / А. В. Квитко // Итоги научно-исследовательской работы за 2017 год : сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции преподавателей, Краснодар, 14 марта 2018 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. – С. 603–604.

52. Квитко, А. В. Генераторы электроэнергии автономных систем электрообеспечения / А. В. Квитко, Ю. В. Черненко, И. В. Пацыров // Роль и значение нау-

ки и техники для развития современного общества : сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Уфа, 15 октября 2017 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. – С. 43–45.

53. Квитко, А. В. Генераторы электроэнергии ветроэлектрических установок и способы стабилизации их напряжения / А. В. Квитко, А. О. Хицкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 98. – С. 255–269.

54. Квитко, А. В. К вопросу классификации и основные требования к проектированию ветроэлектрических установок / А. В. Квитко, А. А. Гончаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 593–605.

55. Квитко, А. В. К вопросу стабилизации напряжения бесконтактных генераторов электроэнергии / А. В. Квитко, М. А. Попучиева, Р. А. Тхаркахо // Роль и значение науки и техники для развития современного общества : сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Уфа, 15 октября 2017 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. – С. 41–43.

56. Квитко, А. В. Малая ветроэнергетика в сельском хозяйстве / А. В. Квитко // Год науки и технологий 2021 : сб. тез.по материалам Всероссийской научно-практической конференции / отв. за вып. А. Г. Коцаев. 09–12 февраля 2021 г. – Краснодар: КубГАУ, –2021. – С. 137–138.

57. Квитко, А. В. О причинах, определяющих необходимость применения возобновляемых источников энергии / А. В. Квитко, М. А. Попучиева // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 4–2(75). – С. 136–138.

58. Квитко, А. В. Особенности проектирования ветроэнергетических станций : монография/ А. В. Квитко, А. А. Азарян. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – 112 с. – ISBN 978-5-6047401-8-7.

59. Квитко, А. В. Особенности работы и перспективы ветроэлектрических

станций / А. В. Квитко, А. А. Гончаров // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике. – 2016. – № 1(7). – С. 196.

60. Квитко, А. В. Оценка перспективы применения ветроэнергетических установок в России / А. В. Квитко, А. Д. Сидоренко // Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества : сборник научных статей по итогам круглого стола со всероссийским и международным участием, Москва, 15–16 сентября 2021 года. Том №5. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «КОНВЕРТ», 2021. – С. 22–23.

61. Квитко, А. В. Перспективы роторных ветроэнергетических установок / А. В. Квитко, А. А. Азарян // Интеграция наук –2024 : Материалы V Международной научно-практической конференции, Краснодар, 29 июля 2024 года. – Краснодар: ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ– филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2024. – С. 168–172.

62. Квитко, А. В. Расчёт мощности и выбор основных функциональных узлов ветроэлектрической установки / А. В. Квитко, А. А. Гончаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 98. – С. 429–456.

63. Квитко, А. В. Ресурсы возобновляемых источников энергии Краснодарского края / А. В. Квитко, А. Д. Сидоренко, А. А. Гончаров // Геоэнергетика – 2019 : Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции, Грозный, 06–07 ноября 2019 г. / Под редакцией М.Ш. Минцаева. – Грозный: НПП «Геосфера», 2019. – С. 123–128.

64. Квитко, А. В. Стабилизатор напряжения и частоты ветроэнергетической установки / А. В. Квитко // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Саратов: Издательство «КУБиК», 2011. – С. 143–144.

65. Квитко, А. В. Стабилизатор напряжения и частоты тока генератора ветроэнергетической установки / А. В. Квитко, М. А. Калюта // Актуальные проблемы энергетики АПК : Материалы X национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 22 апреля 2019 г. / Под общ. ред. Трушкина

В.А. – Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2019. – С. 122–123.

66. Квитко, А. В. Удельная масса бесконтактных генераторов электроэнергии / А. В. Квитко // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе: материалы VI Российской научно-практической конференции. – Ставрополь: Ставропольское издательство «Параграф», 2011. – С. 57–59.

67. Квитко, А. В. Характеристики ветра, особенности расчёта ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики / А. В. Квитко, А. О. Хицкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 359–374.

68. Китаев, А.В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А.В. Китаев, И.Н. Орлов // Электричество. – 1978. – №4. – С. 47–51.

69. Кицис, С.И. Аналитическое определение магнитной характеристики асинхронного самовозбуждающегося генератора/ С.И. Кицис // Электромеханика: изв. вузов. – 1980. – № 6. – С. 597–605.

70. Кицис, С.И. Метод стабилизации выходного напряжения асинхронного самовозбуждающегося генератора/ С.И. Кицис, П.Л. Белоусов // Электромеханика: изв. вузов – 1991. – №5. – С. 50–53.

71. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика : для инженеров и науч. работников / А. И. Кобзарь ; А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. – 813 с.

72. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа. 1987. – 245 с.

73. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

74. Креймер, А.С. Теоретические положения создания систем автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с ВЭУ малой мощности: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Креймер Алексей Семенович. – Краснодар, 2003. – 194 с.

75. Кунцевич, П.А. Использование серийных асинхронных машин в генераторном режиме/ П.А. Кунцевич, Г.А. Прохорова // Электричество. – 1994. – № 6. – С. 45 – 49.

76. Лемешко, Б.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Руководство по применению : монография / Б. Ю. Лемешко. – Москва : ООО «Научно-издательский центр Инфра-М», 2023. – 353 с.

77. Лищенко, А.И. Дифференциальные уравнения и расчет переходных процессов асинхронного генератора с учетом насыщения/ А.И. Лищенко, В.А. Лесник, А.П. Фаренюк // Техн. электродинамика. – 1984. – № 1. – С. 37–42.

78. Лищенко, А.И. Автономный асинхронный генератор с емкостным возбуждением при работе на выпрямительную нагрузку: препринт–306/ А.И. Лищенко, В.А. Лесник, А.П. Фаренюк, ИЭД АН УССР. – Киев, 1983. – 59 с.

79. Лукутин, Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.

80. Методические рекомендации по технологическому проектированию овцеводческих объектов РД-АПК 1.10.03.02-12 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d75/4293787782.pdf?ysclid=lypqw2wddq1089885> (Дата обращения 15.02.2026).

81. Мнение: развитие овцеводства на Дону имеет большой потенциал [Электронный ресурс]. – URL: <https://rostov.rbc.ru/rostov/opinions/03/03/2023/6402007a9a7947e8363a7219#:~:text=Ростовская%20область%20имеет%20большой%20потенциал,сельскохозяйственных%20наук%20ДонГАУ%20Юрий%20Колосов> (Дата обращения 30.10.2025).

82. На Кубани запустили программу поддержки овцеводства [Электронный ресурс]. – URL: <https://msh.krasnodar.ru/news/common/s/common/e/278714> (Дата обращения 15.02.2026).

83. Насос погружной скважинный постоянного тока с питанием от солнечных батарей или АКБ [Электронный ресурс]. – URL:<https://оооводолей.рф/product-category/nasosy-pogruzhnye/nasosy-pogruzhnye-skvazhinnye/nasos-pogruzhnoj-skvazhinnyj-postoyannogo-toka-s-pitaniem-ot-solnechnyh-batarej-ili->

akb/?ysclid=lz5qwiafte636997162(Датаобращения 15.02.2026).

84. Национальный стандарт РФ. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 51991 – 2002. – Введ. 2003–07–01. – Режим доступа :<https://gostassistant.ru/doc/7d874f37-a3f1-4a48-87f5-40f0c11c4b07>.

85. Национальный стандарт РФ. Установки ветроэнергетические. Ч. 2. Технические требования к малым ветроэнергетическим установкам [Электронный ресурс] : ГОСТ 54418.2 – 2014. – Введ. 2016–07–01. – Режим доступа :<https://gostassistant.ru/doc/ad41fdf6-0a9e-4419-b5ad-1b76161d48f4>.

86. Национальный стандарт РФ. Электроэнергетика. Распределенная генерация. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 58491–2019. – Введ. 2020–01–01. – Режим доступа :<https://gostassistant.ru/doc/498b71b3-af7e-4945-834a-aa694ee1bc91>.

87. Нетушил, А.В. Автономный асинхронный генератор как нелинейная автоколебательная система/ А.В. Нетушил, В.С. Листвин // Электромеханика: изв. вузов. – 1977. – №5. – С. 506–511.

88. Никитенко, Г.В. Ветросолнечная система автономного электроснабжения / Г.В.Никитенко, Е.В.Коноплев, А.А.Лысаков // Сельский механизатор. – 2018. № 4. – С. 28–29.

89. Никитенко, Г. В. Генераторы, применяемые в ветроэнергетических установках / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, А. С. Сергиенко // Современные исследования как ответ на вызовы нового времени : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции электроэнергетического факультета, посвященной Дню Российской науки, Ставрополь, 07–11 февраля 2022 года. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2022. – С. 132-136.

90. Овцеводство поддержат по-новому. Новая программа должна учесть специфику развития отрасли на Северном Кавказе [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.agroinvestor.ru/markets/article/39871-ovtsevodstvo-podderzhat-po-novomu-novaya-programma-dolzhna-uchest-spetsifiku-razvitiya-otrasli-na-se/>(Дата обращения 15.02.2026).

91. Оптимизация структурно-схемного решения ветро-солнечной электро-

станции по основным критериям эффективности / Я. М. Кашин, Л. Е. Копелевич, А. В. Самородов [и др.] // Сельский механизатор. – 2025. – № 10. – С. 3-7. – DOI 10.47336/0131-7393-2025-10-3-4-5-6-7.

92. Оськина, А.С. Параметры и режимы асинхронных генераторов для питания электрифицированных инструментов, электротехнологических установок ив садах и виноградниках: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Оськина Анастасия Сергеевна. – Краснодар, 2007. – 138 с.

93. Оськин, С.В. Экономическое обоснование организационно-технических мероприятий в курсовых и дипломных проектах / С. В. Оськин, В. Я. Хорольский, О. А. Гончарова, А. И. Вандтке. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2008. – 108 с.

94. Официальный сайт Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – URL: <http://ssl.rosstat.gov.ru/> (Дата обращения 10.12.2025).

95. Патент № 2145767 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/46. Устройство для автоматического регулирования напряжения асинхронного генератора : № 98121646/09 : заявл. 24.11.1998 : опубл. 20.02.2000 / Богатырев Н. И., Зайцев Е. А., Павлов В. Н. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

96. Патент № 2313886 С1 Российская Федерация, МПК H02K 17/12, H02K 17/16. Асинхронный двухчастотный генератор : № 2006126911/09 : заявл. 24.07.2006 : опубл. 27.12.2007 / Стрижков И. Г., Потапенко И. А., Стрижков В. Л., Чеснюк Е. Н.; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

97. Патент № 2313889 С1 Российская Федерация, МПК H02K 47/26, H02K 47/24. Асинхронно-синхронный двухчастотный генератор : № 2006126910/09 : заявл. 24.07.2006 : опубл. 27.12.2007 / Стрижков И. Г., Потапенко И. А., Стрижкова Л. Г., Чеснюк Е. Н.; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

98. Патент № 2366071 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/46. Устройство для стабилизации частоты и напряжения автономных бесконтактных генераторов : № 2008130254/09 : заявл. 21.07.2008 : опубл. 27.08.2009 / Григораш О. В., Хамула А. А., Пыдык А. Н. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

ный университет.

99. Патент № 2373630 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/46, H02J 3/18. Устройство для регулирования и стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора : № 2008112368/09 : заявл. 31.03.2008 : опубл. 20.11.2009 / Богатырев Н. И., Баракин Н. С., Вронский А. В. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

100. Патент № 2443903 С2 Российская Федерация, МПК F03D 9/00, H02P 9/06, H02P 9/30. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки : № 2010119204/06 : заявл. 12.05.2010 : опубл. 27.02.2012 / Григораш О. В., Гарькавый К. А., Квитко А. В. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

101. Патент № 2479097 С2 Российская Федерация, МПК H02K 17/42, H02K 17/14. Автономный асинхронный генератор с четырехполусной статорной обмоткой : № 2011130617/07 : заявл. 21.07.2011 : опубл. 10.04.2013 / Богатырев Н. И., Ванурин В. Н., Лихачев В. Л. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

102. Патент № 2499352 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/06. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэлектрической установки : № 2012121218/07 : заявл. 23.05.2012 : опубл. 20.11.2013 / Григораш О. В., Квитко А. В., Сулейманов Р. А., Буторина Е. О.; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

103. Патент № 2516013 С2 Российская Федерация, МПК H02K 17/14, H02K 3/28. Многофункциональный автономный асинхронный генератор : № 2012107507/07 : заявл. 28.02.2012 : опубл. 20.05.2014 / Богатырев Н. И., Ванурин В. Н., Потешин М. И. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

104. Патент № 2516217 С2 Российская Федерация, МПК H02K 17/14, H02K 3/28. Вентильный автономный асинхронный генератор : № 2012107512/07 : заявл. 28.02.2012 : опубл. 20.05.2014 / Богатырев Н. И., Ванурин В. Н., Лихачев В. Л. [и др.] ; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

105. Патент № 2724622 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/30. Устройство стабилизации напряжения ветроэнергетической установки : № 2019141750 : заявл. 13.12.2019 : опубл. 25.06.2020 / Квитко А. В., Сидоренко А. Д., Гончаров А. А.; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

106. Патент № 2836736 С1 Российская Федерация, МПК F03D 9/00, H02S 10/12, F03D 7/00. Гибридный энергетический комплекс : заявл. 12.08.2024 : опубл. 20.03.2025 / Кашин Я. М.; заявитель заявитель Кубанский государственный технологический университет, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова.

107. Патент № 2839659 С1 Российская Федерация, МПК H02K 19/38, F03D 9/25. Автономная ветросолнечная генераторная установка : заявл. 18.11.2024 : опубл. 07.05.2025 / Кашин Я. М., Князев А. С., Ярьсько Н. Е.; заявитель Кубанский государственный технологический университет, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова.

108. Пиотровский, Л. М. Электрические машины : учебник для техникумов / Л.М. Пиотровский – 7-е изд., стер. – Ленинград : Энергия, 1974. – 504 с.

109. Погружные насосы постоянного тока [Электронный ресурс]. – URL: <https://aliexpress.ru/wholesale?SearchText=погружные+насосы+постоянного+тока&minPrice=10000&g=y&page=1&searchInfo=A3UQlaGPBRlGRneRXdTQDr8ykkEuZP9Z7k56cYPX%2Fag+cfSeC4azvSoPBbnIvymS4YJN7bmCnYENCAbqsFDcXBNt5kiD%2FugdZ13nLpOFLJKsplzl9+zefn7qPv7vKjdgCHzIxaY2NNopDBn9qi2MQRJgawE1jb8riA42hDrWOIIX8KeKQMtzfNy+yaYBSDKD+DsEw+R3oRv+W8aWiFrAIU2lzJeNL5wCTVrp4FqkdWNhlU4QOQlnTuZsOG16Wtdb4sfBrGQ%2F9DUphn6efBMD9MhnuOMn+UGmA6Yw2MqCPoUMQIbBOi0gb2FY6w2HbbZUmHbUW0vSxFyi3VQBLAqm%2Fto2Pdj6bBmJ8LW3zFzS%2FVPX94YKqVyCTTOKqw5OT8wyer+TiyUDsHdoOJ+D0boCcb9OSI%3D> (Дата обращения 15.02.2026).

110. Потребление баранины в России может вырасти – эксперты [Электронный ресурс]. – URL: <https://specagro.ru/news/202303/potreblenie-baraniny-v-rossii-mozhet-vyrasti-eksperty> (Дата обращения 17.02.2026).

111. Разведение овец на мясо с нуля [Электронный ресурс]. – URL: <https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/articles/k-nashim-baranam-biznes-s-nulja-na-ovсах> (Дата обращения 15.02.2026).

112. Расчет инвестиционных проектов [Электронный ресурс] // В. Прохоров - Экономические расчеты в Excel: Финансовый анализ, расчет финансовых показателей, финансовая математика, расчет инвестиций, расчет себестоимости. URL: <https://www.finances-analysis.ru/buy-xls-invest.htm> (Дата обращения: 17.02.2026).

113. РД 34.20.178. Методические указания по расчету электрических нагрузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. – введ. 1982.01.01. – М.: Минэнерго СССР, 2009 – 67 с.

114. Рекомендации по инфракрасному обогреву молодняка сельскохозяйственных животных и птицы [Электронный ресурс]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293845/4293845774.pdf?ysclid=lypqsjw84138370729> (Дата обращения 15.02.2026).

115. РТМ 36.18.32.4-92 Указания по расчету электрических нагрузок – Взамен М788-1068; введ. 1993.01.01. -М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 2002 – 9 с.

116. Сангов, Х.С. Разработка и исследование системы автоматического регулирования напряжения асинхронного генератора ветроэнергетической установки для автономного электротехнического комплекса малой мощности: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Сангов Хушдил Саидович. – М., 2019. – 20 с.

117. Сеницын, А.В. Асинхронный генератор на две частоты тока для мобильных установок сельскохозяйственного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Сеницын Андрей Васильевич. – Краснодар, 2008. – 170 с.

118. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.

119. Соболев, А.Н. Защита автономных асинхронных генераторов сельскохозяйственного назначения от витковых коротких замыканий: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Соболев Александр Николаевич. – Краснодар, 2010. – 153 с.

120. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и

местным видам топлива / Показатели по территориям. – М.: «ИАЦ Энергия», 2007. – 272 с.

121. Среднесрочный прогноз Банка России по итогам заседания Совета директоров по ключевой ставке 24 октября 2025 г. [Электронный ресурс]. – URL: https://cbr.ru/Content/Document/File/184551/forecast_251024.pdf (Дата обращения 16.02.2026).

122. Стрижков, И. Г. Математическое описание асинхронного генератора с разветвленной статорной обмоткой / И. Г. Стрижков, В. Н. Ванурин, Я. А. Ильченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 71. – С. 134–143.

123. Технические схемы ветровых энергоустановок [Электронный ресурс]. – URL: <https://ppt-online.org/270467> (Дата обращения 15.02.2026).

124. Технические характеристики машинки для стрижки овец, КРС и собак [Электронный ресурс]. –

URL: <https://volgaveter.ru/collection/zhivotnovodstvo/product/mashinka-strigalnaya-msu200> (Дата обращения 15.02.2026).

125. Технические характеристики машинки для стрижки овец с гибким валом ESA-2D [Электронный ресурс]. – URL: <http://aktubselmash.ru/clippers/esa-2d> (Дата обращения 12.12.2025).

126. Торопцев, Н.Д. Авиационные асинхронные генераторы / Н.Д. Торопцев. – М.: Транспорт, 1970. – 104 с.

127. Торопцев, Н. Д. Асинхронные генераторы автономных систем / Н. Д. Торопцев. – Москва : Знак, 1998. – 288 с.

128. Торопцев, Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения / Н.Д. Торопцев. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 215 с.

129. Удельная масса и предельная мощность бесконтактных генераторов электроэнергии / О. В. Григораш, А. Ю. Попов, А. В. Квитко, Д. В. Солодкий // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 29. – С. 198–202.

130. Уникальная бытовая техника отечественного производства [Электронный

ресурс]. – URL: <https://светлыйдом58.рф/mcy-200/> (Дата обращения 13.02.2026).

131. Фаренюк, А.П. Установившиеся и переходные режимы асинхронного генератора с емкостным возбуждением для автономных энергоустановок: автореф. дис. канд. техн. наук. / А.П. Фаренюк – Киев, 1984. – 23 с.

132. Фришман, В.С. Вопросы применения самовозбуждающихся асинхронных генераторов в сельском хозяйстве / В.С. Фришман. // Тр./ Куб. СХИ; Вып. 39 (67). – Краснодар, 1970. – С. 3–13.

133. Фришман, В.С. Проектирование автономных асинхронных генераторов / В.С. Фришман, Г.А.Прохорова, С.З. Эвентов // Электротехника. – 1986. – № 4. – С. 26–28.

134. Хицкова, А. О. Генераторы электроэнергии для возобновляемой энергетики / А. О. Хицкова, А. В. Квитко, Е. О. Буторина // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 45. – С. 246–249.

135. Шарафеддин, К. Ф. Разработка системы автоматического регулирования напряжения асинхронного генератора ветроэнергетической установки / К. Ф. Шарафеддин, С. А. Цырук, Х. С. Сангов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. Том 3. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 181–184.

136. Электронный учебный курс разработан для дисциплины «Возобновляемые источники энергии» для направления подготовки бакалавриата 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Раздел 4. Ветроэнергетика [Электронный ресурс]. – URL:

https://lms.kgeu.ru/pluginfile.php?file=%2F430457%2Fmod_resource%2Fcontent%2F2%2F%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%204.1%20%D0%92%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0.pdf (Дата обращения 09.06.2025).

137. Энергоэффективные и энергосберегающие автономные системы электро-снабжения на ветро-солнечных электростанциях для малых фермерских хозяйств :

монография / О.В. Григораш, Е.А. Денисенко, А.В. Квитко, Д.Н.Грищенко, П. М. Барышев. – Краснодар : КубГАУ, 2023. – 180 с.

138. AlaaEldien M. M. Hassan, Mahmoud A. Sayed, Essam E. M. Mohamed «Three-Phase Matrix Converter Based Sliding Mode Controller Applied to Wind Energy Conversion System with Wind Speed Estimation», *American Journal of Modern Energy*, 2(5). – pp. 22-30 [Электронный ресурс]. – URL: <https://sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ajme.20160205.11> (Дата обращения 09.02.2026).

139. Ahmed T., Nakaoka M. «Static VAR compensator-based terminal voltage control for stand-alone AC and DC outputted self-excited induction generator», *Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004)*, Edinburgh, UK, 2004, pp. 40–45 Vol.1, doi: 10.1049/cp:20040256.

140. Bansal, R. C. «Three Phase Self Excited Induction Generator: An Overview» *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, Jun. 2005,doi: 10.1109/TEC.2004.842395.

141. Barakin, N. S. «Computer Simulation on the Basis of SIMINTECH Asynchronous Wind Generator» / N. S. Barakin, A. V. Bogdan, A. V. Kvitko // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : Proceedings, Sochi, 15–19 мая 2023 года.* – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. – pp. 186–191,doi: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139043.

142. Barakin, N. S., Garkavyu K. A. and Kumeiko A. A. «Calculation of Parameters Asynchronous Generator with Stator Winding Connected in the Star-Delta», *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019. – pp. 1–5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8933984.

143. Bhisham, C. Gupta, Irwin Guttman and Kalanka P. Jayalath «Statistics and Probability with Applications for Engineers and Scientists Using MINITAB, R and JMP», 2020, John Wiley & Sons, Inc. – 1040 p.

144. Bogdan, A. V. and Barakin, N. S. «Asynchronous generator mathematical model for of asymmetrical modes calculation», *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, St. Petersburg, Rus-

sia, 2017. – pp. 1–6, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076299.

145. Chaturvedi, R. and Murthy, S. S., «Use of conventional induction motor as a wind driven self excited induction generator for autonomous operation» Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, USA, 1989. – pp. 2051–2055 vol.4, doi: 10.1109/IECEC.1989.74755.

146. Elistratov, V. and Kudryasheva, I. «Stability and reliability of power system operation due to use of renewable energy resources», 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 2020. – pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE51172.2020.9269222.

147. Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis / A. W. Manyonge¹, R. M. Ochieng¹, F. N. Onyango and J. Shichika // Applied Mathematical Sciences 6(91(2012)):4527-4536, January 2012 [Электронный ресурс]. – URL: <https://m-hikari.com/ams/ams-2012/ams-89-92-2012/manyongeAMS89-92-2012.pdf> (Дата обращения 15.02.2026).

148. Research of Processes in an Autonomous Induction Generator with Relay Regulation of Capacitive Current / V.Chenchevoi, R.Yatsiuk, O.Chencheva, O.Chorny, M.Tryputen and V.Nadtochy, 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021. – pp. 1–5, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598721.

149. Steady-state analysis of Self -Excited Induction Generator /N.Mekkaoui, M.-S.Naït-Saïd and S.Drid, 2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA), Hammamet, Tunisia, 2011. – pp. 1–5, doi: 10.1109/CCCA.2011.6031528.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А



- АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
- СВЕТОДИОДНЫЕ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ
- ЭНЕРГОСЕРВИСНЫЕ КОНТРАКТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО НТК «Солнечный центр»
И. В. Самородов
«3» декабря 2025 г.



А К Т

об использовании результатов НИР ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина» в ООО НТК «Солнечный центр» г. Краснодар

Мы ниже подписавшиеся от ООО НТК «Солнечный центр» инженер Мараховский Е. А., от Кубанского государственного аграрного университета – заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, д.т.н., профессор Григораш О.В., профессор кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, д-р техн. наук, доцент Богдан А. В., соискатель Квитко А.В. составили настоящий акт о том, что кафедрой «Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» передан в ООО НТК «Солнечный центр», разработанный соискателем Квитко А.В. под руководством д.т.н., доцента Богдана А.В. математический аппарат для расчета параметров и режимов работы ветроэнергетических установок малой мощности на базе асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором.

Математический аппарат используется в ООО НТК «Солнечный центр» и позволяет сократить сроки проектирования энергоэффективных автономных систем электроснабжения на возобновляемых источниках энергии.

От ООО НТК «Солнечный центр»
инженер

Е. А. Мараховский
Е. А. Мараховский

От ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени
И.Т. Трубилина»

заведующий кафедрой

О. В. Григораш
О. В. Григораш

профессор кафедры

А. В. Богдан
А. В. Богдан

Соискатель

А. В. Квитко
А. В. Квитко

Приложение Б

Общество с ограниченной ответственностью
«Энерготехнологии-Сервис»

350042, г. Краснодар,
ул. Садовая, 223
тел. 8(861)251-77-67, 254-16-19
ets@nextmail.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Энерготехнологии-Сервис»

д-р техн. наук
В. А. Бутузов
«Энерготехнологии-Сервис» 2025 г.



А К Т

об использовании результатов научных исследований ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина»
ООО «Энерготехнологии-Сервис» г. Краснодар

Мы, ниже подписавшиеся от ООО «Энерготехнологии-Сервис» главный инженер Бутузов В.В., от КубГАУ заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, д-р техн. наук, профессор Григораш О. В., профессор кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, д-р техн. наук, доцент Богдан А. В., соискатель Квитко А. В., составили настоящий акт о том, что кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии передан в ООО «Энерготехнологии-Сервис» разработанный соискателем Квитко А. В. под руководством д-ра техн. наук, доцента Богдана А. В. математический аппарат, включающий алгоритм решения уравнений, описывающих модель системы «ветродвигатель – асинхронный генератор – нагрузка» со стабилизатором напряжения, позволяющий проводить расчёт ключевых параметров системы и анализ работы ветроэнергетических установок в основных режимах функционирования, а также проводить оценку эффективности автономной системы электроснабжения.

Математический аппарат используется в ООО «Энерготехнологии-Сервис» при проектировании энергоэффективных систем электроснабжения на возобновляемых источниках энергии.

Главный инженер

В. В. Бутузов

От ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»:

Заведующий кафедрой

О. В. Григораш

Профессор кафедры

А. В. Богдан

Соискатель

А. В. Квитко

Приложение Г

Для определения возможности использования эквивалентной схемы для математического моделирования был произведен расчет энергетических показателей исходной и эквивалентной схем, представленных на рисунке 1.

Сложность расчета заключается в несинусоидальности напряжений и токов из-за наличия в схеме выпрямительного моста.

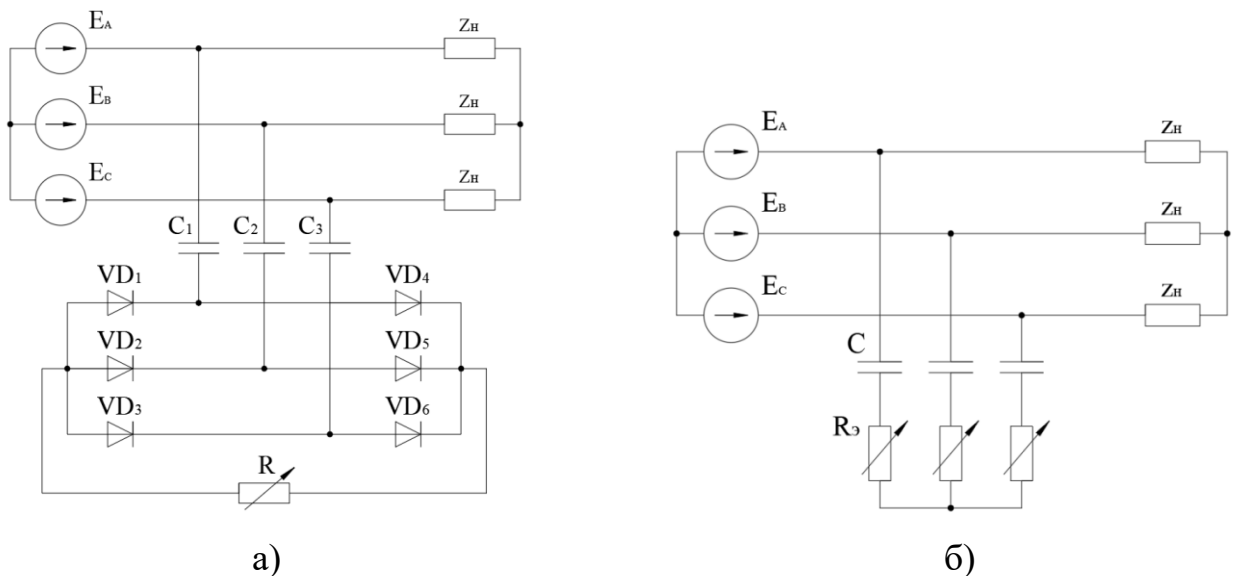


Рисунок 1 – Схема регулирования напряжения на конденсаторах одним резистором в трехфазной схеме при симметричной нагрузке

Для определения формы токов на конденсаторах и регулировочном сопротивлении была построена компьютерная модель в среде LTspiceIV. Пример схемы и расчетные осциллограммы токов показаны на рисунке 2.

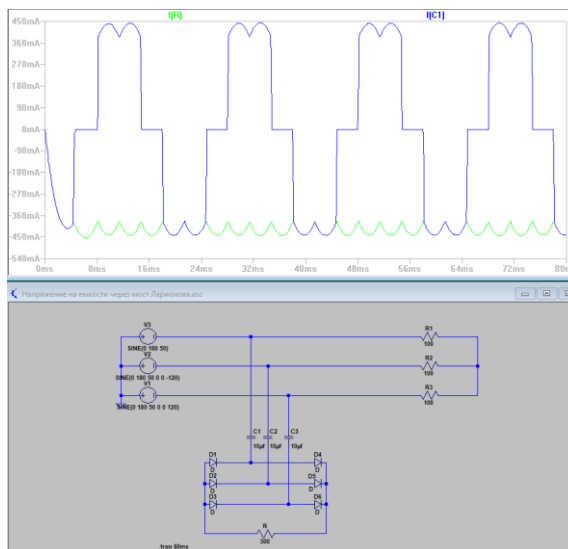


Рисунок 2 – Пример схемы и расчетные осциллограммы токов на конденсаторе и регулировочном резисторе

Форма тока через конденсатор, представленная на рисунках 2 и 3,а, состоит из импульсов, показанных на рисунке 3,б, где угол $\varphi_1 = \pi/2 - \pi/6 = \pi/3$, а $\varphi_2 = \pi/2 + \pi/6 = 2\pi/3$.

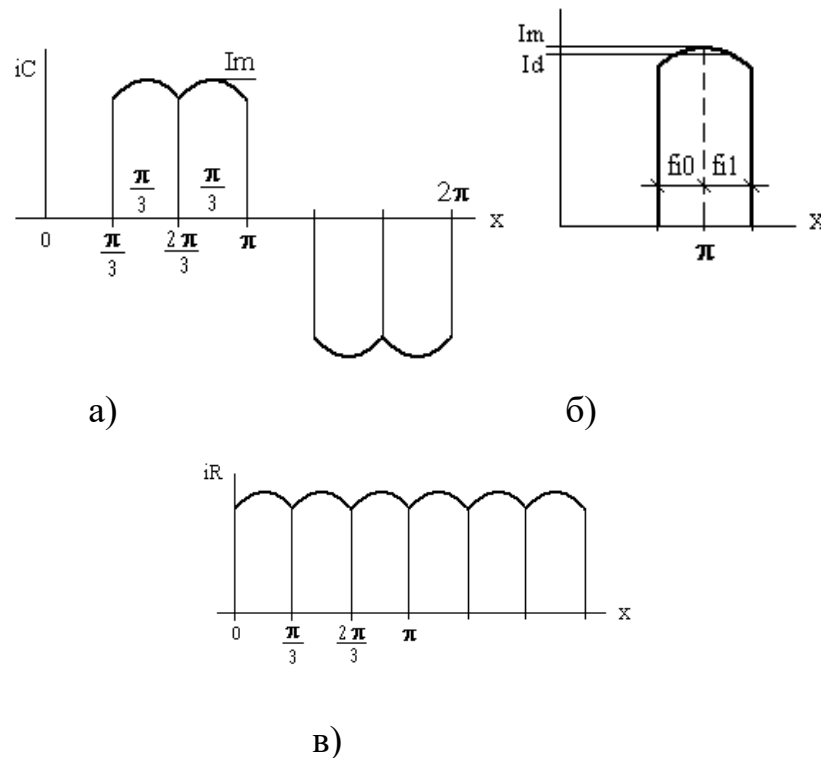


Рисунок 3 – Формы тока на элементах схемы регулирования напряжения на конденсаторах

Для устранения нелинейной зависимости между расчетной и эквивалентной схемами проведем расчет, используя метод эквивалентных синусоид так, чтобы сохранялось действующее значение. Принимаем, что ток через конденсатор остается таким же, как и в исходной схеме, а действительное активное регулировочное сопротивление заменим на 3 эквивалентных (рисунок 1,б). Считаем, что потери мощности в эквивалентных сопротивлениях равны потерям мощности в регулировочном сопротивлении выпрямительного моста R.

Действующее значение импульса тока за период будет равно

$$I'_{C\text{реал}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (I_m \sin(\omega t))^2 dt \right]} = \sqrt{\frac{I_m^2 (2\pi + 3\sqrt{3})}{24}} = \sqrt{\frac{I_m^2 (2\pi + 3\sqrt{3})}{24\pi}} = 0,39I_m. \quad (1)$$

Так как ток через конденсатор состоит из четырех рассматриваемых импульсов, то действующее значение тока

$$I_{C\text{реал}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[4 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (I_m \cdot \sin(\omega t))^2 dt \right]} = I_m \sqrt{\frac{(2\pi + 3\sqrt{3})}{6\pi}} = 0,78I_m, \quad (2)$$

Для выпрямленного тока через регулировочный резистор, показанного на рисунке 3, в, действующее значение равно

$$I_{\text{Реал}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[6 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (I_m \sin(\omega t))^2 dt \right]} = I_m \sqrt{\frac{(2\pi+3\sqrt{3})}{4\pi}} = 0,956 I_m. \quad (3)$$

Активная мощность в исходной схеме (рисунок 1,а) будет определяться выражением

$$P = I_m^2 \frac{(2\pi+3\sqrt{3})}{4\pi} R, \quad (4)$$

а в схеме замещения (рисунок 1,б)

$$P_3 = I_m^2 \frac{(2\pi+3\sqrt{3})}{2\pi} R_3. \quad (5)$$

Мощности, выделяемые в исходной и эквивалентной схемах равны, то есть получаем $R_3 = \frac{R}{2}$.

Для эквивалентной схемы замещения величина тока в комплексной форме при ЭДС равной E будет определяться по формуле

$$I_C = \frac{E}{R_3 - jX_C}. \quad (6)$$

Заменив R_3 на величину $R/2$ определим полную мощность одной фазы эквивалентной схемы замещения

$$S = I_C^2 \left(\frac{R}{2} - jX_C \right) = \frac{E^2 (R+2jX_C)(2\pi+3\sqrt{3})}{2\pi(R^2+4X_C^2)}, \quad (7)$$

откуда получим активную мощность

$$P = \frac{E^2 R (2\pi+3\sqrt{3})}{2\pi(R^2+4X_C^2)}, \quad (8)$$

и реактивную мощность

$$Q = \frac{E^2 X_C (2\pi+3\sqrt{3})}{\pi(R^2+4X_C^2)}. \quad (9)$$

Введем относительную величину сопротивлений относительно X_C . Тогда $X_{\text{Сотн}}=1$, а относительная величина $R_{\text{отн}}=R/X_C$. Определим максимум выделяемой мощности, для чего найдем производную от активной мощности для относительных значений сопротивлений и $E=1$

$$\frac{d}{dR_{\text{отн}}} \left(\frac{R_{\text{отн}}(2\pi+3\sqrt{3})}{2\pi(R_{\text{отн}}^2+4)} \right) = \frac{2\pi+3\sqrt{3}}{2\pi(R_{\text{отн}}^2+4)} - \frac{R_{\text{отн}}^2(2\pi+3\sqrt{3})}{\pi(R_{\text{отн}}^2+4)^2}. \quad (10)$$

Приравняв полученное выражение нулю, и решив это уравнение, получим два решения, из которых физический смысл имеет только положительное значение $R_{отн}=2$.

На рисунке 4 показаны графики зависимости активной и реактивной мощностей при изменении $R_{отн}$ в пределах от 0 до 8.

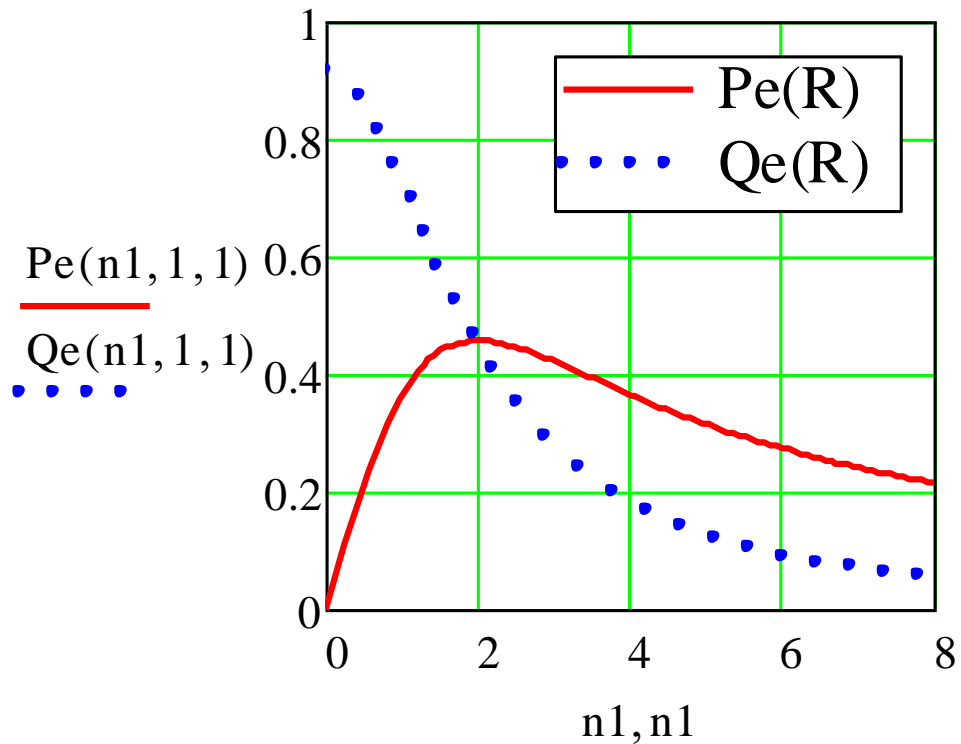


Рисунок 4 – Зависимости активной и реактивной мощностей от $R_{отн}$

Таким образом, можно сделать выводы, что максимум рассеиваемой мощности наступает при $R=2X_c$.

Следует отметить, что в исходной схеме наблюдается переход тока через конденсатор от формы, показанной на рисунке 2, к синусоиде. Однако этот переход начинает быть заметным примерно при $R=(0...0,5)X_c$ и не влияет на расчет максимума выделяемой мощности.

Также был проведен эксперимент по определению энергетических характеристик для схемы, показанной на рисунке 1,а, с измерением мощности на регулируемом резисторе. Были построены зависимости активной мощности от сопротивления, представленные на рисунке 5, где показаны экспериментальная 1, полу-

ченая по компьютерной модели 2 и расчетная 3 кривые при фазном напряжении 136,5 В, частоте питающего напряжения 50 Гц и емкости конденсаторов 10,8 мкФ.

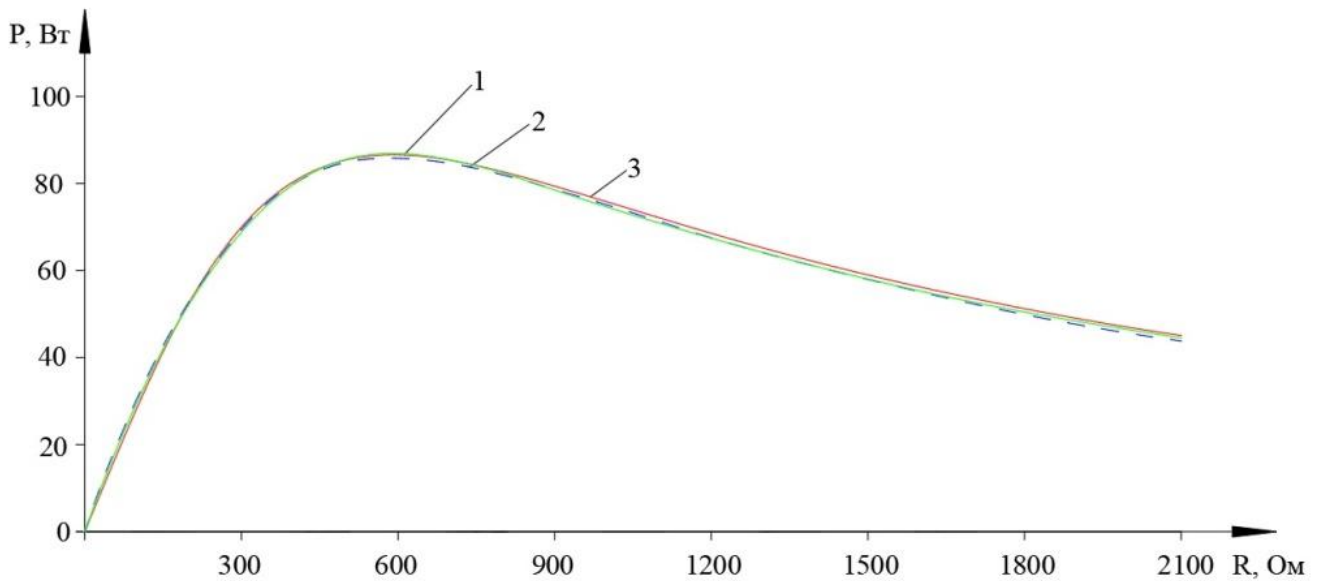


Рисунок 5 – Зависимости рассеиваемой мощности от сопротивления регулировочного резистора при фазном напряжении 136,5 В и емкости конденсаторов 10,8 мкФ:
1 – экспериментальная; 2 – полученная по компьютерной модели; 3 – расчетная

Полученные кривые показывают, что расхождение между расчетными результатами и результатами, полученными на экспериментальном стенде и в компьютерной модели, составляет менее 4%. Также данный эксперимент подтверждает, что максимальное выделение мощности на силовом резисторе стабилизатора напряжения наступает при $R=2X_c$.

Приложение Д

```

#include <Arduino.h>
#include <GyverNTC.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <TrueRMS.h>

#include "GyverPID.h"

#define ERROR_NONE 0x00 // 0b00000000
#define ERROR_OVERVOLT 0x01 // 0b00000001
#define ERROR_MINVOLT 0x08 // 0b00001000
#define ERROR_PHASE_BAL 0x02 // 0b00000010
#define ERROR_OVERTEMP 0x04 // 0b00000100

#define A_voltage A0 // Напряжение фазы А
#define A_current A3 // Ток фазы А

#define B_voltage A1 // Напряжение фазы В
#define B_current A4 // Ток фазы В

#define C_voltage A2 // Напряжение фазы С
#define C_current A5 // Ток фазы С

#define U_min 180 // минимальное напряжение включения регулятора
#define U_set 220 // номинальное напряжение
#define U_max 240 // максимальное напряжение
#define deltaV 10 // дельта перекоса фаз
#define tempMAX90 // максимальная температура транзистора

#define K1 5 // Контактор
#define DAC 10 // Выход ШИМ
#define FAN 3 // Выход шим вентилятор
#define ZUMER 9 // Выход динамика

uint8_t Warm_F(uint16_t voltage[3], uint16_t temp);
uint8_t regul(uint16_t voltage[3], uint16_t set_voltage);
void lcd_display(uint16_t voltage[3], uint16_t current[3], uint16_t power[3], float energy[3], uint8_t err);

GyverNTC therm(A6, 10000, 3435);
GyverPID regulator(0.1, 0.05, 0.01, 10);

Power acPowerA;
Power acPowerB;

```

```
Power acPowerC;
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

```
void setup() {
```

```
    // Инициализация цифровых входов
```

```
    pinMode(K1, OUTPUT);
```

```
    pinMode(DAC, OUTPUT);
```

```
    pinMode(FAN, OUTPUT);
```

```
    pinMode(ZUMER, OUTPUT);
```

```
    // Инициализация PID регулятора
```

```
    regulator.setDirection(NORMAL);
```

```
    regulator.setLimits(0, 255);
```

```
    // Инициализация программы учета электроэнергии
```

```
    acPowerA.begin(400, 20, 20, ADC_10BIT, BLR_ON, CNT_SCAN);
```

```
    acPowerA.start();
```

```
    acPowerB.begin(400, 20, 20, ADC_10BIT, BLR_ON, CNT_SCAN);
```

```
    acPowerB.start();
```

```
    acPowerC.begin(400, 20, 20, ADC_10BIT, BLR_ON, CNT_SCAN);
```

```
    acPowerC.start();
```

```
    lcd.init();
```

```
    lcd.clear();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    static bool errF = 0;
```

```
    static uint16_t voltageRAW[3];
```

```
    static uint16_t currentRAW[3];
```

```
    static uint16_t voltage[3];
```

```
    static uint16_t current[3];
```

```
    static float energie[3];
```

```
    static uint16_t power[3];
```

```
    static uint32_t tmr = millis();
```

```
    static int8_t temp;
```

```
    static int8_t err;
```

```
    // Получение данных с аналогового входа
```

```
    voltageRAW[0] = analogRead(A_voltage);
```

```

voltageRAW[1] = analogRead(B_voltage);
voltageRAW[2] = analogRead(C_voltage);

currentRAW[0] = analogRead(A_current);
currentRAW[1] = analogRead(B_current);
currentRAW[2] = analogRead(C_current);

temp = therm.getTempAverage();

acPowerA.update(voltageRAW[0], currentRAW[0]);
acPowerB.update(voltageRAW[1], currentRAW[1]);
acPowerC.update(voltageRAW[2], currentRAW[2]);

// Получение данных
voltage[0] = acPowerA.rmsVal1;    // [V]
current[0] = acPowerA.rmsVal2;    // [A]
power[0] = acPowerA.realPwr;      // [P]
energe[0] = acPowerA.energy / 3600; // [Wh]

voltage[1] = acPowerB.rmsVal1;    // [V]
current[1] = acPowerB.rmsVal2;    // [A]
power[1] = acPowerB.realPwr;      // [P]
energe[1] = acPowerB.energy / 3600; // [Wh]

voltage[2] = acPowerC.rmsVal1;    // [V]
current[2] = acPowerC.rmsVal2;    // [A]
power[2] = acPowerC.realPwr;      // [P]
energe[2] = acPowerC.energy / 3600; // [Wh]

err = Warm_F(voltage, temp);
if (err == ERROR_NONE && !errF) {
    digitalWrite(K1, 1);

    uint8_t PWM = map(temp, 40, 90, 0, 255);
    PWM = constrain(PWM, 0, 255);

    analogWrite(FAN, PWM);
    analogWrite(DAC, regul(voltage, U_set));
}
switch (err) {
    case ERROR_OVERVOLT:
        digitalWrite(K1, 0);
        analogWrite(DAC, 0);
        digitalWrite(ZUMER, 1);
        errF = 1;

```

```

        break;
    case ERROR_PHASE_BAL:
        digitalWrite(K1, 0);
        analogWrite(DAC, 0);
        digitalWrite(ZUMER, 1);
        errF = 1;
        break;
    case ERROR_OVERTEMP:
        digitalWrite(K1, 0);
        analogWrite(DAC, 0);
        digitalWrite(FAN, 1);
        digitalWrite(ZUMER, 1);
        errF = 1;
        break;
}

if (millis() - tmr > 1000) {
    lcd_display(voltage, current, power, energe, err);
    tmr = millis();
}
}

// Функция обработки ошибок
uint8_t Warm_F(uint16_t voltage[3], uint16_t temp) {
    uint16_t maxV = 0, minV = 0;

    if (voltage[0] > U_max || voltage[1] > U_max || voltage[2] > U_max) {
        return ERROR_OVERVOLT;
    }

    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        if (voltage[i] > maxV) maxV = voltage[i];
        if (voltage[i] < minV) minV = voltage[i];
    }
    if (maxV - minV > deltaV) {
        return ERROR_PHASE_BAL;
    }

    if (temp > tempMAX) {
        return ERROR_OVERTEMP;
    }

    return ERROR_NONE;
}
}

```

```

// Функция PID регулятора
uint8_t regul(uint16_t voltage[3], uint16_t set_voltage) {
    uint16_t mid_voltage;
    mid_voltage = (voltage[0] + voltage[1] + voltage[2]) / 3; // Расчет среднего напря-
жения
    regulator.input = mid_voltage;
    regulator.input = set_voltage;
    return regulator.getResultTimer();
}

void lcd_display(uint16_t voltage[3], uint16_t current[3], uint16_t power[3], float ener-
gy[3], uint8_t err) {
    static uint8_t display_page = 0; // Текущая страница отображения
    static uint32_t last_change = 0;
    uint32_t current_time = millis();

    if (current_time - last_change > 3000) {
        display_page = (display_page + 1) % 3;
        last_change = current_time;
        lcd.clear();
    }

    switch (display_page) {
        case 0: // Страница 1: Напряжения и токи
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("UA:");
            lcd.print(voltage[0]);
            lcd.print("V UB:");
            lcd.print(voltage[1]);
            lcd.print("V");

            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("UC:");
            lcd.print(voltage[2]);
            lcd.print("V");

            lcd.setCursor(0, 2);
            lcd.print("IA:");
            lcd.print(current[0]);
            lcd.print("A IB:");
            lcd.print(current[1]);
            lcd.print("A");

            lcd.setCursor(0, 3);
            lcd.print("IC:");

```

```

lcd.print(current[2]);
lcd.print(" A");
break;

```

case 1: // Страница 2: Мощности

```

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("PA:");
lcd.print(power[0]);
lcd.print("W PB:");
lcd.print(power[1]);
lcd.print("W");

```

```

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("PC:");
lcd.print(power[2]);
lcd.print("W");

```

```

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("P total:");
uint32_t total_power = power[0] + power[1] + power[2];
lcd.print(total_power);
lcd.print("W");

```

```

lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Status:");
if (err == 0) lcd.print("OK");
else lcd.print("ERR");
break;

```

case2: // Страница 3: Энергия

```

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Energy Total:");

```

```

uint32_t total_energy = energy[0] + energy[1] + energy[2];
lcd.setCursor(0, 1);

```

```

// Форматированный вывод
if (total_energy < 1000) {
    lcd.print(total_energy);
    lcd.print(" Wh");
} else if (total_energy < 1000000) {
    lcd.print(total_energy / 1000.0, 2);
    lcd.print(" kWh");
} else {
    lcd.print(total_energy / 1000000.0, 3);

```

```
    lcd.print(" MWh");  
  }  
  
  // Пофазная энергия  
  lcd.setCursor(0, 2);  
  lcd.print("EA:");  
  lcd.print(energy[0]);  
  lcd.print(" EB:");  
  lcd.print(energy[1]);  
  
  lcd.setCursor(0, 3);  
  lcd.print("EC:");  
  lcd.print(energy[2]);  
  break;  
}  
}
```

Приложение Е

Условие эксперимента	Статистика Шапиро-Уилка (W)	p-value	Статистический вывод (при $\alpha = 0.05$)
Дискретное регулирование без стабилизации	0.992	0.337	Распределение не отличается от нормального (H_0 не отвергается)
Дискретное регулирование со стабилизацией	0.995	0.732	Распределение не отличается от нормального (H_0 не отвергается)
Плавное регулирование без стабилизации	0.995	0.864	Распределение не отличается от нормального (H_0 не отвергается)
Плавное регулирование со стабилизацией	0.996	0.890	Распределение не отличается от нормального (H_0 не отвергается)

Приложение Ж

Денежный поток по шагам

Время		Денежный поток на шаге					Нарастающим итогом		
Шаг	Год	Расход	Доход	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД
1	1	5 181 372,00	0,00	5 181 372,00	-5 181 372,00	-5 181 372,00	5 181 372,00	-5 181 372,00	-5 181 372,00
2	2	12 075 600,00	10 566 570,00	12 075 600,00	-1 509 030,00	-1 268 290,21	17 256 972,00	-6 690 402,00	-6 449 662,21
3	3	12 075 600,00	13 585 590,00	1 509 030,00	1 509 990,00	1 066 634,45	18 766 002,00	-5 180 412,00	-5 383 027,76
4	4	12 075 600,00	15 095 100,00	-1 509 990,00	3 019 500,00	1 792 657,55	17 256 012,00	-2 160 912,00	-3 590 370,21
5	5	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 506 669,87	14 236 512,00	858 588,00	-2 083 700,34
6	6	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 266 306,60	11 217 012,00	3 878 088,00	-817 393,74
7	7	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 064 289,16	8 197 512,00	6 897 588,00	246 895,41
8	8	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	894 500,12	5 178 012,00	9 917 088,00	1 141 395,53
9	9	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	751 798,01	2 158 512,00	12 936 588,00	1 893 193,54
10	10	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	631 861,56	-860 988,00	15 956 088,00	2 525 055,11
11	11	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	531 058,92	-3 880 488,00	18 975 588,00	3 056 114,03
12	12	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	446 337,60	-6 899 988,00	21 995 088,00	3 502 451,62
13	13	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	375 132,11	-9 919 488,00	25 014 588,00	3 877 583,73
14	14	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	315 286,23	-12 938 988,00	28 034 088,00	4 192 869,97
15	15	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	264 987,74	-15 958 488,00	31 053 588,00	4 457 857,70
16	16	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	222 713,50	-18 977 988,00	34 073 088,00	4 680 571,20
		186 315 372,00	220 388 460,00		34 073 088,00				4 680 571,20

Приложение И

Расходы и доходы по шагам

Расходы										Доходы
Предпроиз- водственные капиталовло- жения	Заработная плата	Вспомогатель- ные материалы	Комплекту- ющие	Топливо и энергия	Транспортно- заготовительные расходы	Отчисления на социаль- ные нужды	Аренда обору- дования	Общепроизводственные расходы	Коммерческие расходы	Выручка
4 830 522,00	0,00	0,00	0,00	0,00	231 750,00	0,00	0,00	0,00	119 100,00	0,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	10 566 570,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	13 585 590,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
	1 500 000,00	386 250,00	7 725 000,00	77 250,00	231 750,00	450 000,00	1 200 000,00	386 250,00	119 100,00	15 095 100,00
4 830 522,00	22 500 000,00	5 793 750,00	115 875 000,00	1 158 750,00	3 708 000,00	6 750 000,00	18 000 000,00	5 793 750,00	1 905 600,00	220 388 460,00

Приложение К

Денежный поток по шагам

Время		Денежный поток на шаге					Нарастающим итогом		
Шаг	Год	Расход	Доход	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД
1	1	5 181 372,00	0,00	5 181 372,00	-5 181 372,00	-5 181 372,00	5 181 372,00	-5 181 372,00	-5 181 372,00
2	2	12 075 600,00	10 566 570,00	12 075 600,00	-1 509 030,00	-1 367 487,95	17 256 972,00	-6 690 402,00	-6 548 859,95
3	3	12 075 600,00	13 585 590,00	1 509 030,00	1 509 990,00	1 240 010,43	18 766 002,00	-5 180 412,00	-5 308 849,52
4	4	12 075 600,00	15 095 100,00	-1 509 990,00	3 019 500,00	2 247 045,86	17 256 012,00	-2 160 912,00	-3 061 803,66
5	5	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 036 280,35	14 236 512,00	858 588,00	-1 025 523,31
6	6	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 845 283,95	11 217 012,00	3 878 088,00	819 760,63
7	7	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 672 202,38	8 197 512,00	6 897 588,00	2 491 963,01
8	8	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 515 355,30	5 178 012,00	9 917 088,00	4 007 318,30
9	9	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 373 219,95	2 158 512,00	12 936 588,00	5 380 538,26
10	10	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 244 416,44	-860 988,00	15 956 088,00	6 624 954,69
11	11	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 127 694,27	-3 880 488,00	18 975 588,00	7 752 648,96
12	12	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 021 920,25	-6 899 988,00	21 995 088,00	8 774 569,21
13	13	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	926 067,49	-9 919 488,00	25 014 588,00	9 700 636,71
14	14	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	839 205,41	-12 938 988,00	28 034 088,00	10 539 842,11
15	15	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	760 490,70	-15 958 488,00	31 053 588,00	11 300 332,81
16	16	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	689 159,17	-18 977 988,00	34 073 088,00	11 989 491,99
		186 315 372,00	220 388 460,00		34 073 088,00				11 989 491,99

Приложение Л

Денежный поток по шагам

Время		Денежный поток на шаге					Нарастающим итогом		
Шаг	Год	Расход	Доход	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД	Потребность в инвестициях	Чистый доход	Дисконтированный ЧД
1	1	5 181 372,00	0,00	5 181 372,00	-5 181 372,00	-5 181 372,00	5 181 372,00	-5 181 372,00	-5 181 372,00
2	2	12 075 600,00	10 566 570,00	12 075 600,00	-1 509 030,00	-1 450 990,38	17 256 972,00	-6 690 402,00	-6 632 362,38
3	3	12 075 600,00	13 585 590,00	1 509 030,00	1 509 990,00	1 396 070,64	18 766 002,00	-5 180 412,00	-5 236 291,75
4	4	12 075 600,00	15 095 100,00	-1 509 990,00	3 019 500,00	2 684 324,51	17 256 012,00	-2 160 912,00	-2 551 967,24
5	5	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 581 081,25	14 236 512,00	858 588,00	29 114,01
6	6	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 481 808,90	11 217 012,00	3 878 088,00	2 510 922,91
7	7	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 386 354,71	8 197 512,00	6 897 588,00	4 897 277,62
8	8	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 294 571,84	5 178 012,00	9 917 088,00	7 191 849,46
9	9	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 206 319,07	2 158 512,00	12 936 588,00	9 398 168,53
10	10	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 121 460,65	-860 988,00	15 956 088,00	11 519 629,18
11	11	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	2 039 866,01	-3 880 488,00	18 975 588,00	13 559 495,19
12	12	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 961 409,62	-6 899 988,00	21 995 088,00	15 520 904,81
13	13	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 885 970,79	-9 919 488,00	25 014 588,00	17 406 875,60
14	14	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 813 433,45	-12 938 988,00	28 034 088,00	19 220 309,05
15	15	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 743 686,01	-15 958 488,00	31 053 588,00	20 963 995,07
16	16	12 075 600,00	15 095 100,00	-3 019 500,00	3 019 500,00	1 676 621,17	-18 977 988,00	34 073 088,00	22 640 616,23
		186 315 372,00	220 388 460,00			34 073 088,00			22 640 616,23