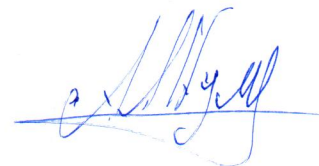


Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина»

На правах рукописи



Кумейко Андрей Анатольевич

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С
ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ
МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность

05.20.02 — Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Оськин Сергей Владимирович

Краснодар — 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
1.1 Перспективы использования мобильных поливальных машин в АПК	10
1.2 Электрооборудование и режимы работы дождевальных машин кругового действия и способы их электроснабжения	16
1.3 Способы снижения потерь энергии в установках, анализ схем обмоток асинхронных генераторов	25
1.4 Выводы по первой главе	33
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА	35
2.1 Математическое описание асинхронного генератора и параметры переключаемой обмотки статора	35
2.2 Оценка электрических потерь системы электроснабжения в режимах работы дождевальной машины	49
2.3 Выводы по второй главе	60
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	62
3.1 Расчет магнитной системы асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора	62
3.2 Методика и результаты экспериментального исследования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора	65
3.3 Разработка принципиальной схемы системы возбуждения асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора	76
3.4 Выводы по третьей главе	81
4 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКОЙ В СОСТАВЕ МОБИЛЬНОГО ПОЛИВНОГО АГРЕГАТА	83
4.1 Экономическая эффективность внедрения асинхронного генератора в составе дождевальной машины кругового действия	83
4.2 Выводы по четвертой главе	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЯ	112

ВВЕДЕНИЕ

По данным Министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края, в 2019 году в регионе производство зерновых и зернобобовых культур в зачетном весе составило 13 881,1 тыс. т (на 1 154,9 тыс. т больше, чем в 2018 году), или 11,5 % от общероссийского валового сбора, средняя урожайность — 56,5 ц/га (на 3,6 ц/га больше).

Основная доля в общем объеме зерна приходится на озимую пшеницу: при урожайности 59,7 ц/га (на 1,9 ц/га меньше, чем годом ранее) намолочено 9 264,9 тыс. т (на 306,3 тыс. т больше), или 17,3 % от валового производства озимой пшеницы в России. Это рекордный валовой сбор озимой пшеницы на Кубани.

В 2019 году в Краснодарском крае получена самая высокая урожайность озимого ячменя за последние десять лет — 60,7 ц/га (+0,5 ц/га к уровню 2018 года). Валовой сбор озимого ячменя составил 937,8 тыс. т (+185,5 тыс. т), ярового — 98,4 тыс. т (+7,6 тыс. т) при средней урожайности 36,3 ц/га (+7,6 ц/га).

По оценке Краснодарского филиала ФГБУ «Центр Агроаналитики», таких хороших результатов кубанские аграрии достигли в результате своевременного и качественного выполнения каждого этапа выращивания сельскохозяйственных культур, начиная от сева и завершая уборкой. В частности, речь идет об оптимальном внесении минеральных удобрений (за последние шесть лет оно в регионе увеличилось на 22,5 %) [109].

В Краснодарском крае проводятся мероприятия по сохранению плодородия сельхозземель. В регионе действует закон от 7 июня 2004 года № 725-КЗ «Об обеспечении плодородия земель сельскохозяйственного назначения на территории Краснодарского края», закрепляющий необходимость для сельскохозяйственных товаропроизводителей высевать многолетние бобовые травы (бобовые культуры), соблюдать севооборот, применять современные системы полива [101; 107].

Восстановление мелиорированных земель и мелиоративных систем является приоритетной задачей в Краснодарском крае согласно краевой целевой программе «Развитие мелиорации сельскохозяйственных земель в Краснодарском крае на 2013–

2020 годы», что подразумевает внедрение новых и модернизацию существующих систем полива. Дождевание широко применяется для полива, потому что оно создает необходимый водный режим почвы без нарушения ее структуры. Наряду с использованием закрытых трубопроводов вместо временных оросительных каналов это позволяет увеличить коэффициент использования земли. Создается возможность маневрирования поливными нормами в широком диапазоне — от 50 до 900 м³/га без потерь воды на глубинную фильтрацию [46].

Бесперебойное автономное электроснабжение электрооборудования поливальных агрегатов во время сезона затруднено, так как требует больших эксплуатационных затрат. Это приводит к необходимости прокладки отдельной линии электроснабжения этих агрегатов с проектированием отдельной трансформаторной подстанции.

Известные преимущества АГ, к которым относятся высокая надежность и качество электрической энергии, недостаточны для повсеместного применения асинхронных генераторов. Невысокая степень стабилизации напряжения и частоты вызывает необходимость использования дополнительных схем управления либо применения инверторного преобразователя. При включении нагрузки может произойти развозбуждение асинхронного генератора. Особенно это важно при включении двигательной нагрузки, так как пусковой ток асинхронного двигателя может превышать на порядок ток номинальный, что сразу приведет к размагничиванию генератора [95].

Снижение тока в линии особо актуально для дождевальных машин, так как питающая линия электродвигателей приводных тележек и бустерного насоса может достигать 1000 м, что приводит к завышению сечения питающего кабеля [59; 70].

Создание надежного источника с асинхронным генератором дождевальной машины, позволяющего осуществлять пуск двигательной нагрузки с одновременным снижением реактивной составляющей пускового тока в питающей линии, является актуальной задачей [81; 87].

Работа выполнена по планам НИР Кубанского ГАУ ГР №01201153641 — раздел 2.3 (2015-2020 г.); № ГР № 121031700099-1 раздел — 32.1 (2021–2025 г.).

Степень разработанности темы. В начале XXI века заметно увеличился интерес к автономным асинхронным генераторам для систем электроснабжения. Научные проблемы применения автономных источников с асинхронными генераторами исследовались многими учеными, такими как: Алюшин Г. Н., Балагуров В. А., Григораш О. В., Джендубаев А.-З. Р., Зубков Ю. Д, Кицис С. И., Кунцевич П. А, Лесник В. А., Лищенко А. И., Торопцев Н. Д., Фаренюк А. П., Фильц Р. В. и другие авторы [14; 17; 24; 27; 30; 32; 35; 83; 96]. В работах В. Н. Ванурина детально описаны принципы проектирования асинхронных генераторов при помощи матричного способа формирования обмоток. Под руководством Н. И. Богатырева в КубГАУ создана научная школа по исследованию существующих и разработке новых обмоток асинхронного генератора. В коллектив входят Баракин Н. С., Вронский О. В., Екименко П. П., Ильченко Я. А., Потешин М. И., Оськина А. С., Сеницин А. С. Результатом совместной работы является созданием более 40 новых схем статорных обмоток [40; 41; 94]. В этих работах исследования направлены на увеличение многофункциональности асинхронных генераторов, генерирующих разный уровень напряжения, частоту тока или увеличивающих степень стабилизации напряжения. Но в них не рассматривается применение асинхронного генератора как комплексное решение для снижения электрических потерь в электроустановке.

Исследованием режимов и проблем экономии энергетических ресурсов дождевальных машин занимались С. М. Бакиров, А. И. Есин, Л. А. Журавлева, З. Ш. Карпов, В. Г. Юлдашев, И. Г. Стрижков, Д. А. Соловьев. Смежными вопросами энергосбережения дождевальных машин занимались Г. П. Ерошенко, С. В. Оськин, Д. А. Соловьев, С. К. Шерьязов и др. [3; 8; 43]. Несмотря на глубину разработки тем, задача повышения энергоэффективности электроснабжения дождевальных машин кругового действия остается актуальной. Длина линии электроснабжения дождевальной машины может достигать 1000 м, что приводит к необходимости завышать сечение проводников и использовать дополнительные способы снижения электрических потерь. В результате потребитель несет значительные расходы при проектировании системы электроснабжения дождевальной машины [30; 82].

Рабочая гипотеза — используя график электрической нагрузки и учитывая требования к качеству электроэнергии, можно разработать рациональный асинхронный генератор автономного источника с особой конструкцией переключаемой обмотки статора для снижения материальных и эксплуатационных затрат в дождевальных машинах кругового действия.

Целью работы является обоснование параметров и режимов асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора дождевальных машин кругового действия, позволяющих снизить материальные и эксплуатационные затраты.

Задачи исследования:

1. Получить математическое описание и математическую модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора для питания дождевальных машин.

2. Определить параметры асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора в основных режимах работы.

3. Разработать блок-схему компьютерной модели системы электроснабжения оборудования дождевальной машины кругового действия.

4. Изготовить макетный образец асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора и провести его лабораторные исследования.

5. Провести сопоставление теоретически и экспериментально полученных характеристик асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора.

6. Выполнить технико-экономическое обоснование эффективности применения асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора позволяющий снизить энергетические потери для питания дождевальных машин кругового действия.

Объект исследования — электрооборудование дождевальных машин, графики электрических нагрузок, асинхронный генератор с автотрансформаторной переключаемой обмоткой статора, схемы регулирования и стабилизации напряжения; зависимости энергопотребления дождевальных машин от режима работы ее электроприводов.

Предмет исследования — внешние и регулировочные характеристики асинхронных генераторов; параметры обмоток статора и их влияние на качественные характеристики асинхронных генераторов.

Методы исследования базируются на теории электромеханики, системного анализа, математического и компьютерного моделирования, матричной теории формирования схем обмоток статора, на учете воздействия параметров обмоток статора и ротора на магнитное состояние асинхронных генераторов. Компьютерное моделирование выполнено в программных продуктах MathCad. Экспериментальные исследования асинхронных генераторов выполнены на запатентованном в Кубанском ГАУ на кафедре электрических машин и электропривода специальном испытательном стенде.

Научную новизну работы составляют:

1. Математическая модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора позволяющая определить его основные характеристики и параметры обмотки.

2. Компьютерная модель системы электроснабжения дождевальная машины кругового действия, которая позволяет определить отдельные составляющие потерь энергии и проанализировать качество функционирования системы в различных режимах работы.

3. Параметры и режимы асинхронного генератора с переключаемой статорной обмоткой, необходимые для проектирования и модернизации дождевальных машин кругового действия.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– математическая модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора может быть использована при проектировании асинхронных машин на различные мощности;

– компьютерная модель системы электроснабжения дождевальной машины кругового действия может быть использована для оптимизации структуры электропитания удаленных электроприемников;

– разработка методики расчета пусковой емкости конденсаторов для асинхронного генератора с переключаемой статорной обмоткой для снижения реактивной составляющей тока в питающей линии, позволяющей проектировать автономные источники питания для дождевальная машины;

– экспериментально полученные внешние и регулировочные характеристики образца асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора, позволяющие разрабатывать новые схемные решения обмоток статора электрических машин;

– предложенное схемное решение автономного асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой (патент № RU 2640403 С1) позволяет получить электрические машины с более высокими энергетическими характеристиками.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований реализованы в экспериментальных образцах асинхронных генераторов и внедрены в ООО «СПЕЦ» (Краснодарский край). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на факультете энергетики КубГАУ.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертации доложены и одобрены на ежегодных научных конференциях факультета энергетики КубГАУ (2017–2020 гг.); опубликованы в пяти статьях в журнале «Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность» (2015–2018 гг.), в журнале «Агротехника и энергообеспечение» (2016 г.), в материалах научно-практических конференций (2017–2020 гг.), в пяти статьях Scopus и Web of Science (2019–2021 гг.); получен патент на изобретение RU 2640403 С1. Материалы исследований отмечены дипломом за 3-е место на краевом конкурсе «IQ года».

Публикации результатов работы. По материалам диссертационной работы опубликовано 26 печатных работ, в том числе 3 статьи в журнале, рекомендованном ВАК, и 5 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science.

На защиту выносятся:

– математическая модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора;

- компьютерная модель системы электроснабжения дождевальная машины кругового действия;
- параметры и режимы асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора с учетом размагничивающего действия реактивной составляющей тока ротора при подключении двигательной нагрузки;
- экспериментально полученные внешние и регулировочные характеристики асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Перспективы использования мобильных поливальных машин в АПК

Известно, что Краснодарский край является одним из самых плодородных регионов в России. Для поддержания и увеличения плодородия на Кубани с 2013 г. выполняется целевая программа восстановления мелиорации посевных площадей, так как регион является зоной рискованного земледелия из-за незначительного количества выпадающих осадков. За проведение комплексов мелиоративных мероприятий владельцы земель получают от государства возмещение части понесенных затрат. В Гулькевическом районе площади орошаемых земель только за последние четыре года увеличились более чем в два раза — с 4712 до 9968 га, а предприятия Гулькевического района за время участия в программе мелиорации земель получили субсидии в сумме 243512, 35 тыс. рублей [110].

Использование современной техники и технологий, системы защиты растений и внесения удобрений на основе агрохимического анализа почв, позволяют хозяйству обеспечивать устойчивый рост производства, сохранять плодородие почвы, достигать высокой урожайности возделываемых культур [70; 92; 93].

Введение в структуру производства новых орошаемых земель позволило хозяйству заняться другими видами деятельности, например, семеноводством. Площади производства семян в крае существенно выросли, а они являются одним из важнейших показателей для урожайности [110].

До 90-х годов прошлого века промышленное производство оросительной техники в России было рассчитано на полив больших площадей, и основной упор был поэтому сделан на выпуск широкозахватных машин фронтального и кругового действия. Так, например, машины дождевальные кругового действия «Кубань-ЛК1» и фронтальная «Кубань-Л» (рисунок 1.1) — имеют ширину захвата дождем 807 м. Двигатель ЯМЗ-238НД, находящийся на раме энергетической установки машины, вращает соединенные с ним генератор переменного тока и насос, закачивающий воду из оросительного канала в водопроводящий трубопровод машины. Автомати-

ческая система управления и защиты машины позволяют осуществлять полив круглосуточно в автоматическом режиме без участия оператора (рисунок 1.2). Привод для передвижения машины — электромеханический с использованием мотор-редукторов.



Рисунок 1.1 — Устройство системы управления дождевальными машинами «Кубань-ЛК1»

На машине имеется автоматическая аварийная защита от недопустимых смещений. Обслуживающий персонал — 1 чел. на 4 машины. Поверхность орошаемого поля должна быть хорошо спланирована (выровнена).

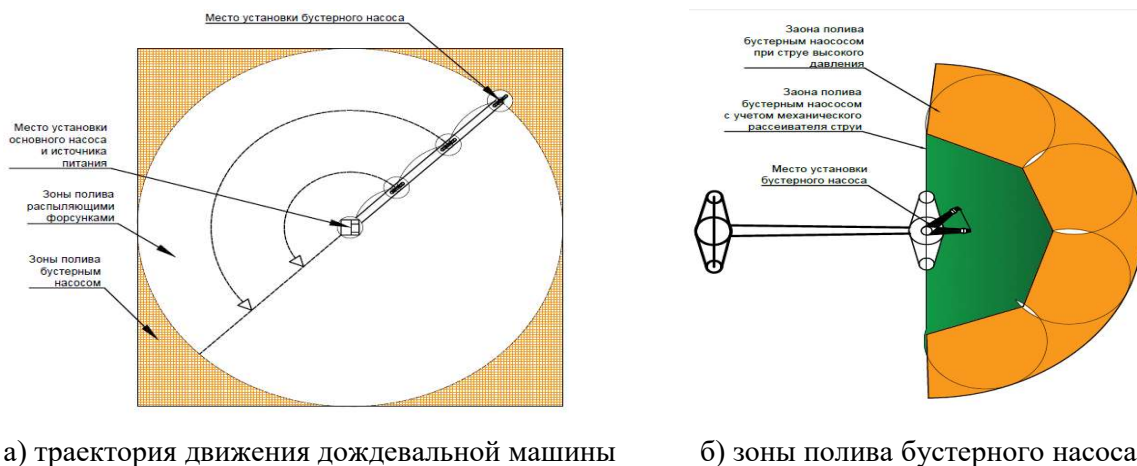
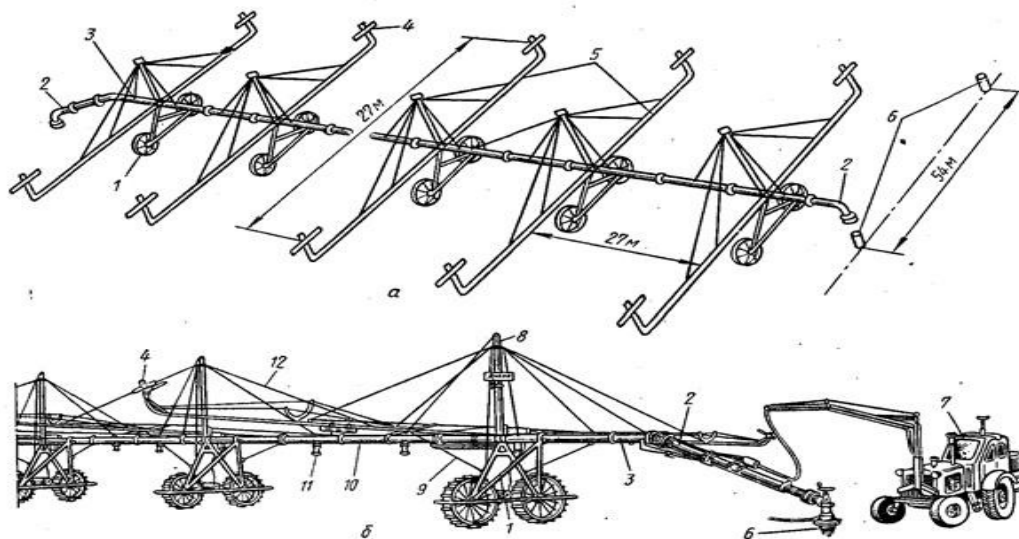


Рисунок 1.2 — Изображение принцип действия широкозахватных дождевальных машин

Дождевальная фронтальная машина ДФ-120 «Днепр» (рисунок 1.3) осуществляет передвижение с позиции на позицию электроприводом с использованием мотор-редукторов, установленных на опорных тележках. Источник энергии для электропривода — трехфазный синхронный генератор, работающий от вала отбора мощности трактора. Площадь полива с одной позиции — 2,43 га, расход воды — 120 л/с. ДФ-120 «Днепр» по сравнению с дождевальной машиной «Фрегат» быстрее переоборудуется из рабочего положения в транспортное [54; 55].



1 — опорная тележка; 2 — подсоединительный трубопровод; 3 — водопроводящий трубопровод; 4 — дождевальные аппараты; 5 — фермы-открылки; 6 — гидранты; 7 — передвижная электрическая станция; 8 — мачта; 9 — стремянка; 10 — соединительная труба; 11 — сливной клапан; 12 — система раскрепляющих тросов

Рисунок 1.3 — Устройство широкозахватной дождевальной машины ДФ-120 «Днепр»

Дождеватель колесный широкозахватный ДКШ-64А «Волжанка» в зависимости от ширины полосы захвата разводится в следующем исполнении: ДКШ-64А — 800 м, ДКШ-64А-03 — 600 м, ДКШ-64А-04 — 400 м. Машина может применяться во всех зонах орошаемого земледелия на участках с уклонами до 0,02; при минерализации воды до 6 г/л и содержании в этой поливной воде твердого осадка до 5 г/л; при скоростях ветра до 5 м/с. На машине имеется приводная тележка с двигателем внутреннего сгорания и реверс-редуктором, осуществлен монтаж дождевальных аппаратов, оборудованных соплами 7 и 8 мм, что позволяет изменять расстояние

между гидрантами (от 8 м до 24 м) [100; 101].

В последнее время широко применяются передвижные дождевальные машины ПДМ барабанного типа. Дождевальная машина ПДМ-2500 имеет гидропривод установки, подача воды на который с давлением не ниже 2 атмосфер может осуществляться как от гидранта оросительной сети, так и от автономной дизель-насосной станции, либо от водяного насоса, установленного возле водоема. Турбина гидропривода приводится во вращение от напора воды и передает момент во вращение барабану через цепную передачу. Полиэтиленовая труба диаметром 110 мм, по которой вода подается непосредственно к дальнеструйному аппарату (распылителю), может наматываться на барабан до 700 м длиной, являясь при этом тяговым элементом, обеспечивающим перемещение распылителя. Скорость сматывания полиэтиленовой трубы на барабан и, соответственно, скорость перемещения распылителя по полю может изменяться от 10 до 150 м/ч. Это достигается за счет направления части потока воды от нагнетающего насоса мимо турбин через обводящую дросселирующую магистраль. При дальности подачи воды от водоема до 2 км мощность привода насоса должна быть не ниже 40 кВт [70].

В качестве источника воды для работы дождевальных машин могут использоваться реки, озера, пруды, искусственные водохранилища, каналы, пробуренные скважины (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 — Внешний вид использования канала в качестве источника воды для полива

Источник должен обеспечивать необходимые требования по секунднему забору воды на орошение и иметь общий ее запас, достаточный для полива участка в течение всего вегетационного периода. При этом необходимо учесть также, что орошение земель сельскохозяйственного назначения, осуществляемое с забором воды из поверхностных водных объектов, может производиться лишь на основании разрешительной документации. Разрешение не требуется лишь для полива огородов и приусадебных участков. Для индивидуальных предпринимателей и должностных лиц, нарушающих требования законодательства при поливе сельхозкультур, КоАП РФ предполагает административный штраф до 30 тыс. рублей [107].

Использование ресурсосберегающих режимов орошения, повышение их энергоэффективности является ключевой задачей при поливе сельскохозяйственных культур. Так, например, в фермерском хозяйстве «Садко» Дубовского района Волгоградской области на участке площадью 0,25 га применение в течение двух лет (один год сухой, другой — острозасушливый) установки комбинированного применения нескольких локальных способов орошения, в том числе мелкодисперсного дождевания, дало положительный результат по оптимизации использования воды и поливной техники. При этом в качестве привода насоса для забора воды из скважины при фермерском хозяйстве, а также для автоматизации процессов была использована автономная электрическая станция [32].

Дождевание не вызывает подъема уровня грунтовых вод, а это предупреждает заболачивание или засоление орошаемых земель. Недостатком дождевания является высокая металло- и энергоемкость.

Для уменьшения металло- и энергоемкости при поливе с учетом того, что приоритетной задачей в России объявлен ускоренный рост малого и среднего бизнеса, в том числе в сельском хозяйстве, многие предприятия страны переходят на выпуск поливной техники, которая будет востребована в деятельности крестьянских (фермерских) хозяйств, их объединениях при кооперации, а также индивидуальными предпринимателями. Так, например, Волгоградский электромеханический завод, ранее специализировавшийся на выпуск бурильно-кранового оборудования для про-

кладки линий электропередач, начал производить самоходный колесный опрыскиватель низкого давления. Он собирается полностью из российских комплектующих, может работать на любых почвах с любыми культурами и междурядьями. Большой объем емкости для раствора и высокая степень стабилизации штанги позволяют обеспечить высокий уровень производительности. Предприятие «Завод дождевальных машин» Волгоградской области освоило производство оросительных систем барабанного типа. Предприятия Санкт-Петербурга предлагают новые дозирующие насосы, например, электромагнитный (соленоидный) насос-дозатор для нейтральных и агрессивных сред, который можно подключать к оросительным системам и дождевальным машинам [56; 94].

На сегодняшний день ведущие зарубежные производители предлагают большой выбор современных широкозахватных дождевальных машин [Pierce, Reinke (США), Bauer (Австрия), Otech (Франция), Beinlich и Irtec (Германия), Osmis и Pumps (Италия), Chamsa и RKD (Испания) и многие другие], имеющих разные ширину захвата. Характеристики машин приведены в приложениях В и Г. Производители дождевальной техники предлагают широкую линейку машин для работы на закрытых оросительных сетях низкого давления, что уменьшает энергозатраты на подачу воды к дождевальной машине, а также стоимость ее закрытой сети [68; 71].

Для повышения экономических показателей при дождевом орошении производители современных многоопорных широкозахватных дождевальных машин производят их в модификации машины кругового перемещения, но электроснабжение таких машин возможно от автономных источников электроэнергии или от спроектированной трансформаторной подстанции с прокладкой отдельной линии, что ведет к значительным экономическим затратам [63].

Чаще всего дождевальные машины располагают ближе к центру поля, а насосная станция находится на окраине. Хотя номинальная мощность относительно не велика (до 15 кВА) появляется необходимость существенно завышать сечение линии электроснабжения (с учетом нормированного падения напряжения на электрооборудовании дождевальной машины). Как было подмечено (Ильченко) при удалении на 400 м от линий электропередач при питании электроустановки мощностью

10 кВт рентабельно использовать потенциал автономных и резервных источников. Все эти особенности приводят к ограничению дождевальных машин кругового действия [6; 17].

1.2 Электрооборудование и режимы работы дождевальных машин кругового действия и способы их электроснабжения

В настоящий момент для орошения пахотных земель самыми распространенными системами являются дождевальные машины. Различают дождевальные машины кругового и фронтального действия (рисунок 1.5).



а) кругового действия



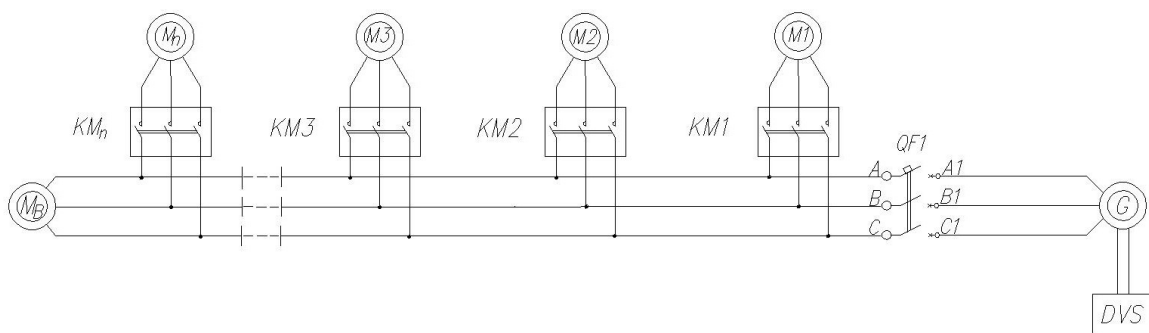
б) фронтального действия

Рисунок 1.5 — Внешний вид оборудования дождевальных машин

С позиции мелиорации дождевальные машины фронтального действия имеют ряд достоинств: равномерное орошение земель, большой охват площади орошения и т. п., однако сложность в организации движения ограничивает возможность их применения. Это связано с многими факторами, например, необходимо иметь доступ к забору воды в каждой плоскости движения машины или быть подключенным к общему гибкому водопроводу; иметь соответствующий запас энергетических ресурсов (электроэнергия, газосмазочные материалы и т. п.); иметь возможность выпол-

нения технических функций с учетом различных условий, препятствий и ограничений, возникающих при движении [1; 47; 48].

С технической точки зрения движение дождевальной машины кругового действия организовать легче, к оси вращения подводится водопровод от центральной системы водоснабжения, либо проектируется насосная станция с забором воды из водоема или скважины. Таким образом, забор воды осуществляется с одного неподвижного места с помощью насоса, мощность которого определяется по характеристикам трубопровода машины. Круговое движение электрифицированной дождевальной машины выполняется дискретно по секциям, согласно заданному алгоритму. В соответствии с геометрией перемещения дождевальной машиной как единого целого режим работы предусматривает поочередное включение электродвигателей секций, который практически исключает одновременный пуск (рисунок 1.6). Каждая опорная тележка — секция проходит различный путь, пропорционально которому требуется обеспечить различную продолжительность работы электропривода с асинхронными электродвигателями одинаковой мощности и частотой оборотов [7]. В связи с этим нагрузочная диаграмма установки имеет неравномерный вид. На рисунке 1.7 изображен график потребляемого тока дождевальной машины кругового действия Centerstar 168 EL в течении времени работы.



$M1...M_n$ — электродвигатели тележек для перемещения, M_B — электродвигатель бустерного процесса, G — автономный генератор, $KM1...KM_n$ — контактор

Рисунок 1.6 — Принципиальная электрическая схема электроснабжения электрооборудования дождевальной машины от автономного генератора

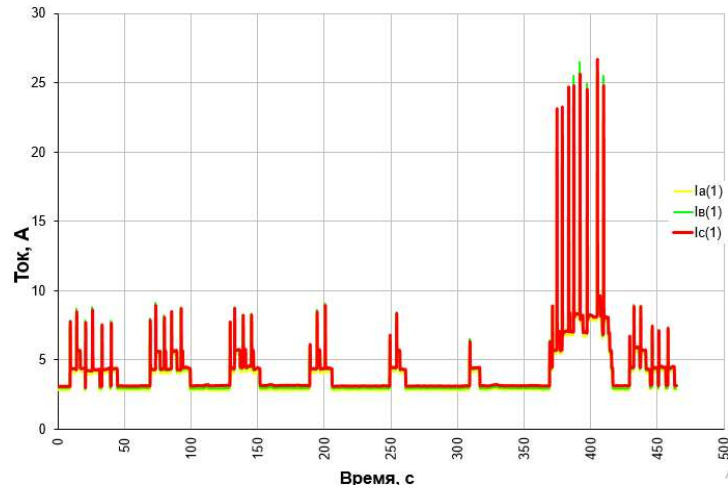


Рисунок 1.7 — График потребляемого тока дождевальной машины кругового действия в течении времени работы

На отечественных дождевальных машинах Кубань и ряда других зарубежных аналогов может реализовываться другой алгоритм работы секций. Так как движение дождевальной машины организуется по кругу, то секции проходят разное расстояние, поэтому крайняя тележка является опорной, при ее включении остальные включаются дискретно и подстраиваются таким образом, что при отклонении последующей секции на определенный угол автоматически включается электропривод предыдущей тележки, при этом возможно одновременное включение электродвигателей тележек, что приводит к выбору источника энергии большей мощности, чтобы удовлетворять величине нагрузки в каждый момент времени ее действия, т. е. с запасом. При монтаже изначально все секции дождевальной машины выстраиваются в прямую линию с допуском искривления относительно оси не более 2 % под контролем датчиков GPS. При практическом применении работа тележек может отличаться от идеальной из-за механических потерь при пробуксовке колес или сложных рельефных параметров поверхности поля. Настройка автоматизирования работы системы только на основании временных параметров не допускается [34].

Наличие частых пусков электродвигателей с короткозамкнутым ротором определяет необходимость использования дополнительных способов для снижения пус-

ковых токов. Высокие пусковые токи приводят не только к завышенным энергетическим потерям, но и к существенным потерям напряжения в питающей линии. В большей степени это относится к электродвигателям бустерных насосов мощностью от 3 до 7,5 кВт, которые обеспечивают требуемый напор на последней тележке дождевальной машины и обеспечивают полив дополнительных площадей, вследствие чего они располагаются в самой удаленной точке подключения, так как движение опорных тележек осуществляются через редуктор электродвигателями меньшей мощностью от 0,55 до 1 кВт [3; 5; 72], вследствие чего из-за высоких пусковых токов бустерных насосов завышается сечение питающей линии (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 — Полив бустерным насосом

Для определения потребляемого тока при пуске асинхронного двигателя бустерного насоса или приводных тележек достаточно провести два опыта — опыт холостого хода и опыт короткого замыкания. Определялись величины тока холостого хода I_0 (А) при номинальном напряжении U_H и потеря мощности холостого хода P_0 (Вт) при номинальном напряжении и частоте [57].

Для определения потребляемого тока при пуске асинхронного двигателя бустерного насоса или приводных тележек можно рассчитать активную и реактивную составляющие тока статора, которые определяются последующим формулам:

$$I_{1a} = I_{0a} + \frac{I_2'}{C_1} \cos \varphi_2'; \quad I_{1P} = I_{0P} + \frac{I_2'}{C_1} \sin \varphi_2'. \quad (1.1)$$

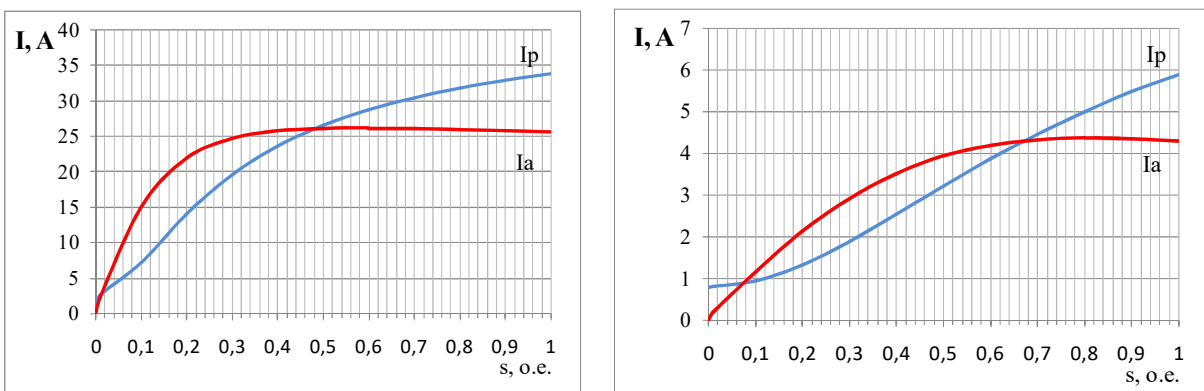
Ток ротора и косинус угла определяется после определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Ток ротора:

$$I'_2 = \frac{U_{H\Phi}}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}}. \quad (1.2)$$

Косинус угла между вектором тока ротора и его активной составляющей:

$$\cos\varphi'_2 = \frac{\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}}. \quad (1.3)$$

Результат расчета токов приведены на рисунке 1.9



а) бустерного насоса мощностью 3 кВт

б) тележки для обеспечения кругового движения мощностью 0,55 кВт

Рисунок 1.9 — Электромеханическая характеристика с разделением на активную и реактивную составляющую потребляемого тока для электродвигателей

Расчет электромеханической характеристики показал, что при пуске электродвигателя реактивная составляющая потребляемого тока существенно больше чем активная. Реактивный ток заметно снижает пропускную способности сети. Нахождение реактивного тока по проводам так же затрачивается определенная часть активной энергии. Потери мощности определяются как $\Delta P = 3R \cdot I^2$, где I — полный ток. Передача реактивной мощности оказывает влияние на режимы напряжения, снижение напряжения приводит к увеличению потерь электроэнергии и снижению пропускной способности сетей. Поэтому снижение реактивной составляющей тока ведет к существенному снижению электрических потерь для дождевальных машин,

так как их питание осуществляется по сетям электроснабжения низкого напряжения большой протяженностью [108; 117].

Многими авторами обозначается проблема местной компенсации реактивной мощности с целью уменьшения реактивной составляющей тока для разгрузки питающей линии. Так Бакировым предлагается местная компенсация реактивной мощности электродвигателей приводных тележек дождевальных машин, при этом конденсаторы с блоком управления являются дополнительной установкой [3; 4; 5; 7; 8].

В дождевальных машинах в качестве источника энергии системы энергоснабжения используют гидрогенератор [79]. Тогда первоисточником будет также насос водоподачи. Кинетическая энергия потока поливной воды в гидрогенераторе преобразуется во вращательное движение через насос, установленный перед водораспределительным трубопроводом дождевальной машины. Такие генераторы применяют в условиях сложности подведения кабельной линии. Зоны оптимального применения различных систем энергоснабжения зависят от площади поливного участка и требуемого давления на входе дождевальной машины, исходя из чего применение автономного электроснабжения рекомендовано на поливных площадях до 10 га [50; 125; 127].

Таблица 1.1 — Сравнение дождевальных машин

	Название дождевальной машины	Тип дождевальной машины	Длина дождевальной машины, м	Привод движения (перемещения)	Источник энергии	Площадь поля, га: общая поливная	Бустерный насос
1	Дождевальные машины «Reinke»	Широкозахватные электрифицированные, машины фронтального и кругового действия	от 31 до 600 м	Электрический привод (мотор-редукторы 0,75 л. с. и более)	Бортовые дизель-генераторы от 6кВт до 20 кВт 380В/480 В	от 2 до 80 га	Тип насоса RFB72 (трехфазный)

2	Дождевальные машины «Valley»	Широкозахватные электрифицированные, машины фронтального, фронтального с разворотом	от 100 до 1000 м	Электромеханический привод с помощью мотор-редукторов опорных тележек	Энергосиловой установкой (дизель-генератором) 380В/480 В	от 130 до 607 га	Насосы мощностью 2 — 5.5 КВт
3	Дождевальные машины фирмы «Bauer»	Самопередвигающиеся, фронтального перемещения	от 102 до 1200 м	Электромеханический с помощью мотор-редукторов опорных тележек	Энергосиловой агрегат (дизель-генератор) Marelli MSB-4B 380В/480 В	до 100 га	Тип насоса RFB72 (трехфазный)
4	Дождевальная машина «Chamsa»	Широкозахватная, многоопорная (многопролетная) дождевальная машина кругового действия	Конструкционная длина системы — 420 м	Электромеханический с помощью мотор-редукторов опорных тележек	Генератор мощностью — 13 кВт 380В/480 В	до 59,7 га	Не используется
5	Дождевальные машины компании «RKD»	Автоматизированные дождевальные системы кругового, фронтального и ипподромного перемещения	Конструкционная длина поливной полосы до 140 м	Электромеханический с помощью мотор-редукторов опорных тележек	Возможность установки дизельного или электрического привода 380В/480 В	от 100 до 200 га	Насосы мощностью 2 — 5.5 КВт

Мощность дождевальных машин относительно невелика и не превышает 15 кВА, но срыв электроснабжения может привести существенному ущербу [90]. Для автономного электроснабжения дождевальных машин используются бензиновые с 2- или 4-тактным двигателем и дизельные с 4-тактным — генераторные установки с частотой вращения 3000 об/мин (генераторы, работающие на такой частоте, дешевле и меньше, но гораздо более шумные) и 1500 об/мин (более тихие, с меньшим расходом и более высоким ресурсом) приводящиеся во вращение, наработка на отказ от

4000 до 20000 часов. В последнее время появляются автономные генераторы, которые приводятся в действие природными источниками энергии — ветровые генераторы, солнечные батареи и гидравлические системы. Пока эти системы обладают высокой стоимостью, низкой надежностью электроснабжения и подходят к электроустановкам небольшой мощности [37].

Запуск автономных источников осуществляется вручную посредством раскручивания коленвала двигателя до нужной для запуска частоты или электростартерный. В настоящее время генераторные установки дополняются автоматизированными системами управления, позволяющие осуществить интеграцию в сельскохозяйственные процессы с дистанционным управлением и мониторингом выходных параметров генератора [105; 121].

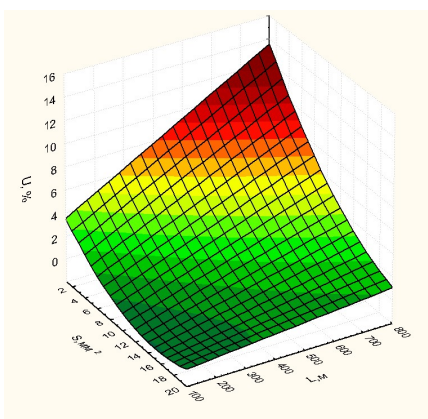
По виду генератора переменного тока выполняют синхронные и асинхронные однофазного и трехфазного исполнения. Обладая более сложной конструкцией синхронные генераторы лучше адаптированы к питанию активно индуктивной и двигательной нагрузки. Серийные автономные источники с асинхронными генераторами выпускаются с инверторным преобразователем для формирования стабилизированного выходного напряжения устойчивой частоты. Хотя конструктивно асинхронные генераторы проще и дешевле сложность в стабилизации параметров напряжения и частоты является существенным ограничением их использования. Кроме того, для компенсации размагничивающего тока нагрузки асинхронным генераторам необходим источник реактивной энергии, которым является блок конденсаторов [98; 99].

В автономных асинхронных генераторах источником реактивной мощности являются конденсаторы, т. е. дополнительная установка блока конденсаторов является технологической необходимостью. Задача компенсации реактивной мощности для дождевальных машин может решаться разделением конденсаторных установок на основную и дополнительную, основная служит для создания необходимого тока возбуждения в генераторе, а дополнительная — для компенсации, реактивной составляющей тока электродвигателей. Причем дополнительный блок устанавливается непосредственно в конце линии для разгрузки линии, а основной блок конден-

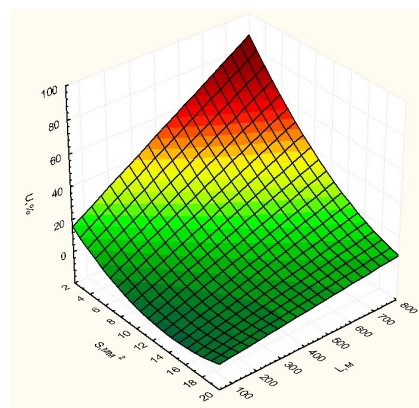
саторов возле асинхронного генератора, так как подключение основного блока конденсаторов приведет к перекомпенсации, и требуемый эффект разгрузки линии не будет достигнут [102; 103].

Снижение тока в линии особо актуальна для дождевальных машин, так как питающая линия электродвигателей приводных тележек и бустерного насоса может достигать 1000 м, что может приводить к завышению сечения питающего кабеля. Расчет потери напряжения в питающей линии ведется согласно действующему ГОСТу 50571.5.52-2011/МЭК 60364-5-52:2009 1 (рисунок 1.10).

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I (r_0 \cdot \cos \varphi \cdot L + x_0 \cdot \sin \varphi \cdot L) \quad (1.4)$$



а) при работе



б) при пуске

Рисунок 1.10 — Падение напряжения в зависимости от длины и сечения питающей линии бустерного насоса мощностью 3 кВт

Согласно расчетам с увеличением длины линии до 700 м (рисунок) сечение питающей линии необходимо увеличить в несколько раз. Причем согласно рисунку 11 реактивная составляющая тока существенно изменяется в течении пуска электродвигателя, поэтому для точной компенсации реактивной составляющей тока необходимо разделить дополнительный блок конденсаторов на пусковую и рабочую емкость [82].

Устройства управления такой емкостью конденсаторов широко рассмотрены в разных источниках [104]. В общем принцип действия основан на времени включения конденсатора определенной емкости с последующим переключением на конденса-

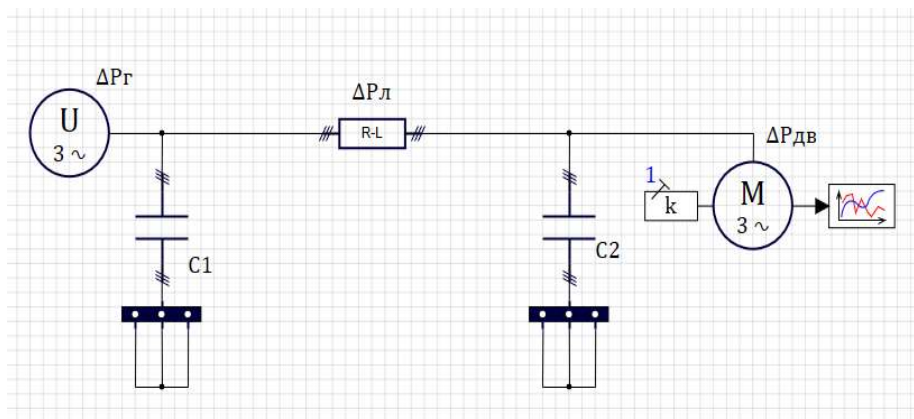
торы меньшей емкости или плавного снижения емкости конденсатора за счет отслеживания реактивной составляющей тока. Последний способ является более дорогим, так как приводит к проектированию более сложного блока управления.

1.3 Способы снижения потерь энергии в установках, анализ схем обмоток асинхронных генераторов

Для компенсации реактивной мощности в электрических сетях на напряжение до 1 кВ, как правило, применяются батареи конденсаторов (БК) которые подключаются в виде местной компенсации на выводы нагрузки. Критерием оптимального распределения конденсаторов в электрической сети является минимум суммарной активной мощности, выделяющейся в проводниках, при прохождении по ним реактивной мощности [24; 25; 26; 27; 28; 29]. Конденсаторные установки в таких сетях целесообразно распределять пропорционально реактивным нагрузкам. Электроснабжение дождевальной машины происходит по магистральной сети с ответвлениями на питание электроприводов тележек и бустерного насоса [88; 89]. Стоимость БК является нелинейной функцией ее мощности, поэтому снижение необходимой емкости конденсаторных батарей для возбуждения асинхронного генератора и компенсации реактивной мощности является актуальной задачей. Электрические потери при электроснабжении электрооборудования дождевальной машины можно разделить на три составляющие (рисунок 1.11) — ΔP_r (потери электрические в генераторе), ΔP_l (потери электрические в линии) и $\Delta P_{дв}$ (потери электрические в двигателе).

Для снижения электрических потерь в асинхронном электродвигателе известен способ пуска при пониженном напряжении. Снижение напряжения достигается переключением обмотки статора с помощью переключателя с нормальной схемы Δ на пусковую схему Y . При этом напряжение, подаваемое на фазы обмотки статора, уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, что обуславливает уменьшение фазных токов $\sqrt{3}$ раз и линейных токов в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают обратно на нормальную схему или устройств регулирования напряжения. Недостатком указанных методов пуска

путем понижения напряжения является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения, поэтому этот способ хорошо подходит для пуска бустерного насоса с квадратичной характеристикой нарастания момента сопротивления при увеличении скорости [67].



C1, C2 — конденсаторы возбуждения, R-L — Сопротивление линии, U — источник питания, M — электродвигатель насоса, ΔP_{Γ} — потери электрические в генераторе, $\Delta P_{\text{л}}$ — потери электрические в линии, $\Delta P_{\text{дв}}$ (потери электрические в двигателе)

Рисунок 1.11 — Упрощенная принципиальная схема электроснабжения дождеваль-
ной машины (схема выполнена в программе SimInTech)

Таким образом уменьшение пускового тока электродвигателя вместе с компенсацией реактивного тока в линии электроснабжения дождевальных машин за счет конденсаторов возбуждения асинхронного генератора является комплексным решением снижения электрических потерь [118; 119].

Свойство обратимости электрических машин позволяет асинхронную машину применить в качестве генератора в автономных электростанциях. Асинхронные генераторы с коротко замкнутым ротором положительно характеризуются малыми габаритами и прочностью ротора. Недостаток асинхронных генераторов автономных электростанций связан со сложностью регулирования тока возбуждения для компенсации размагничивающего действия индуктивных составляющих токов нагрузки и ротора [74; 75].

В серийных асинхронных электродвигателях основного исполнения чаще применяют простые однослойные концентрические обмотки, так как требуют меньше расход изоляционных материалов и реализовать ее проще для механизированной укладки в пазы статора. Однако использование статорных обмоток для асинхронных машин не рационально, так как они рассчитываются для двигательного режима, например, на меньшую ЭДС, вследствие чего асинхронный генератор с серийной обмоткой статора будет обладать большими электрическими потерями, степень размагничивания тока ротора будет выше, а КПД машины низким [57; 60].

За рубежом описаны теории формирования статорных обмоток асинхронных машин и разработаны варианты промышленноприменяемых вариантов переключаемых статорных обмоток с целью формирования различных пусковых моментов. Однако при использовании таких обмоток статора в асинхронных машинах это приведет к изменению пар полюсов, т. е. для сохранения необходимой выходной частоты тока асинхронного генератора приводному двигателю при переключениях необходимо ступенчато регулировать частоту вращения.

В результате исследований автономных источников с асинхронными генераторами сформировались определенная теория и практика [86; 87]. Так, Ивановым в середине прошлого столетия были сформированы основные направления разработки систем стабилизации напряжения автономных асинхронных генераторов, исследования подкреплены экспериментальными данными с определением основных характеристик электрической машины, было показана возможность практического применения в народном хозяйстве. В дальнейшем исследованием асинхронных генераторов в разное время занимались Алюшин Г. Н., Баракин Н. С., Богатырев Н. И., Ванурин В. Н., Вронский О. В., Григораш О. В., Джендубаев А.-З. Р., Зубков Ю. Д., Екименко П. П., Кицис С. И., Кунцевич П. А, Лесник В. А., Лищенко А. И., Оськина А. С., Синицин А. С., Торопцев Н. Д., Фаренюк А. П., Фильц Р. В. и другие авторы.

Повышение стабилизирующих свойств асинхронных генераторов можно достичь двумя способами — разработкой принципиальной схемы возбуждения или разработкой схемы статорной обмотки, обладающей лучшими стабилизирующими

напряжения свойствами. Пусковые токи электродвигателей оказывают существенное размагничивающее воздействие на асинхронный генератор, поэтому производители используют оба способа. Для уменьшения размагничивающего воздействия от токов нагрузки и от возбуждения, следовательно, степени размагничивания током нагрузки в асинхронных генераторах известных производителей чаще применяют автотрансформаторный вариант обмотки статора [9]. Стартовые конденсаторы подключаются к основным конденсаторам на время пуска трехфазных асинхронных двигателей или при значительном снижении напряжения.

Для пуска электродвигателя необходимо предусмотреть пусковые конденсаторы для стабилизации напряжения асинхронного генератора, которые можно подключить последовательно или параллельно нагрузке.

Первый способ описан в [80] и имеет ряд недостатков, таких как применение способа стабилизации напряжения компаундированием возбуждения ограничивается из-за пониженных массовых показателей компаундирующих конденсаторов и возникновением перенапряжений на конденсаторах при перегрузках и коротких замыканиях. При этом расчетная мощность конденсаторов

$$Q = mI_n^2 \frac{1}{\omega C_k}. \quad (1.5)$$

Второй способ, изменение емкости шунтирующих конденсаторов, позволяет осуществить стабилизацию величины напряжения путем применения переменной возбуждающей емкости или по сути эквивалентно изменению силы тока возбуждения машины, а следовательно, и ее ЭДС. Расчетная емкость необходимых пусковых конденсаторов [2].

$$C = \frac{P_n (tg \varphi_g + tg \varphi_n)}{3U_c^2 \omega_1}. \quad (1.6)$$

где φ_r и φ_n — углы сдвига фаз между напряжения и тока соответственно генератора и нагрузки; P_n — активная мощность при пуске электродвигателя, Вт; U_c — напряжение на обкладках конденсаторов, В.

В Кубанском ГАУ на кафедре электрических машин и электропривода была сформирована научная школа по исследованию автономных асинхронных генераторов под руководством профессора Н. И. Богатырева в результате работы которой были защищены диссертации Баракиным Н. С., Вронским О. В., Екименко П. П., Ильченко Я. А., Сеницыным А. В., Оськиной А. С. Авторами широко исследовался вопрос проектирования статорных обмоток асинхронных генераторов с целью увеличения их функциональности (выполнения на разные уровни напряжения и частоты), КПД, стабилизирующих свойств. Результаты исследования Н. И. Богатырева были внедрены в серийное производство сварочных агрегатов АДБ-13 и электроагрегаты АБ2-Т230, АБ4-Т230 и др. В его работах рассмотрены как принципиальные схемы стабилизации выходного напряжения асинхронного генератора, так и статорные обмотки автономных источников питания для различных сельскохозяйственных процессов [11; 14; 15].

В работах Ильченко Я. А. было подмечено, что строительство стационарных систем электроснабжения связано с высокими затратами. Так, расчет по укрупненным показателям стоимости 1 км линии 0,38 кВ составляет 800 тыс. руб. на 2013 г., в этом случае наиболее перспективным решением вопросов электрификации удаленных объектов является применение автономных систем электроснабжения. Автономные источники электрической энергии для таких сельскохозяйственных объектов должны быть конструктивно простыми и надежными с эксплуатационной точки зрения. В работе предлагалось использовать асинхронный генератор с статорной обмотки в виде «скользящий треугольник», что позволяет компенсировать индуктивный ток нагрузки и генератора емкостью возбуждающих конденсаторов. Такая обмотка конструктивна сложна так как является многофункциональной и рассчитана на частоту тока 50 и 200 Гц (рисунок 1.12). А осциллограммы токов подключаемых двигателей к асинхронному генератору свидетельствуют о высоком пусковом токе пятикратно превышающим номинальный ток [35].

В работах Екименко П. П. в качестве источника питания для замеров холостого хода силовых трансформаторов предлагалось использовать автономный асинхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой статора.

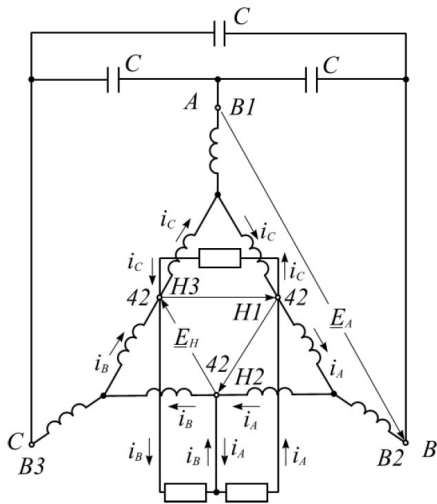
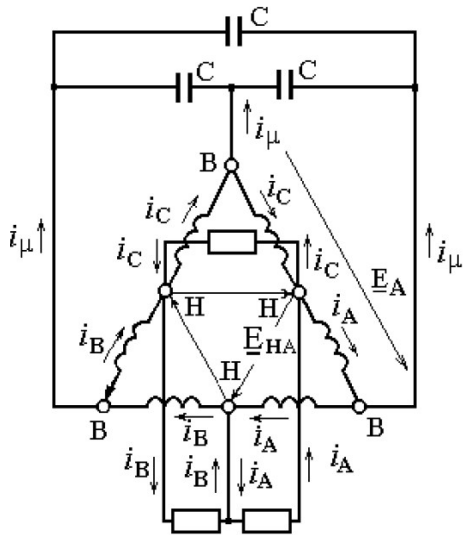
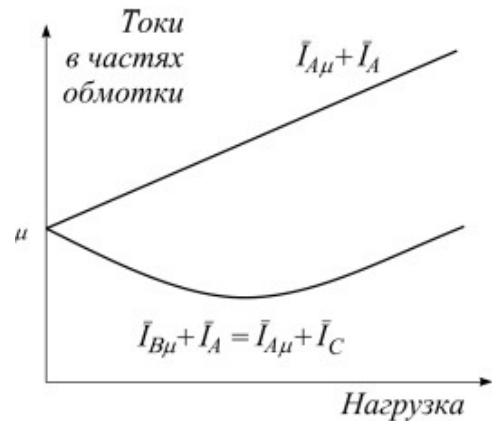


Рисунок 1.12 — Схема обмоток на 8 полюсов с указанием токов нагрузки

Схема модулированной обмотки с чередованием катушек в группах 3–3 и шагом $y = 15$ позволяет выполнять катушки частей обмотки из проводников разного сечения и располагать проводники разного сечения в одних и тех же пазах, что позволяло проектировать статорную обмотку с наименьшими электрическими потерями (рисунок 1.13).



а) Схема обмотки с чередованием катушек в группах 3–3



б) Характер изменения тока нагрузки и в частях обмотки

Рисунок 1.13 — Асинхронный генератор для замеров холостого хода силовых трансформаторов

Автономный асинхронный генератор адаптирован для использования в электротехнической лаборатории при измерениях потерь холостого хода и позволял регулировать симметричное (каждое из линейных напряжений отличается не более чем на 3 % от среднего арифметического трех линейных напряжений системы) и синусоидальное (отношение действующего значения напряжения к среднему отличается от 1,11 не более чем на ± 2 %) выходное напряжение: $(0,8-1,05) U_n$ или $(320-420)$ В.

В работах Ванурина подробно описаны принципы проектирования асинхронных генераторов. Используя матричный способ формирования обмоток статора, который подразумевает, что чередование сторон катушек катушечных групп в цепном варианте совпадает с их чередованием при преобразовании МДС фазных обмоток по известному методу полюсно-амплитудной модуляции. В результате преобразований согласно полученной схеме статорной обмотки формируется определенная МДС, качество которой оценивается коэффициентом дифференциального рассеивания, последний определяется по диаграмме Гёргесса (рисунок 1.14) [38; 39; 40; 41; 42].

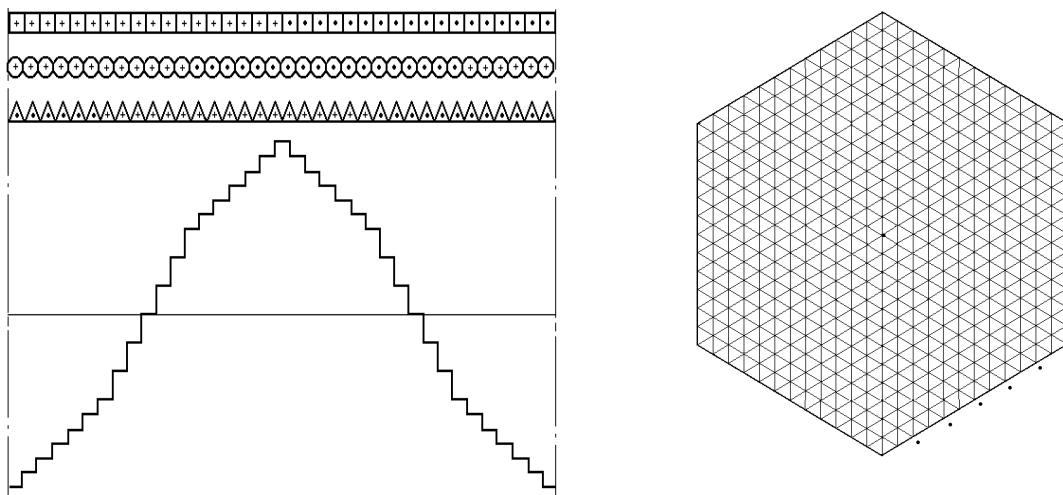
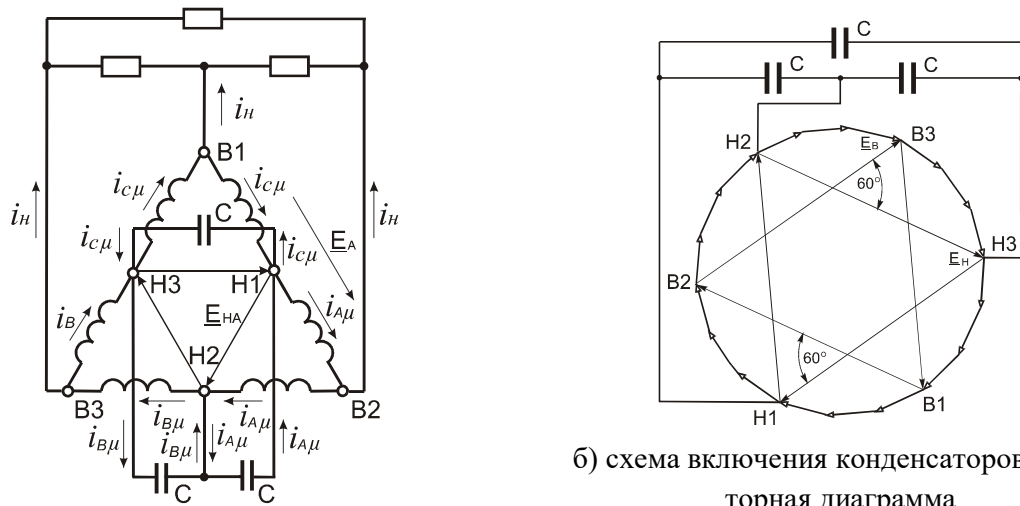


Рисунок 1.14 — МДС и диаграмма Гёргесса двухполюсной обмотки

В работах Баракина были даны рекомендации по проектированию обмотки статора асинхронного генератора согласно описанному выше методу. Он позволяющей рационально использовать габарит электрической машины и обеспечивающей

максимальную загрузку асинхронного генератора с нормированным качеством электрической энергии (рисунок 1.15). Однако в этих исследованиях не рассматривались подробно случаи с подключением двигательной нагрузки, решением являлась подключение дополнительных пусковых конденсаторов вместе с электродвигателем, что приводит к появлению большого пускового тока.

Из зарубежных публикаций можно выделить ориентирование на применение асинхронных генераторов в составе возобновляемых источников питания. Требуемая стабилизация напряжения, в которых достигается использованием специального инверторного преобразователя [130; 131; 132; 133].



а) Схема подключения нагрузки

б) схема включения конденсаторов и векторная диаграмма

Рисунок 1.15 — Схема шестизонной обмотки статора АГ

Инверторная схема управления позволяет пуск электродвигателя сделать плавным и преобразовав напряжение с выводов генератора при помощи обратных связей стабилизировать его. Использование инвертора по нашему мнению оправдано в ветроустановках где частота вращения варьируется в широком диапазоне, но пока высокая стоимость преобразователя сдерживает их применение в автономных асинхронных генераторах и что важно для сельского хозяйства имеет меньшую надежность [112].

Ряд иностранных работ посвящены изменению роторной обмотки с целью получения жестких внешних характеристик генератора. Усложнение конструкции асинхронного генератора, применяемого в сельскохозяйственных процессах приведет к невилированию главных преимуществ — высокая надежность и эксплуатационные характеристики [123; 124].

1.4 Выводы по первой главе

Режим работы и нагрузочные диаграммы дождевальных машин показывают наличие частых пусков асинхронных двигателей тележек и бустерного насоса. Из расчетов пусковых токов согласно Т-образной схемы замещения пусковой ток может превышать в пять раз номинальный, причем реактивная составляющая тока — в два раза превышать активную, что приводит к необходимости завышать сечение питающей линии, которая может достигать 1000 м. Нами предлагается использовать автономный асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора для снижения пускового тока для которого дополнительная установка блока конденсаторов является технологической необходимостью, но которую возможно использовать в целях компенсации реактивной составляющей тока.

Научная проблема состоит в следующем: существующие способы стабилизации выходного напряжения асинхронного генератора не способны осуществить снижение пускового тока асинхронных электродвигателей с одновременной компенсацией реактивной составляющей тока что ведёт к увеличению сечения питающей линии и мощности генератора или использованию дополнительных устройств.

Рабочая гипотеза — используя график электрической нагрузки и учитывая требования к качеству электроэнергии, можно разработать асинхронный генератор автономного источника с особой конструкцией переключаемой обмоткой статора для снижения электрических потерь в дождевальных машинах кругового действия.

Целью работы является обоснование параметров и режимов переключаемой обмотки статора асинхронного генератора дождевальных машин кругового действия, позволяющие снизить электрические потери.

Задачи исследования:

1. На основе современной матричной теории разработать переключаемую статорную обмотку статора асинхронного генератора позволяющая снизить пусковые токи мобильных поливных агрегатов.

2. Разработать математическую модель асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора при подключении двигательной нагрузки и проверить ее работоспособность в пакете MathCad.

3. Рассчитать, изготовить и провести лабораторные исследования экспериментального образца асинхронного генератора с автотрансформаторной переключаемой обмоткой статора и сравнить с характеристиками генератора с серийной обмоткой статора.

4. Провести сопоставление теоретически и экспериментально полученных осциллограмм токов и напряжения асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора при пуске электродвигателей мобильных поливных агрегатов.

5. Выполнить технико-экономическое обоснование эффективности применения асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора для питания мобильных поливальных агрегатов.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА

2.1 Математическое описание асинхронного генератора и параметры переключаемой обмотки статора

Для практики результаты исследования переходных режимов позволяют расчетным путем оценить свойства машины в динамике и на этой основе разработать рекомендации по обеспечению требований технического задания при создании АГ, на стадии проектирования оптимизировать параметры генератора и его системы возбуждения и т. п. [119].

Широко освещены режимы самовозбуждения асинхронного генератора и наброса или сброса активной и активно-индуктивной нагрузки. Математическая модель АГ в таких переходных режимах с учетом насыщения магнитной цепи достаточно сложна и представляет собой систему нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений, для решения которой используется ряд классических методов математического исследования электрических машин — метод вращающихся амплитуд магнитных полей, метод преобразования координат, метод потокосцепления и др., которые применяются в рамках принятых при рассмотрении допущений [62].

При математическом описании АГ принимаем следующие допущения: существует синусоидальное распределение магнитного поля и МДС вдоль воздушного зазора; наличие симметрии магнитопровода относительно осей α , β и γ ; отсутствие потерь в стали и вытеснения тока в проводниках; независимость сопротивлений рассеяния от пространственного положения ротора; постоянство активных сопротивлений обмоток; токи во всех обмотках переменного тока принимаются синусоидальными, величина потока взаимной индукции не влияет на индуктивные сопротивления; рассеяния обмоток статора и ротора принимаются постоянными; гистерезис стали статора и ротора не учитывается, магнитопровод насыщается равномерно во всем объеме [10; 36; 119].

Использование асинхронного генератора в качестве автономного источника электроснабжения дождевальной машины является комплексным решением, так как для возбуждения асинхронного генератора используются конденсаторные установки которые можно использовать для компенсации реактивной мощности с целью уменьшения электрических потерь в линии. Для этого конденсаторные установки возбуждения асинхронного генератора разделяют на основные и дополнительные. Дополнительные конденсаторные установки устанавливаются в самой удаленной точке электроснабжения (бустерный насос) и подбирают емкость таким образом, чтобы скомпенсировать реактивную мощность электроприемников.

Характерной особенностью автотрансформаторных обмоток статора асинхронного генератора является возможность подключения конденсаторов на более высокое напряжение, вследствие чего уменьшается необходимая емкость возбуждения, при этом часть статорной обмотки одной фазы используется для возбуждения генератора [9; 14]. Генератор с такой схемой статорной обмотки возможно соединить как в автотрансформаторную звезду (при этом напряжение на выводах Н1–Н3 будет 380 В), так и в звезда — треугольник (напряжение на выводах Н1–Н3 составит 220 В) (рисунок 2.1). Переключение обмоток статора асинхронного генератора позволит запустить двигательную нагрузку соизмеримую с мощностью автономного источника без потери возбуждения [43; 45].

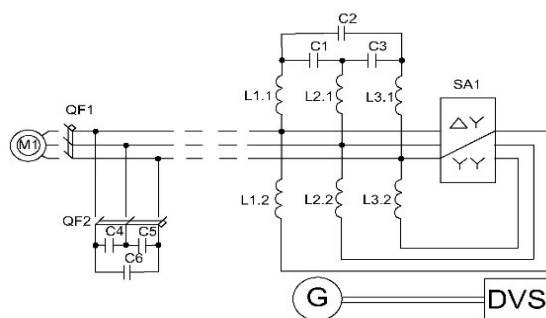


Рисунок 2.1 — Схема переключаемой обмотки статора асинхронного генератора с включением конденсаторов треугольником для питания двигательной нагрузки

Отсюда следует, что при включении резервной электростанции с асинхронным генератором для питания электрооборудования поливного агрегата со схемой ста-

торной обмотки звезда — треугольник с последующим переключением на автотрансформаторную звезду позволит снизить пусковой ток в $\sqrt{3}$ раза, при этом пусковая емкость конденсаторов для возбуждения значительно уменьшается.

Уменьшить размагничивание асинхронного генератора можно, например, большим насыщением магнитопровода, а также и соотношением амплитуд МДС токов нагрузки и тока возбуждения, применяя в генераторе автотрансформаторный вариант статорной обмотки (рисунок 2.2) [10; 15].

Так, если фазу обмотки статора представить в виде двух частей, сдвинутых на определенный угол θ и нагружать только одну часть, то ток активной нагрузки и ток возбуждения будет суммироваться векторно, что поясняет рисунок 2.2 (активные сопротивления частей обмоток не изображены на рисунке). Нагрузив часть обмотки В1-1 (ток нагрузки в этом случае $I_{В1-1}$), как на рисунке 2.2, б) падение напряжения на обмотке уменьшит напряжение на конденсаторах, что в свою очередь уменьшит возбуждение генератора [10].

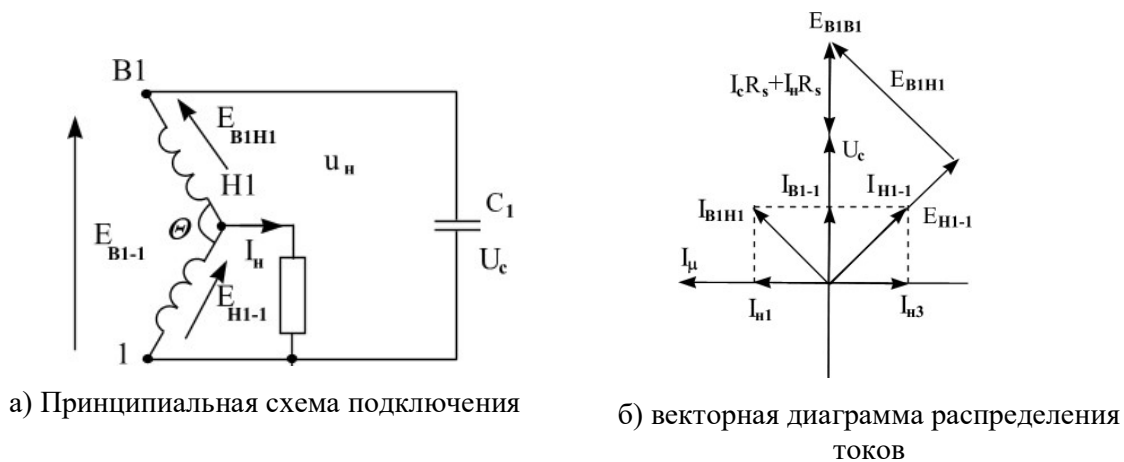


Рисунок 2.2 — Часть автотрансформаторной обмотки статора с подключенной нагрузкой и емкостью возбуждения

Однако, если нагрузить части обмотки В1–Н1 и Н1-1 (токи нагрузки в этом случае $I_{В1-Н1}$ и $I_{Н1-1}$), то сумма токов в этих частях будут меньше или больше по величине, о чем свидетельствует векторная диаграмма (рисунок 2.3, б). Такое же распределение токов будет происходить и в частях обмотки статора других фаз при подключении симметричной трехфазной нагрузки, только эти токи будут смещены на

фазовый угол.

Распределение токов в частях обмотки статора одной фазы наглядно показаны на векторной диаграмме (рисунок 2.3, а) при подключении активной нагрузки. При этом можно наблюдать вначале снижение в общей части обмотки Н1-1 суммарного тока (векторная сумма токов нагрузки и конденсаторов), а затем его плавное возрастание, о чем свидетельствует векторная диаграмма распределения токов асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой (рисунок 2.3, а). Вначале (при отсутствии нагрузки) в двух частях обмоток проходит только ток конденсаторов, параллельные линии и результирующие вектора в общей части обмотки показаны с меньшей толщиной и показывают векторы возможного увеличения тока нагрузки. На векторной диаграмме показан треугольник токов — нагрузки, конденсаторов и результирующего тока, случай с наименьшим током в общей части обмотки Н1-1 выделен жирными линиями. Если изменить направление вращения или угол θ на противоположно зеркальный, то получится увеличение суммарного тока в общей части обмотки Н1-1 о чем свидетельствует векторная диаграмма (рисунок 2.3, б) [21; 22].

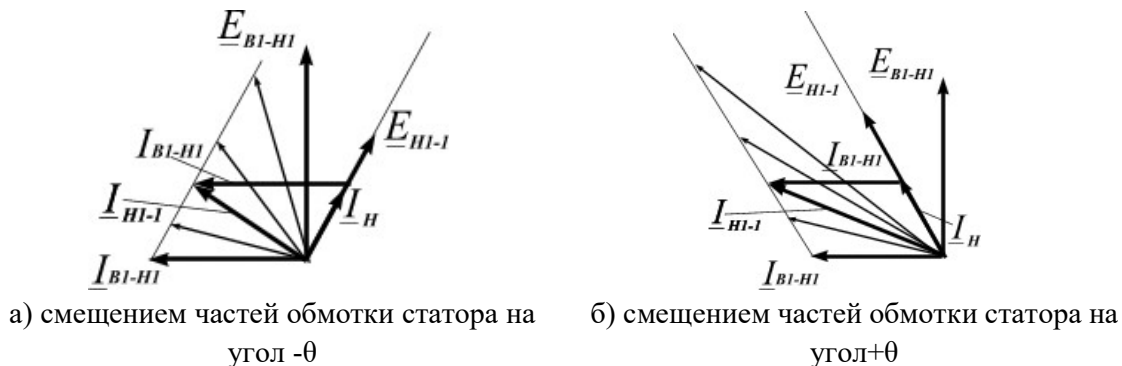


Рисунок 2.3 — Векторная диаграмма распределения токов в автотрансформаторной обмотке с подключенной активной нагрузкой

Случай подключения к автотрансформаторной обмотке реактивной нагрузки, сохранив смещение на определенный угол частей обмоток одной фазы, показан на рисунке 2.4. Вектор нагрузки в этом случае смещается на 90° от вектора ЭДС E_{H1-1} , в этом случае тоже будет наблюдаться вначале снижение с последующем нарастанием

тока в обмотке Н1-1 при увеличении индуктивной нагрузки. Если изменить направление вращения или угол θ на зеркальный, то получится меньшее размагничивающее воздействие от токов нагрузки, о чем свидетельствует векторная диаграмма (рисунок 2.4), характер изменения тока в общей части обмотки Н1-1 генератора сохранится такой же.

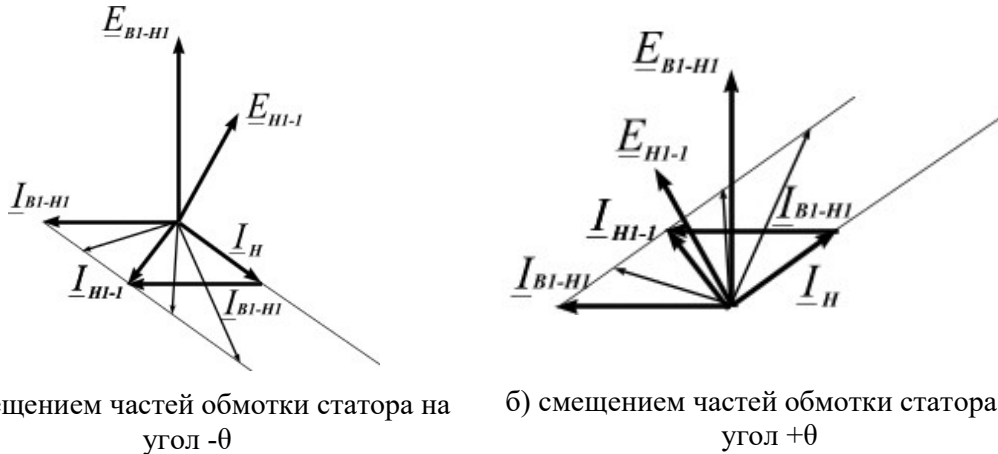


Рисунок 2.4 — Векторная диаграмма распределения токов в автотрансформаторной обмотке с подключенной реактивной нагрузкой

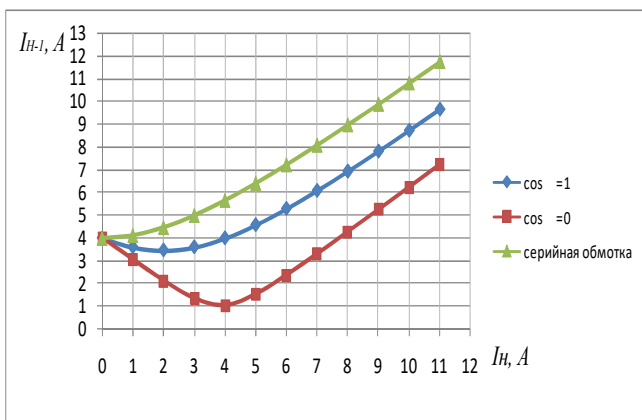
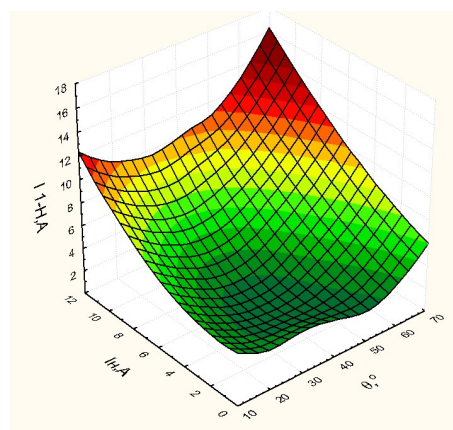
Ток в обмотке В1–Н1 определяется необходимым током возбуждения и емкостью конденсаторов, которые можно определить из следующих формул [3]:

$$x_c = \frac{U_c}{\omega(I_{\mu} + nI_{\mu})} \quad (2.1)$$

где I_{μ} — ток намагничивания; n — степень размагничивания током нагрузки тока ротора, о. е.; U_c — напряжение на конденсаторах, В; x_c — реактивное сопротивление; C — емкость возбуждения конденсаторов, мкФ; ω — круговая частота, Гц.

Произведем сравнительный расчет тока, проходящего в статорной обмотке при разных коэффициентах мощности, результаты приведены на рисунке 2.5.

Результаты расчета отражают характер изменения токов в автотрансформаторной обмотке асинхронного генератора согласно векторным диаграммам, показанным раньше. Для сравнения произведен расчет тока статора с серийной обмоткой статора соединенной звездой при подключении активной нагрузки.

а) с углом $\theta = 30^\circ$ 

б) при активной нагрузке

Рисунок 2.5 — График зависимости тока в общей части обмотки 1–Н от тока нагрузки от тока и угла θ

Расчетный график (рисунок 2.5, б) показывает, что, если автотрансформаторная обмотка разделена на две равные части, то при значительных величинах тока нагрузки оптимальный угол θ для подключения активной нагрузки составляет 30° , при таком смещении частей обмоток будет наименьшее влияние тока нагрузки на размагничивание генератора, а, следовательно, стабилизация напряжения будет выше. Очевидно, что протекание меньшего по величине тока в общей части обмотки Н1-1 приведет к снижению электрических потерь и повышению КПД машины. Так как ток в части Н1-1 протекает больший по величине, целесообразно выполнить эту часть обмотки проводом большего сечения, а часть обмотки В1–Н1 проводом меньшего сечения. В случае подключения индуктивной нагрузки к асинхронному генератору с автотрансформаторной обмоткой угол θ позволяет сместить вектор результирующего тока таким образом, что он оказывает меньшее размагничивающее воздействие, так как не повернут строго напротив вектора тока возбуждения [50].

При моделировании [76] используем общепризнанные при проектировании электрических машин обозначения (рисунок 2.6): C_A, C_B, C_C — емкости возбуждения; $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6$ — потокосцепление частей обмотки статора; $u_{cAB}, u_{cAC}, u_{cBC}$ — напряжения на конденсаторах; $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$ — токи в частях обмоток статора; $i_{cAB}, i_{cAC}, i_{cBC}$ — токи конденсаторов;

нагрузки; $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ — активное сопротивление частей обмотки статора; $r_{нА}, r_{нВ}, r_{нС}$ — сопротивление нагрузки; L_{s1}, L_{s2}, L_{s2} — индуктивность рассеяния обмотки статора; $k_s = w_1/w_2$ — коэффициент, учитывающий часть используемой обмотки;

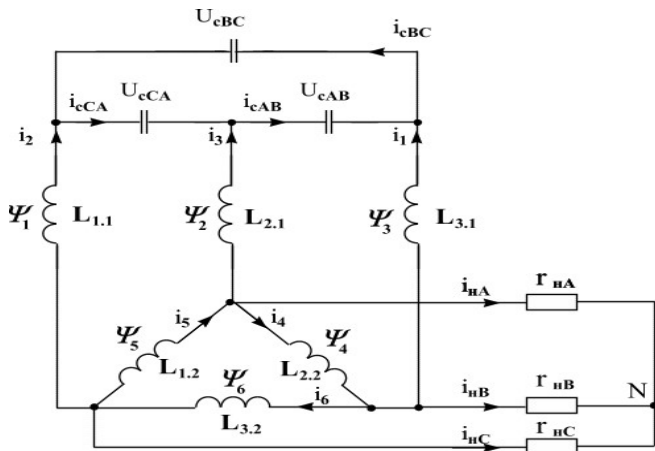


Рисунок 2.6 — Схема соединения звезда — треугольник автотрансформаторной обмотки статора асинхронного генератора с включением конденсаторов треугольником для 3-фазной нагрузки

В работе [10] описаны математические модели асинхронного генератора с шестизонной, автотрансформаторной соединенной звездой и серийной обмотками статора преобразованными в трехфазной системе координат, на основе математической модели идеализированной трехфазной обобщенной машины [76], для чего записывается система уравнений для определения результирующих потокоцеплений фаз статора и ротора, матрица взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора определяется, как $\|\Psi\| = \|M\| \cdot \|i\|$. Моделирование АГ учитывает нелинейность его характеристики намагничивания зависимость $F(B)$, где B — значение индукции в воздушном зазоре $\|F(B)\| = \|M_o\| f(B)$. Эта зависимость может определяться из опыта ХХ или расчета вольтамперной характеристики (результаты расчета и опыта холостого хода приведены в главе 3).

Токи обмоток АГ находятся в результате решения системы алгебраических уравнений методом обратной матрицы

$$\|i\| = \|M_B\|^{-1} \cdot \|\Psi\|,$$

где M_B — обратная матрица взаимоиндукции между обмотками АГ.

Составим уравнения описывающие физические процессы происходящее в

асинхронном генераторе при соединении обмотки статора по схеме звезда — треугольник [31].

Для математического описания электрических процессов ротора используем систему уравнений обобщенной электрической машины в трехфазной системе координат с учетом автотрансформаторного варианта статорной обмотки, электромагнитный момент формируется токами статорной и роторной обмотки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{r1}}{dt} = -R_{r1} \cdot i_{r1} - \frac{\psi_{r2} - \psi_{r3}}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ \frac{d\psi_{r2}}{dt} = -R_{r2} \cdot i_{r2} - \frac{\psi_{r3} - \psi_{r1}}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ \frac{d\psi_{r3}}{dt} = -R_{r3} \cdot i_{r3} - \frac{\psi_{r1} - \psi_{r2}}{\sqrt{3}} \omega_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J_\Sigma} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot M \cdot f(B)(i_{s1} \cdot i_{r3} + i_{s2} \cdot i_{r1} + i_{s3} \cdot i_{r2} - i_{s1} \cdot i_{r2} - i_{s2} \cdot i_{r3} - i_{s3} \cdot i_{r1} + \\ + i_{s4} \cdot i_{r3} + i_{s5} \cdot i_{r1} + i_{s6} \cdot i_{r2} - i_{s4} \cdot i_{r2} - i_{s5} \cdot i_{r3} - i_{s6} \cdot i_{r1}) + \frac{M_{np}}{J_\Sigma} - \frac{M_c}{J_\Sigma} \\ M_{эм} = p \frac{\sqrt{3}}{2} M(i_{s1} \cdot i_{r3} + i_{s2} \cdot i_{r1} + i_{s3} \cdot i_{r2}) - (i_{s1} \cdot i_{r2} + i_{s2} \cdot i_{r3} + i_{s3} \cdot i_{r1}) + \\ + (i_{s4} \cdot i_{r3} + i_{s5} \cdot i_{r1} + i_{s6} \cdot i_{r2}) - (i_{s4} \cdot i_{r2} + i_{s5} \cdot i_{r3} + i_{s6} \cdot i_{r1}). \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Первое допущение возможно только при симметричном режиме

$$i_{cBA} + i_{cCA} + i_{cAB} = 0. \quad (2.2)$$

Второе условие для узла N

$$i_3 - i_{нА} + i_1 - i_{нВ} + i_2 - i_{нС} = 0. \quad (2.3)$$

Токи емкостей

$$i_3 = i_{cAB} - i_{cCA}; \quad i_1 = i_{cBC} - i_{cAB}; \quad i_2 = i_{cCA} - i_{cBC}. \quad (2.4)$$

$$i_{нА} = i_6 - i_3; \quad i_{нВ} = i_4 - i_1; \quad i_{нС} = i_5 - i_2. \quad (2.5)$$

При моделировании асинхронного генератора будут определены токи, проходящие по обмоткам, $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$. Для записи системы уравнений и ее однозначного решения необходимо остальные неизвестные выразить через токи обмоток. Получим их с помощью преобразований [125; 127].

Токи нагрузки

$$i_{нВ} = -i_6 + i_4 - i_3; \quad i_{нА} = i_5 - i_4 - i_2; \quad i_{нС} = -i_5 + i_6 - i_1.$$

$$i_{нА} + i_{нВ} + i_{нС} = 0.$$

Так как в схеме $C_{AB} = C_{BC} = C_{CA} = C$, то $i_{cAB} + i_{cBC} + i_{cCA} = 0$.

С учетом $i_2 = -i_3 - i_1$, и $i_{cCA} = -i_{cAB} - i_{cBC}$. получим выражения для определения

ТОКОВ КОНДЕНСАТОРОВ

$$i_{cBC} = \frac{i_1 - i_2}{3}; \quad i_{cAB} = \frac{i_3 - i_1}{3}; \quad i_{cCA} = -i_{cAB} - i_{cBC} = -\frac{i_1 - i_2}{3} - \frac{i_3 - i_1}{3} = \frac{i_2 - i_3}{3}. \quad (2.6)$$

Таким образом определение токов, проходящих по обмоткам асинхронного генератора с обмоткой статора звезда — треугольник сводится в систему уравнений

$$\begin{cases} i_{cBC} = \frac{i_1 - i_2}{3}; \quad i_{cAB} = \frac{i_3 - i_1}{3}; \quad i_{cCA} = \frac{i_2 - i_3}{3}; \\ i_{нВ} = -i_6 + i_4 - i_3; \quad i_{нА} = i_5 - i_4 - i_2; \quad i_{нС} = -i_5 + i_6 - i_1; \\ i_{нА} + i_{нВ} + i_{нС} = 0; \quad i_4 + i_5 + i_6 = 0; \quad i_{cAB} + i_{cBC} + i_{cCA} = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Система дифференциальных уравнений для определения потокосцеплений определяются согласно первому и второму закону Кирхгофа

$$\begin{cases} k_s \frac{d\psi_3}{dt} - (1 - k_s) \frac{d\psi_4}{dt} + k_s \frac{d\psi_2}{dt} = -k_s R_3 i_3 + (1 - k_s) R_4 i_4 - k_s R_2 i_2 - u_{cAB}; \\ k_s \frac{d\psi_1}{dt} - (1 - k_s) \frac{d\psi_5}{dt} + k_s \frac{d\psi_2}{dt} = -k_s R_1 i_1 + (1 - k_s) R_5 i_5 + k_s R_2 i_2 - u_{cCA}; \\ k_s \frac{d\psi_1}{dt} - (1 - k_s) \frac{d\psi_6}{dt} + k_s \frac{d\psi_3}{dt} = -k_s R_1 i_1 + (1 - k_s) R_6 i_6 - k_s R_3 i_3 - u_{cCB}; \\ (1 - k_s) \frac{d\psi_6}{dt} = -(1 - k_s) R_6 i_6 + r_{нВ} i_{нВ} + r_{нС} i_{нС}; \\ (1 - k_s) \frac{d\psi_4}{dt} = -(1 - k_s) R_4 i_4 + r_{нА} i_{нА} + r_{нВ} i_{нВ}; \\ (1 - k_s) \frac{d\psi_5}{dt} = -(1 - k_s) R_5 i_5 + r_{нА} i_{нА} + r_{нС} i_{нС}. \end{cases}$$

При равных емкостях напряжения на конденсаторах можно определить с помощью дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{du_{cAB}}{dt} = \frac{1}{C_A} \frac{i_3 - i_1}{3}; \\ \frac{du_{cBC}}{dt} = \frac{1}{C_B} \frac{i_1 - i_2}{3}; \\ \frac{du_{cCA}}{dt} = \frac{1}{C_C} \frac{i_2 - i_3}{3}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Для приведения системы уравнения к форме Коши необходимо определить выражения $\frac{d\psi_1}{dt}$, $\frac{d\psi_2}{dt}$, $\frac{d\psi_3}{dt}$ отдельно от остальных из уравнений

$$\begin{cases} k_s \frac{d\psi_1}{dt} = -k_s R_1 i_1 + k_s R_2 i_2 + r_{nC} i_{nC} - \frac{1}{2} u_{cCB} + \frac{1}{2} u_{cAB} - \frac{1}{2} u_{cCA} \\ k_s \frac{d\psi_2}{dt} = k_s R_1 i_1 + k_s R_3 i_3 + r_{nA} i_{nA} + \frac{1}{2} u_{cCB} - \frac{1}{2} u_{cCA} - \frac{1}{2} u_{cAB}; \\ k_s \frac{d\psi_3}{dt} = -k_s R_2 i_2 - k_s R_3 i_3 + r_{nB} i_{nB} - \frac{1}{2} u_{cCB} - \frac{1}{2} u_{cAB} + \frac{1}{2} u_{cCA}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Расчет электрических потерь в статорной обмотке асинхронного генератора производится после определения всех токов в частях статорной обмотки

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot (i_1^2 \cdot R_1 + i_2^2 \cdot R_2 + i_3^2 \cdot R_3 + i_4^2 \cdot R_4 + i_5^2 \cdot R_5 + i_6^2 \cdot R_6) \quad (2.10)$$

Моделирование будем производить для асинхронного генератора мощностью 3 кВт на базе асинхронного двигателя 4A100S4. Параметры АД и расчетные данные АГ: $D = 0,95$ м; $l = 0,11$ м; $I_{1H} = 6,7$ А; $\cos\varphi_H = 0,82$; $w = 360$; $k_{0\delta} = 0,637$; $B_\delta = 0,9$ Тл; $k_\mu = 1,65$; $\delta = 0,3$ мм; $k_\delta = 1,32$; $Z_1/Z_2 = 24/28$; соотношение ЭДС 462/400 В; соотношение сечения проводников в частях обмотки 2/1.

Принятой индукции в воздушном зазоре $B_\delta = 0,90$ Тл соответствует поток $\Phi = 5,2 \cdot 10^{-3}$. Число витков на фазу генератора

$$w = 266 / (222 \cdot 0,637 \cdot 5,2 \cdot 10^{-3}) = 361$$

Уточненное число витков $w = 360$, так как в катушке $361/18 = 20$ витков. При площади изолированного паза 50 мм^2 выбираем диаметр провода $d/d_{us} = 0,85/0,915$ мм.

Сопrotивление 120 витков сечением провода $0,567 \text{ мм}^2$ с учетом длины витка $0,52$ м составляет $1,22$ Ом. Таким образом сопротивление частей обмотки согласно

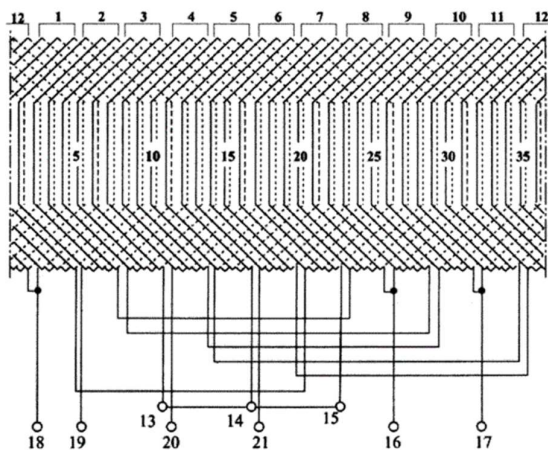
рисунку 2.6 с выводами 13–16, 14–17, 15–18 (Н1–Н2, Н2–Н3, Н1–Н3) равно 1,22 Ом, а сопротивление частей обмотки с выводами 16–19, 17–20, 18–21 (Н1–В1, Н2–В2, Н3–В3) составляет 2,44 Ом. Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{B_{\delta} \pi p \delta k_{\delta} k_{\mu}}{\sqrt{2} m w k_{\text{об}} \mu_0} = \frac{0,90 \cdot 3,1416 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,32 \cdot 1,65}{1,414 \cdot 3 \cdot 360 \cdot 0,637 \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = 3 \text{ А.}$$

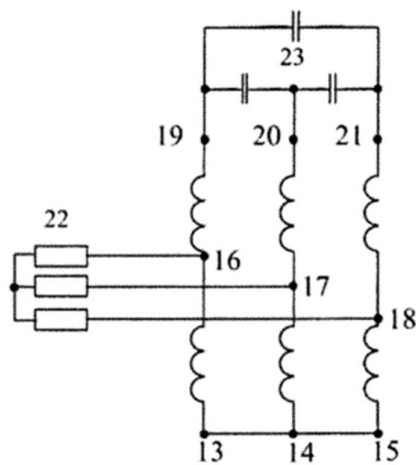
Напряжение на конденсаторах при соединении в двойную звезду, сопротивление и емкость конденсаторов на холостом ходу:

$$U_c = \frac{E}{k_E} = \frac{462}{0,96} = 481 \text{ В; } x_c = \frac{U_c}{I_{\mu}} = \frac{481}{3} = 160,3 \text{ Ом; } C = \frac{10^6}{\omega x_c} = \frac{10^6}{314 \cdot 160,3} \approx 19 \text{ мкФ.}$$

Схема обмотки статора (рисунок 2.7), полученная на основе исследований, описанных в [10], асинхронного генератора выполняется двухслойной с диаметральной шагом [105]. Учитывая характер изменения тока при нагрузке на выводах «Н» (16, 17, 18), проводники частей фаз расположены в тех же пазах статора и имеют разное сечение, что позволяет снизить электрические потери и увеличить стабилизирующие свойства генератора.



а) Схема статорной обмотки



б) схема подключения трехфазной нагрузки

Рисунок 2.7 — Автономный асинхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой статора (RU2640403)

Для математического описания физических процессов асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора сделаем допущение что при пуске электро-

двигателя компенсируется вся реактивная составляющая тока. Тогда можно представить нагрузку генератора как активную, которая меняется в зависимости от скольжения. Сопротивление нагрузки является функцией скольжения $r_n(s)$ и рассчитывается на основании расчетов электромеханической характеристики электродвигателя. Изменение сопротивления двигательной нагрузки в зависимости от скольжения приведены на рисунке 2.8 [18; 19; 20].

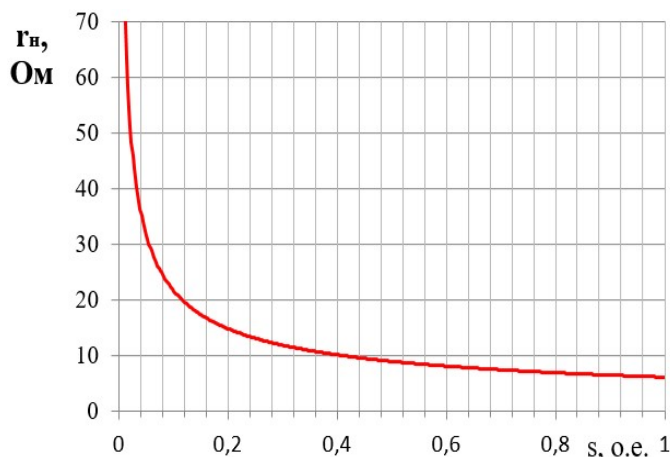


Рисунок 2.8 — Изменение сопротивления двигательной нагрузки в зависимости от скольжения $r_n(s)$

Подставим параметры асинхронного генератора в уравнения математического описания (сопротивления частей обмотки, коэффициент учитывающий часть используемой обмотки, функцию изменения симметричной нагрузки, коэффициенты матрицы индуктивностей и взаимных индуктивностей, емкости конденсаторов).

Уточним систему уравнений $U_c = f(i)$ определяющих напряжение на конденсаторах

$$\begin{cases} \frac{du_{cAB}}{dt} = \frac{i_3 - i_1}{54}; \\ \frac{du_{cBC}}{dt} = \frac{i_1 - i_2}{54}; \\ \frac{du_{cCA}}{dt} = \frac{i_2 - i_3}{54}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Определение токов, проходящих по обмоткам асинхронного генератора с обмоткой статора звезда — треугольник определяется из уравнения 2.7.

Матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей $M_0=f(L)$ согласно [10] запишется

$$M_0 = \begin{pmatrix} L_s & M \cdot (-0.609) & -M \cdot 0.5 & M & -M \cdot 0.5 & -M \cdot 0.5 & M \cdot (-0.383) \\ M \cdot (-0.609) & L_s & M \cdot (-0.383) & M \cdot (-0.609) & M \cdot 0.991 & M \cdot (-0.383) & M \cdot 0.991 \\ -M \cdot 0.5 & M \cdot (-0.383) & L_s & -M \cdot 0.5 & -M \cdot 0.5 & M & M \cdot (-0.609) \\ M & M \cdot (-0.609) & -M \cdot 0.5 & L_r & -M \cdot 0.5 & -M \cdot 0.5 & M \cdot (-0.383) \\ -M \cdot 0.5 & M \cdot 0.991 & -M \cdot 0.5 & -M \cdot 0.5 & L_r & -M \cdot 0.5 & M \cdot 0.991 \\ -M \cdot 0.5 & M \cdot (-0.383) & M & -M \cdot 0.5 & -M \cdot 0.5 & L_r & M \cdot (-0.609) \\ M \cdot (-0.383) & M \cdot 0.991 & M \cdot (-0.609) & M \cdot (-0.383) & M \cdot 0.991 & M \cdot (-0.609) & L_s \end{pmatrix}.$$

Подставим активные сопротивления частей обмотки в уравнение для определения электрических потерь асинхронном генератора

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot (2,44(i_1^2 + i_2^2 + i_3^2) + 1,22(i_4^2 + i_5^2 + i_6^2)) \quad (2.12)$$

Преобразуем систему уравнений, определяющих потокосцепления асинхронного генератора. После объединив системы уравнения 2.7, 2.11 и 2.12 получим математическую модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_1}{dt} = -1,22i_1 + 1,22i_2 + 2r_h(s)i_{hC} - u_{cCB} + u_{cAB} - u_{cCA}; \\ \frac{d\psi_2}{dt} = 1,22i_1 + 1,22i_3 + 2r_h(s)i_{hA} + u_{cCB} - u_{cCA} - u_{cAB}; \\ \frac{d\psi_3}{dt} = -1,22i_2 - 1,22i_3 + 2r_h(s)i_{hB} - u_{cCB} - u_{cAB} + u_{cCA}; \\ \frac{d\psi_6}{dt} = -0,61i_6 + 2r_h(s)(i_{hB} + i_{hC}); \\ \frac{d\psi_4}{dt} = -0,61i_4 + 2r_h(s)(i_{hA} + i_{hB}); \\ \frac{d\psi_5}{dt} = -0,61i_5 + 2r_h(s)(i_{hA} + i_{hC}); \\ M_0 = f(L); \\ U_c = f(i); \\ i_{cBC} = \frac{i_1 - i_2}{3}; \quad i_{cAB} = \frac{i_3 - i_1}{3}; \quad i_{cCA} = \frac{i_2 - i_3}{3}; \\ i_{hB} = -i_6 + i_4 - i_3; \quad i_{hA} = i_5 - i_4 - i_2; \quad i_{hC} = -i_5 + i_6 - i_1; \\ i_{hA} + i_{hB} + i_{hC} = 0; \quad i_4 + i_5 + i_6 = 0; \quad i_{cAB} + i_{cBC} + i_{cCA} = 0 \\ \Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot (2,44(i_1^2 + i_2^2 + i_3^2) + 1,22(i_4^2 + i_5^2 + i_6^2)). \end{array} \right. \quad (2.13)$$

При установке компенсирующих конденсаторов для снижения технических потерь в линии электроснабжения дождевальная машина $\cos\varphi$ нагрузки стремиться к 1, что благоприятно скажется на стабилизации напряжения асинхронного генератора.

Потери мощности в генераторе на базе двигателя 4A100S4 мощностью 3 кВт с переключаемой обмоткой статора рассчитываются с учетом разного сечения в частях статорной обмотки – расчетное сопротивление 3 частей обмотки на возбуждение (Н1–В1, Н2–В2, Н3–В3) 2,44 Ом и 3 частей обмотки на нагрузку (Н1–Н2, Н2–Н3, Н1–Н3) 1,22 Ом. Намагничивающий ток будет проходить в частях статорной обмотки Н-В, примем $I_{\mu} = 4,2$ А. [77; 79]

Потери мощности в асинхронном генераторе с переключаемой обмоткой статора (рисунок 2.6) при симметричной нагрузке будут рассчитываться

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot (I_{H-B}^2 \cdot R_{H-B} + I_{H-1}^2 R_{H-1}) \quad (2.14)$$

Например, для нагрузки в 3 кВт, ток линейный $I_H = 8$ А, тогда в части обмотки Н–Н будет протекать ток 6,93 А согласно формуле (2.12), потери мощности в обмотке статора генератора

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot (6,93^2 \cdot 1,22 + 4,2^2 \cdot 2,44) = 304 \text{ Вт.}$$

Результаты расчета электрических потерь генератора с переключаемой обмоткой статора приведены на рисунке 2.9.

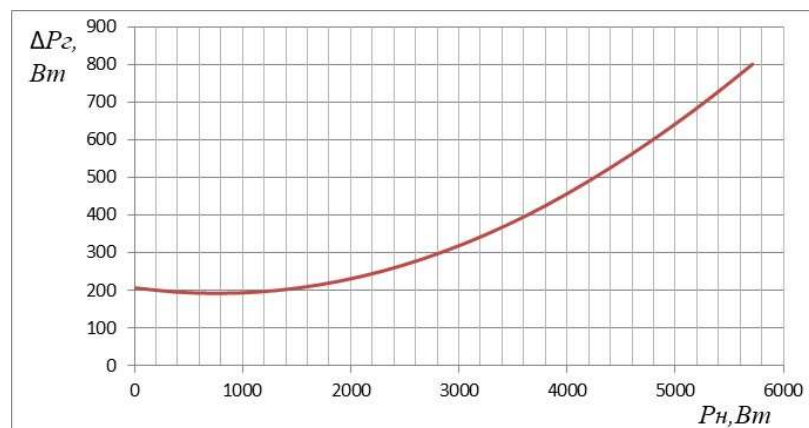


Рисунок 2.9 — Зависимость электрических потерь в обмотках статора асинхронного генератора на базе двигателя 4A100S4 при питании трехфазной нагрузки дождевальной машины

Таким образом при компенсации реактивного тока электрические потери в статорной обмотке асинхронного генератора ниже чем у базового двигателя (паспортные данные 320 Вт).

2.2 Оценка электрических потерь системы электроснабжения в режимах работы дождевальной машины

Дополнение уравнений, описывающих электродвигатель и линию электроснабжения для расчета электрических потерь к математической модели асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой статора приведет к существенному усложнению расчета. Поэтому для оценки электрических потерь при пуске и устойчивом режиме работы бустерного насоса дождевальной машины воспользуемся компьютерным моделированием в программном комплексе SimInTech, который предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в различных объектах управления с разработкой математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления. Разработка математических моделей и алгоритмов управления в SimInTech происходит в виде структурного проектирования логико-динамических систем, описываемых во входо-выходных отношениях, в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и/или дифференциально-алгебраических уравнений [44].

Потери электрические в случае электроснабжения дождевальной машины можно разделить на три составляющие — в электродвигателе ΔP_d , в линии ΔP_l и в генераторе ΔP_r (рисунок 1.11).

Параметры линии электроснабжения заложены в блоке сопротивления R-L компьютерной модели и зависят от длины линии, с ростом длины пропорционально растет сопротивление и индуктивность линии.

Потери активной мощности в ветви электроснабжения дождевальной машины определяется по формуле:

$$\Delta P_i = 3I_i^2 R_i, \quad (2.15)$$

а в любой группе из m ветвей определяется суммой потерь активной мощности во всех ветвях

$$\Delta P_{Эл} = \sum_{i=1}^m \Delta P_j = 3 \sum_{i=1}^m I_i^2 R_i. \quad (2.16)$$

Сопротивления линии определяются по удельным показателям на 1 км, рассчитанными для заданного номинального напряжения и конструкции линии (r_0 и x_0):

$$Z = z_0 L = (r_0 + jx_0)L. \quad (2.17)$$

Так как при наличии линии с определенным сопротивлением $Z_{л}$ необходимо учитывать потерю напряжения, то в любой i -той ветви электроснабжения дождевальной машины потери напряжения находятся по формуле:

$$\Delta U_i = \sqrt{3}(I_{ai} R_i + I_{pi} X_i), \quad (2.18)$$

где I_{aj} и I_{pj} — активная и реактивная составляющие комплекса тока; R_j и X_j — активное и реактивное сопротивление ветви.

Блок сопротивления R-L реализует модель последовательно соединенных активного сопротивления, идеальной индуктивности. Предназначен для использования в «контуре переменного тока». Комплексное сопротивление блока определяется выражением:

$$Z = R + j(X_L) = R + j(\omega L) = R + j(2\pi fL) \quad (2.19)$$

где j — мнимая единица; ω — угловая частота, рад; f — частота цепи переменного тока, Гц; R , L — заданное в свойствах блока значение активного сопротивления и индуктивности.

Блок аналогичен последовательному RLC соединению отдельных элементов, но не имеет промежуточных узлов, что повышает скорость вычислений. За положительное направление токов и мощностей принято направление от «Вход цепь +» к «Вход цепь -».

Модель асинхронного двигателя в программном комплексе SimInTech основана на T-образной схеме замещения с вынесенной цепью намагничивания без учета

насыщения, приведена на рисунке 2.10. Блок для реализации модели асинхронного электродвигателя описывается системой уравнения дифференциальных уравнений. Используется в цепях с элементами библиотеки ЭЦ-Динамика. Модель асинхронного двигателя (АД) основана на следующих уравнениях

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \psi_{qs}; \quad u_{ds} = R_d i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs}; \\ u_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r Z_p) \psi_{dr}; \quad u_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r Z_p) \psi_{qr}; \\ M_e = 1,5p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}); \\ \psi_{qs} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}; \quad \psi_{ds} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{qr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}; \quad \psi_{dr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_c). \end{array} \right. \quad (2.20)$$

где: R_s, R_r — активные сопротивления статора и ротора; $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ — индуктивности рассеяния статора и ротора; L_m — индуктивность цепи намагничивания; $U_{ds}, i_{ds}, \Psi_{ds}$ — проекции напряжения, тока и потокосцепления статора на ось d; $U_{dr}, i_{dr}, \Psi_{dr}$ — проекции напряжения, тока и потокосцепления ротора на ось d; $U_{qs}, i_{qs}, \Psi_{qs}$ — проекции напряжения, тока и потокосцепления статора на ось q; $U_{qr}, i_{qr}, \Psi_{qr}$ — проекции напряжения, тока и потокосцепления ротора на ось q; ω_r — угловая частота вращения ротора; Z_p — число пар полюсов; M_e — электромагнитный момент; M_c — момент сопротивления; J — момент инерции; F — коэффициент вязкого трения.

В модели АД насыщение и потери в стали не учитываются. Ротор — короткозамкнутый. Все величины и параметры АД приведены к статору. Момент сопротивления на входном порте « M_c » задается в относительных единицах, приведенным к номинальному моменту АД [97].

Модель АД по отношению к электрической сети является источником тока. Фазные напряжения узла, к которому подключен АД, преобразуются к двухфазной вращающейся системе координат; по выше приведенным уравнениям вычисляются токи статора; фазные токи получаются с помощью обратного преобразования коор-

динат. Данная реализация модели при исследовании режимов, связанных с отключением АД от узла, может потребовать включения демпфирующей R или RC-цепочки параллельно АД.

Уравнениям соответствуют схемы замещения АД по осям q и d, приведенные на рисунке 2.20.

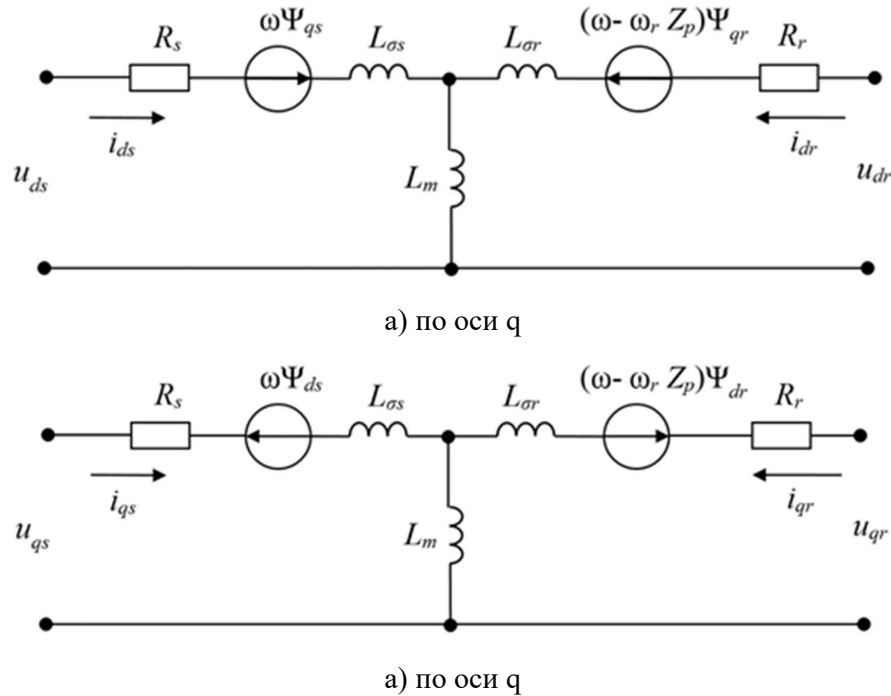


Рисунок 2.10 — Схема замещения блока АД в программном комплексе SimInTech

Произведем настройку блока асинхронного двигателя согласно номинальной мощности бустерного насоса 3 кВт для чего в программном комплексе SimInTech необходимо определить и задать: номинальную мощность, 3 кВт; номинальное напряжение, 0,38 кВ; номинальный коэффициент мощности 0,83; номинальный коэффициент полезного действия, 82 %; номинальную частоту вращения, 1434 об/мин; кратность максимального момента, 2,4 о. е.; кратность пускового момента, 2 о. е.; кратность пускового тока, 6,5 о. е.; коэффициент степени моментной характеристики, 1,8; число пар полюсов, 2; момент инерции, 0,014 кг·м²; номинальную частоту питающей сети, 50 Гц; коэффициент загрузки, 1; начальный момент сопротивления, 0,2 о.е; активное и реактивное сопротивления статора, $R_1 = 2,48$, $X_1 = 2,59$ Ом; реактивное сопротивление (индуктивность) намагничивания, $X_0 = 72,47$ Ом; активное и

реактивное сопротивление ротора, $R_2 = 1,68$, $X_2 = 4,07$ Ом.

Электрические потери в статоре и роторе электродвигателя зависят от протекающего тока в обмотках, которые определяются:

$$P_{\text{Э1}} = 3R_1 \cdot I_1^2, P_{\text{Э2}} = 3R_2' \cdot I_2'^2 \quad (2.21)$$

Сумма этих потерь определяют электрические потери в электродвигателе

$$\Delta P_{\text{Эд}} = P_{\text{Э1}} + P_{\text{Э2}} \quad (2.22)$$

Суммарные потери в электродвигателе дополняются потерями в стали $P_{\text{СТ}}$, механическими $P_{\text{МЕХ}}$ и добавочными потерями $P_{\text{ДОБ}}$:

$$\Sigma P = \Delta P_{\text{Эд}} + P_{\text{СТ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{ДОБ}}, \quad (2.23)$$

$P_{\text{ДОБН}} = 0,005 P_{\text{Н}}$ — добавочные потери при номинальной нагрузке.

Предварительные расчеты электрических потерь электродвигателя с помощью Т-образной схемы замещения (рисунок 2.11) по методике, описанной в [114] выполнены для возможности сравнения и проверки адекватности результатов компьютерного моделирования.

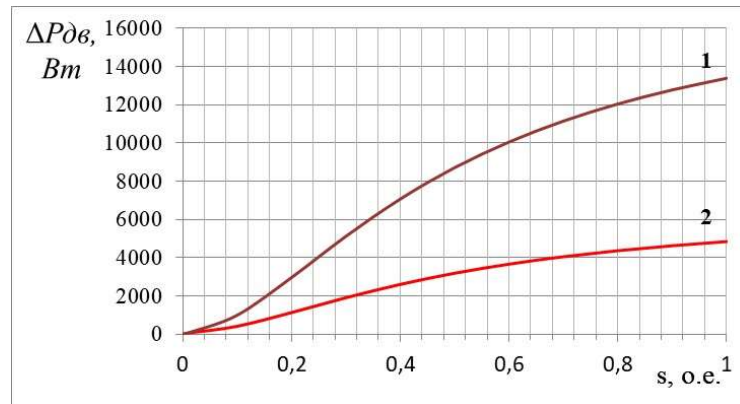


Рисунок 2.11 – Расчетные потери электрические в асинхронном электродвигателе при сниженном (2) и номинальном (1) напряжении

С учетом всех описанных ранее составляющих электрических потерь составлена блок-схема компьютерной модели системы электроснабжения дождевальной установки (рисунок 2.13). В модели предусмотрено измерение линейных токов, напряжений источника питания, фазных токов и линейных напряжений асинхрон-

ного электродвигателя и тока конденсаторной батареи. Во время пуска и установившемся режиме регистрируются во времени ток, потребляемый АД, его развиваемый момент и скорость вращения [51; 52; 53].

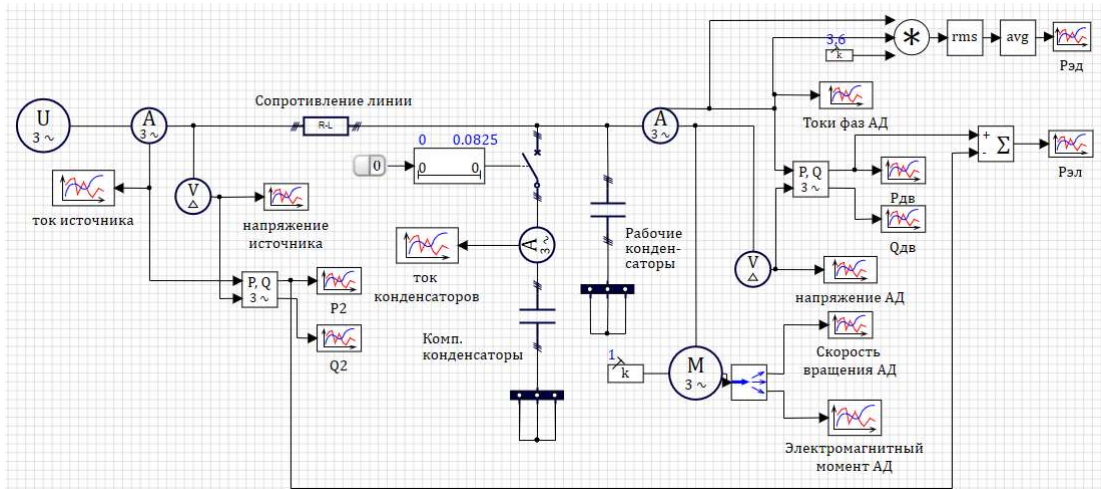


Рисунок 2.12 — Блок-схема компьютерной модели системы электроснабжения дождевальной установки для оценки электрических потерь в линии и электродвигателе бустерного насоса

В модели рассматриваются — прямой пуск асинхронного электродвигателя, и пуск асинхронного электродвигателя при пониженном напряжении 220 В с компенсацией реактивного тока при пуске (включение пусковых конденсаторов) и установившемся режиме (включение рабочих конденсаторов) линия электроснабжения длиной 300 м и сечением 10 мм². Отключение пусковых конденсаторов емкостью 484 мкФ (так как в модели конденсаторы соединены звездой) происходит по истечению 0,0825 с. Результаты моделирования приведены на рисунках 2.13–2.16.

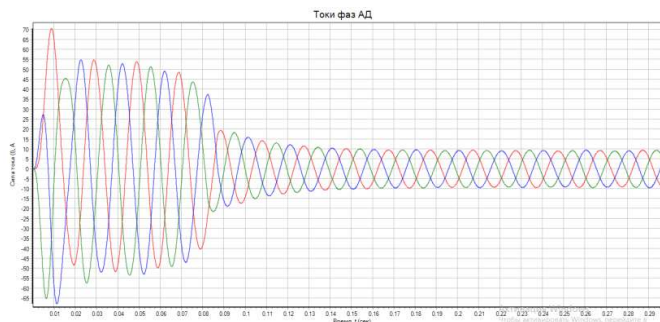
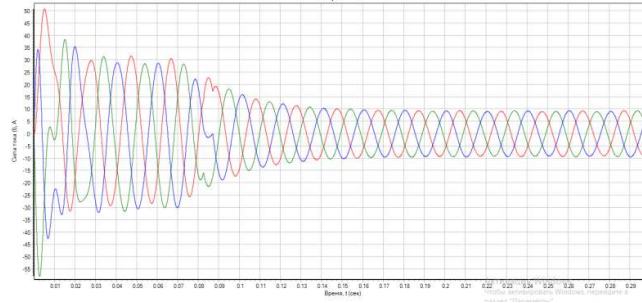
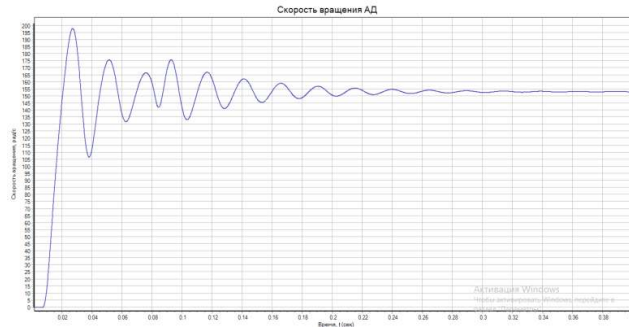
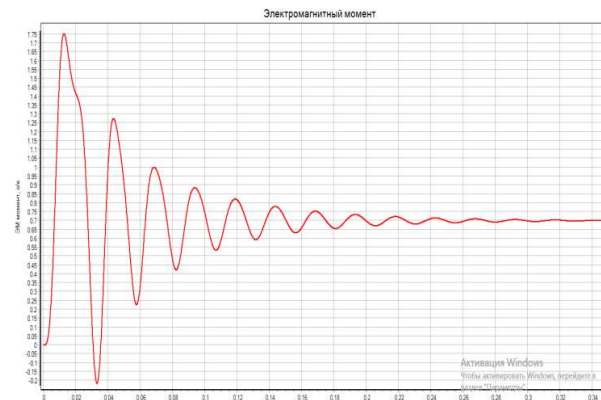


Рисунок 2.13 — Осциллограмма токов асинхронного электродвигателя при номинальном напряжении



а) Осциллограмма токов источника питания

б) изменения скорости вращения электродвигателя $\omega_{дв}(t)$ 

в) изменения электромагнитного момента электродвигателя

Рисунок 2.14 — Результат моделирования электродвигателя с включением компенсирующих конденсаторов во время пуска

Дополнительную емкость конденсаторов возбуждения для компенсации реактивной мощности в линии целесообразно размещать на выводах электродвигателя (для дождевальной машины — электродвигатели тележек и бустерного насоса). Расчет этой емкости проведем для случаев пуска бустерного насоса (3 кВт), так как мощность приводных тележек существенно меньше (0,55 кВт). Очевидно, что необходимо подобрать емкость конденсатора (блок «Рабочие конденсаторы» на рисунке

2.12) таким образом, чтобы скомпенсировать пусковой реактивный ток асинхронного электродвигателя, а после пуска оставить включенным рабочий конденсатор меньшей компенсирующей емкости (блок «Комп. конденсаторы» на рисунке 2.12). Электромеханические характеристики электродвигателей с разделением на активную и реактивную составляющую потребляемого тока приведены в главе 1 (рисунок 1.9).

С учетом напряжения на конденсаторах при соединении в треугольник, сопротивление и необходимая емкость пусковых конденсаторов (блок «Комп. конденсаторы» на рисунке 2.12) [2]:

$$x_c = \frac{U_c}{I_p} = \frac{462}{20,2} = 22,87 \text{ Ом}; C_{\text{комп}} = \frac{10^6}{\omega x_c} = \frac{10^6}{314 \cdot 22,87} \approx 139,25 \text{ мкФ.}$$

При пересчете выше описанным формулам необходимая емкость конденсаторов при пуске от асинхронного генератора с серийной обмоткой статора составит 287 мкФ.

Потери в линии электроснабжения определим, как разницу мощностей, измеренных на источнике и на электродвигателе блоками P, Q вычисления мгновенных значений активной и реактивной мощности трехфазной цепи по мгновенным значениям токов и напряжений ($\Delta P_{\text{л}} = P_{\text{г}} - P_{\text{дв}}$). В компьютерной модели электрических потери в электродвигателе рассчитываются с помощью блока Перемножитель, который умножает величину сопротивления (блок константа) на показания электрического тока дважды, так как регистрируется фазная мощность эти показания умножаются втрое. Аппроксимация сигнала реализуется с помощью блоков среднеквадратичное значение за период [125].

Асинхронный генератор в программном комплексе SimInTech упрощенно представляется в виде источника с внутренним сопротивлением (блок «U»). Электрические потери в обмотке статора генератора рассчитывались согласно данным токов в линии (рисунки 2.14 и 2.15) по формуле 2.12. Полученные данные электрических потерь (в линии, генератора и электродвигателя бустерного насоса) суммировались для комплексной оценки электрических потерь при прямом пуске и электроснабже-

нии дождевальнoй машины на сниженном напряжении, с включением компенсирующих конденсаторов во время пуска асинхронного электродвигателя (рисунки 2.16 и 2.17).

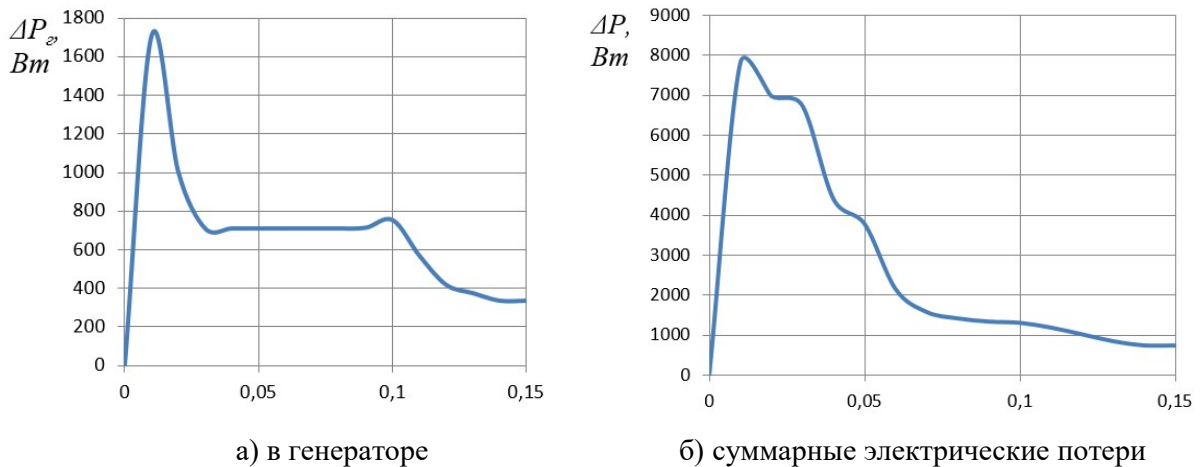
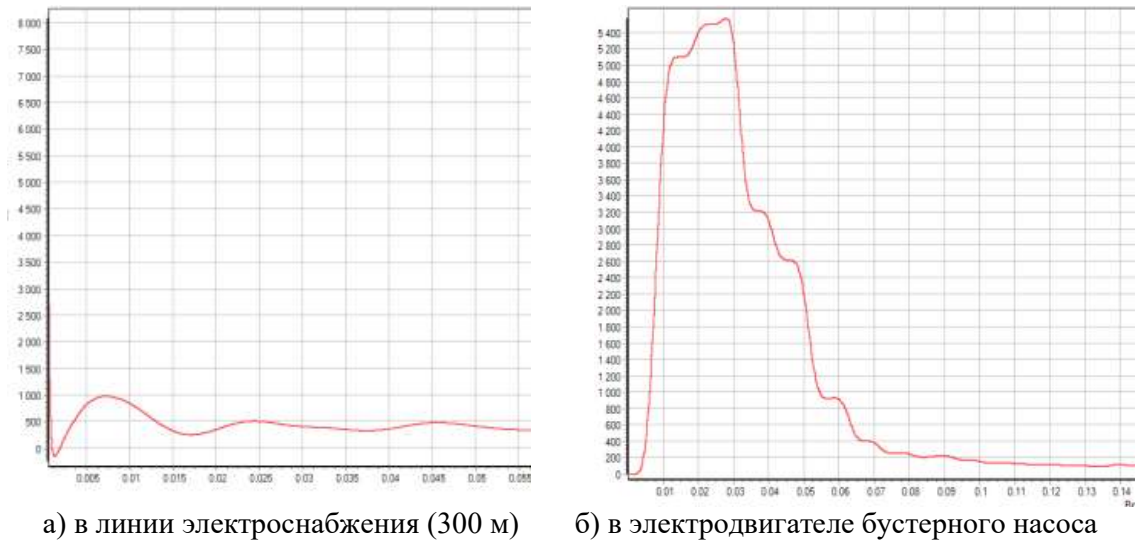


Рисунок 2.15 — Результат компьютерного моделирования системы электроснабжения дождевальных машин кругового действия для определения электрических потерь мощности при включении компенсирующих конденсаторов во время пуска асинхронного электродвигателя на сниженном напряжении

Результат компьютерного моделирования показал, что снижение напряжения приводит к снижению электрических потерь мощности в электродвигателе практически в 3 раза, а при включении компенсирующих конденсаторов за счет снижения реактивной составляющей тока позволяет уменьшить электрические потери мощности в линии протяженностью 400 м электроснабжения до 1000 Вт при пуске, а в установившемся режиме до 142 Вт.

Таким образом потери электрические в асинхронном электродвигателе возможно снизить при пуске на пониженном напряжении. Установка конденсаторов в линии электроснабжения (компенсация реактивной мощности) не повлияет на снижение электрических потерь в электродвигателе как при пуске, так и в установившемся режиме [129].

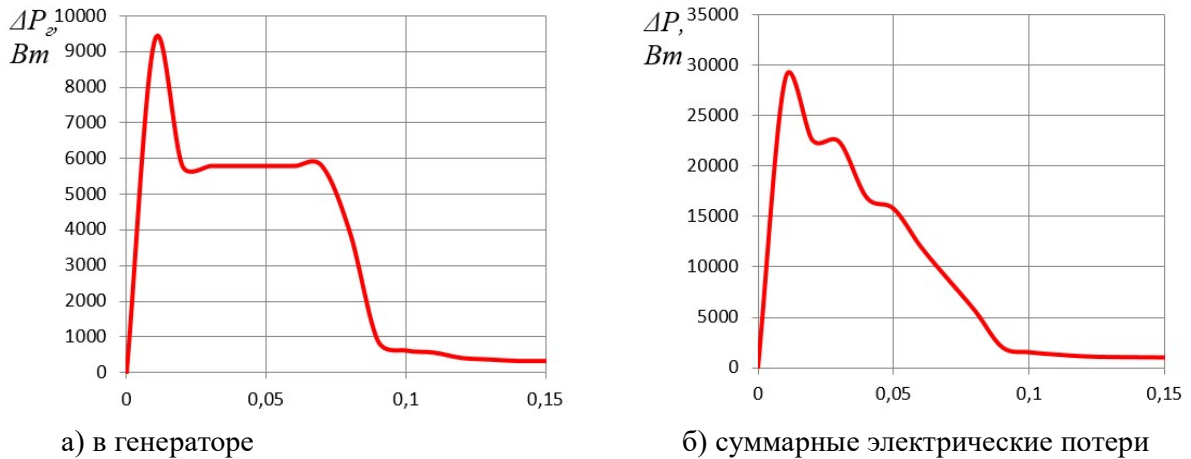
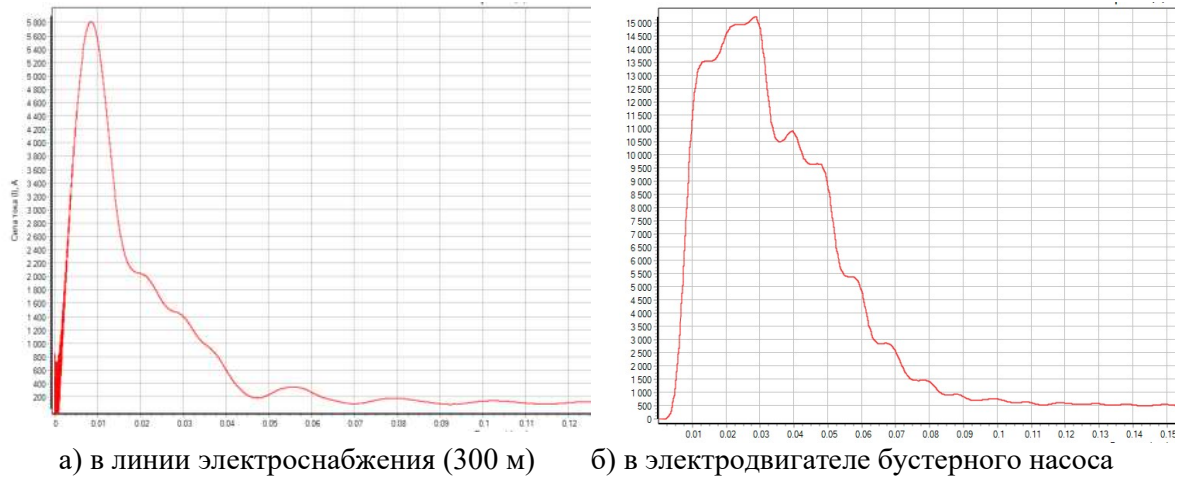
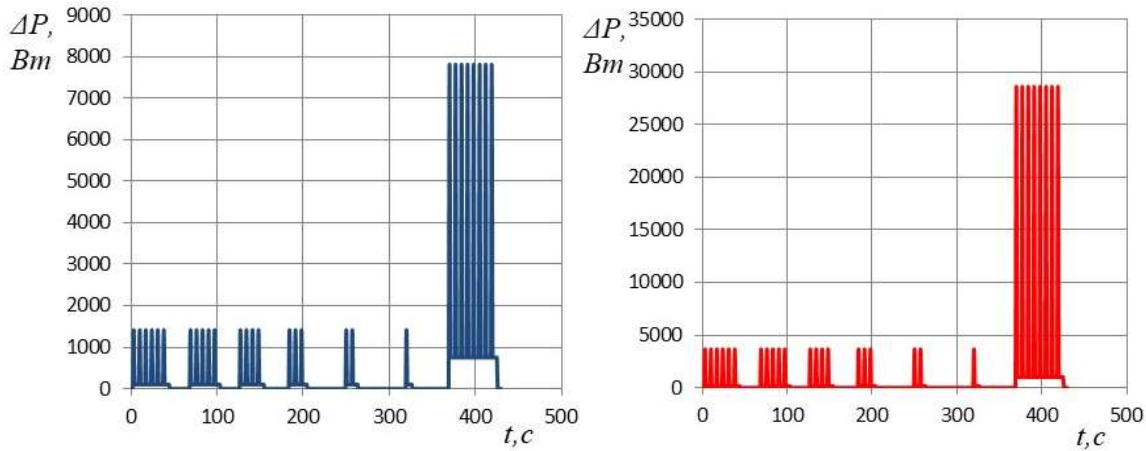


Рисунок 2.16 — Результат компьютерного моделирования системы электроснабжения дождевальных машин кругового действия для определения электрических потерь асинхронного электродвигателя бустерного насоса

Режим работы бустерного насоса подразумевает несколько последовательных пусков в зависимости от нормы полива, таким образом суммарные потери ΔP возрастут кратно количеству включений электродвигателя (из рисунка 1.7 происходит 8 пусков бустерного насоса). При пуске приводных тележек переключения обмотки статора не предусматривается, так как мощность электродвигателей не превышает

0,55 кВт, но компенсацию реактивной мощности в линии можно реализовать с помощью компенсирующих конденсаторов, тогда за 1 цикл перемещения всех тележек дождевальной машины кругового действия изменение ΔP примет вид (рисунок 2.18).



а) с компенсирующими конденсаторами

б) без компенсирующих конденсаторов

Рисунок 2.18 — График потерь мощности дождевальной машины кругового действия в течении времени работы

Потери электроэнергии ΔW в цепи переменного тока дождевальной машины кругового действия определяются по формуле

$$\Delta W = n \int_0^t \Delta P(t) dt. \quad (2.26)$$

где $P(t)$ — закон изменения потерь мощности от времени, t — время одного цикла работы дождевальной машины, n — количество циклов перемещения дождевальной машины.

1. Расчет потерь энергии показал, что в случае с использованием асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора составляет $\Delta W_c = 39$ Втч, а в случае питания от серийного источника питания $\Delta W_c = 104$ Втч. Количество циклов перемещения дождевальной машины за день зависит от нормы полива, пропорционально количеству циклов возрастают потери электроэнергии и может достигать 15 циклов для орошения кукурузы при норме полива $300 \text{ м}^3/\text{га}$, при этом потери энергии составят 1,55 кВтч за сутки. Расчет произведен для бустерного насоса мощностью 3 кВт и линией электроснабжения 300 м дождевальной машины кругового действия для

полива площадью 36 га, расход воды $185 \text{ м}^3/\text{ч}$ и производительность полива 9 мм/день. Пуск электродвигателя бустерного насоса на пониженном напряжении и при включении компенсирующих конденсаторов приводит к уменьшению электрических потерь энергии в электроустановке: в генераторе в 2,5 раза, в линии в 2,6 раза, в электроприводах 2,9 раза.

Для покрытия электрических потерь генератор автономного источника должен дополнительно выработать электрическую энергию в размере 1,55 кВтч за сутки, на что расходуется повышенный объем топлива, с предлагаемым асинхронным генератором сокращается расход топлива на 12 %. Необходимо учесть, что потери электроэнергии приводят к увеличению расхода моторесурса автономного генератора в целом.

Для увеличения поливной площади наращивается количество секций приводных тележек широкозахватной дождевальная машины и применяются бустерные насосы большей мощности. Поэтому использование асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора будет иметь еще большую актуальность, так как потери мощности в линии пропорциональны ее длине, а потери мощности в генераторе и электродвигателе пропорциональны квадрату тока.

2.3 Выводы по второй главе

1. Получено математическое описание асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора на базе дифференциальных уравнений, определяющих ее параметры, которое позволяет получить представление о переходных процессах происходящих при подключении двигательной нагрузки.

2. Определены основные параметры асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора на базе асинхронного двигателя 4A100S4 мощностью 3 кВт: число витков $w = 360$, сопротивление частей статорной обмотки 1,22 Ом и 2,44 Ом, при расчетном токе возбуждения в 3 А емкость конденсаторов холостого хода составляет 19 мкФ.

3. Проведено исследование математической модели асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора мощностью 3 кВт с использованием программного обеспечения MathCad которое показало, что автотрансформаторный вариант обмотки статора с диаметральным шагом обмотки и выполнение частей обмотки разным сечением позволяет снизить электрические потери в генераторе до 304 Вт при номинальной нагрузке.

4. Определен режим работы конденсаторной установки возбуждения асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора. Конденсаторная установка разделяется на основную и дополнительную, основная служит для создания необходимого тока возбуждения в генераторе, а дополнительная — для компенсации, реактивной составляющей тока электродвигателей. Дополнительный блок устанавливается непосредственно у бустерного насоса, включается на время пуска емкость конденсаторов 140 мкФ.

5. Для оценки электрических потерь в системе электроснабжения дождевальной машины разработана компьютерная модель в программном комплексе SimInTech. В ходе моделирования определены составляющие электрических потерь дождевальной машины. Электрические потери при пуске электродвигателя бустерного насоса на низком напряжении (220В) и при включении компенсирующих конденсаторов не превышают — в линии 976 Вт, в электродвигателе — 5154 Вт и в генераторе 1708 Вт, а в установившемся режиме не превышают соответственно — 294 Вт, 270 Вт и 304 Вт.

6. На основании полученного графика электрических потерь определены потери энергии. В случае с использованием асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора в качестве источника питания можно уменьшить потери энергии на 65 Втч за один цикл перемещения дождевальной машины с бустерным насосом мощностью 3 кВт и линией электроснабжения 300 м для полива площадью 36 га, что с учетом необходимой нормы полива может достигать 1,55 кВтч за сутки.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

3.1 Расчет магнитной системы асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Существенным недостатком применения в АПК асинхронных генераторов является потребление реактивного намагничивающего тока что приводит необходимости подключения к статорным обмоткам машины соответствующей компенсирующей емкости [10, 11], которая в свою очередь существенно зависит от уровня напряжения генератора. Переключение обмоток в треугольник приведет к завышению необходимой емкости конденсаторов для создания необходимого тока намагничивания, хотя это и приведет с другой стороны к снижению пускового тока при подключении электродвигателей электроустановок [82].

Расчет необходимой емкости конденсаторов асинхронного генератора возможно лишь при учете нелинейности его характеристики намагничивания, что ограничивает возрастание напряжения. Определить кривую намагничивания возможно экспериментальным методом при проведении характеристики холостого хода или расчетным путем [12].

Расчет кривой намагничивания и необходимой емкости конденсаторов для возбуждения проведем для генератора на базе двигателя АИР100S4У2: $I_{1n} = 7,12$ А; $\cos\varphi_n = 0,81$; $n_n = 1410$ об/мин; $k_o = 0,96$; $k_e = 0,97$; $B_\delta = 0,8$ Тл; $a = 1$; $\delta = 0,3$ мм; $k_\delta = 1.32$.

Определяем значение магнитного потока, Вб

$$\Phi = \alpha_\delta B_\delta \tau l_1 10^{-6} = 0,67 \cdot 0,8 \cdot 74,3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 0,004 \text{ Вб}$$

Число витков в фазе

$$W = (k_e U_\Phi) / (4,44 f \Phi k_{o\delta}) = (0,97 \cdot 220) / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,004 \cdot 0,96) \approx 250 \text{ вит.}$$

Полная МДС магнитной цепи двигателя на пару полюсов, А

$$F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_c + F_p = 772 + 227 + 34 + 40 + 10 = 1084 \text{ А.}$$

Намагничивающий ток, А

$$I_{\mu} = pF / (0,9 mWk_{\text{об}}) = 3 \cdot 1084 / (0,9 \cdot 3 \cdot 220 \cdot 0,96) = 3,32 \text{ А.}$$

Далее строится зависимость тока намагничивания от приложенного напряжения, задавая ряд напряжений $U = (0,7; 0,85; 1,0; 1,15; 1,3) U_{\phi}$

Таблица 3.1 — Результаты расчета магнитной системы генератора на базе двигателя АИР100S4У2

величины	Напряжение				
	0,7	0,85	1	1,1	1,2
Φ , Вб	0,0028	0,0034	0,0040	0,0044	0,0048
B_d , Т	0,5335	0,6478	0,7621	0,8383	0,9145
F_d , А	540,70	656,56	772,43	849,67	926,91
$Bz1$, Т	1,4226	1,7274	2,0322	2,2354	2,4387
$Hz1$	936	2000	7790	17300	35000
$Fz1$, А	27,3	58,4	227,5	505,2	1022,0
$Fz2$, Т	4,1	8,7	34,1	75,7	153,3
B_c , Т	0,656	0,796	0,937	1,031	1,124
H_c	200	287	353	425	509
F_c , А	22,949	32,932	40,506	48,767	58,406
F_p , А	5,737	8,233	10,126	12,192	14,602
F , А	600,82	764,89	1084,65	1491,57	2175,22
I_m	1,843	2,346	3,08	4,575	6,672

С учетом напряжения на конденсаторах при соединении в треугольник, сопротивление и необходимая емкость конденсаторов [2]:

$$x_c = \frac{U_c}{I_{\mu}} = \frac{380}{3,32} = 114,22 \text{ Ом}; \quad C = \frac{10^6}{\omega x_c} = \frac{10^6}{314 \cdot 114,22} \approx 28 \text{ мкФ.}$$

При подключении электродвигателей вентиляционных установок возможно рассчитать реактивную составляющую тока статора генератора I_{1p} при протекании пускового тока I_{1n}

$$I_{1p} = I_{1n} \sin \varphi_n = 5,9 \cdot 0,95 = 5,69 \text{ А.}$$

Приведенное значение реактивного тока ротора при номинальной нагрузке

$$I'_{2p} \approx I_{1p} - I_{\mu} = 5,69 - 3,32 = 2,37 \text{ А.}$$

Степень размагничивания тока ротора при номинальной нагрузке

$$\frac{I'_{2p}}{I_{\mu} + I'_{2p}} = \frac{I'_{2p}}{I_{\mu 0}} \approx \frac{I'_{2p}}{I_{1p}} = \frac{2,61}{5,69} = 0,46.$$

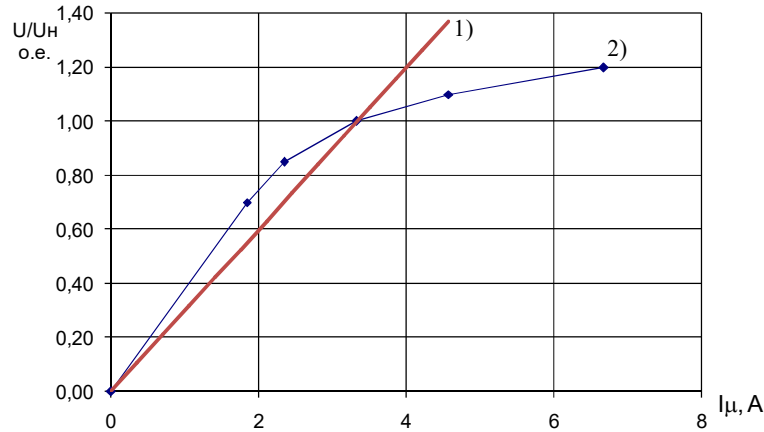


Рисунок 3.1 — Зависимость напряжения на выводах генератора от тока конденсаторов 1) и тока намагничивания 2).

При подключении электродвигателей происходит падение напряжения на 46 % при $C = C_{xx}$, поэтому необходимо включить дополнительную емкость равную $C = C_{п}$, чтобы падение напряжения не превышало десяти процентов $n = 0,1$ тогда

$$I_{\mu} = I_{1p} - I_{1p}n_{0,1} = 5,69 - 5,69 \cdot 0,1 = 5,12 \text{ A}$$

Так как ток намагничивания изменился рассчитаем необходимую емкость

$$C_{п} = I_{\mu(n)} / (2\pi f U_{\phi}) = 5,12 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 380 \cdot 10^{-6}) \approx 43 \text{ мкФ}$$

Необходимо предусмотреть дополнительную емкость конденсаторов

$$C_{доп} = C_{п} - C_{xx} = 43 - 28 = 15 \text{ мкФ}.$$

Как было отмечено в 1 главе использование статорных обмоток для асинхронных машин не рационально, так как они рассчитываются для двигательного режима, в первую очередь на меньшую ЭДС. Произведем расчет этого же генератора на базе двигателя 4A100S4Y2, но с автотрансформаторной звездой (двойная звезда). Параметры АД и расчетные данные АГ: $D = 0,95$ м; $l = 0,11$ м; $I_{1н} = 6,7$ А; $\cos \varphi_n = 0,82$; $w = 360$; $k_{об} = 0,637$; $B_{\delta} = 0,9$ Тл; $k_{\mu} = 1,65$; $\delta = 0,3$ мм; $k_{\delta} = 1,32$; $Z/Z_2 = 24/28$; соотношение ЭДС 462/400 В; соотношение сечения проводников в частях обмотки 2/1.

Намагничивающий ток (3 А) и емкость конденсаторов холостого хода (19 мкФ)

определены в главе 2.1. При переключении обмотки статора по схеме звезда — треугольник ток возбуждения вырастет в 1,73 раза и будет составлять 5,19 А, реактивная составляющая тока статора базового двигателя $I_{1p} = I_{ln} \sin \varphi_n = 5,9 \cdot 0,95 = 5,69$ А. Приведенное значение реактивного тока ротора при номинальной нагрузке

$$I'_{2p} \approx I_{1p} - I_{\mu} = 5,69 - 5,19 = 0,5 \text{ А.}$$

Степень размагничивания тока ротора при номинальной нагрузке

$$n = \frac{I'_{2p}}{I_{\mu} + I'_{2p}} = \frac{I'_{2p}}{I_{\mu 0}} \approx \frac{I'_{2p}}{I_{1p}} = \frac{0,5}{5,69} = 0,087.$$

Таки образом из расчетов следует что при пуске электродвигательной нагрузки мощностью 0,36 кВт в случае с серийной обмоткой асинхронного генератора напряжение на выводах генератора упадет до 46 %, а в случае с обмоткой статора звезда — треугольник до 8,7 %.

3.2 Методика и результаты экспериментального исследования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время имеются обширные сведения об экспериментальном исследовании автономных асинхронных генераторов [114]. Хотя и ГОСТ на испытания асинхронных машин не предусматривает испытания автономного генераторного режима, многими учеными предлагались различные методы испытаний автономных асинхронных генераторов [71; 75; 76; 90]. Обширные экспериментальные исследования асинхронных генераторов с автотрансформаторными обмотками хорошо освещены в работах [71; 75; 76; 90], на основе которой разработаем программу испытаний асинхронного генератора с учетом переключаемой схемы статорной обмотки, включающая определение:

– характеристик холостого хода асинхронного генератора при схеме статорной обмотки двойная звезда и звезда — треугольник для сравнения с расчетными кривыми намагничивания и определения номинальной емкости конденсатора;

– частотных характеристик асинхронного генератора при схеме статорной обмотки двойная звезда и звезда — треугольник для определения номинальной частоты вращения и емкостей конденсаторов при которых начинается процесс возбуждения;

– внешних характеристик асинхронного генератора при схеме статорной обмотки двойная звезда и звезда — треугольник для определения устойчивости возбуждения при повышении нагрузки;

– регулировочных характеристик асинхронного генератора при схеме статорной обмотки двойная звезда и звезда — треугольник для определения дополнительных емкостей конденсаторов возбуждения с целью поддержания напряжения на выводах генератора при повышении нагрузки;

Дополнить программу необходимо измерениями пусковых токов и записью осциллограмм при подключении двигательной нагрузки. Разветвленная автотрансформаторная схема обмотки статора предусматривает необходимость измерения токов во всех частях обмотки и напряжения как на нагрузке (выводы Н), так и на конденсаторах (выводы В).

Соединив статорную обмотку асинхронного генератора в автотрансформаторный треугольник возможно не только производить пуск двигательной нагрузки, но и подключать нагрузку на пониженное напряжение. Опытные данные приведены в приложении А.

На основании вышесказанного исследуем асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора в режиме конденсаторного возбуждения при постоянной и переменной частоте вращения. Испытания проводились на специализированном испытательном стенде (рисунок 3.2) с приводным двигателем типа 2ПН132МУХЛ4. Схема испытания представлена на рисунке 3.3, где С1–С3 — регулируемый блок с конденсаторами К78-36. Опытный образец — Экспериментальный генератор с автотрансформаторной обмоткой выполнен на базе двигателя 4А100S4 АУ3. Параметры АД и расчетные данные АГ: $P_n = 3$ кВт ; $n_n = 1430$ об/мин; $\cos\varphi_n = 0,64$; кл. изоляции

Е; соотношение ЭДС 400/230 В; соотношение сечения проводников в частях обмотки 1/2 (номинальное напряжение на выводах В составляет 400 В, на выводах Н — 230 В при соединении двойной звездой).

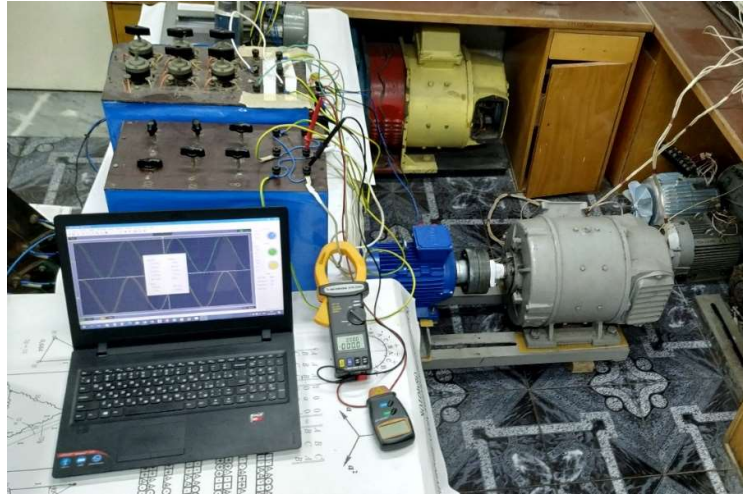


Рисунок 3.2 — Фото экспериментального стенда для исследования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

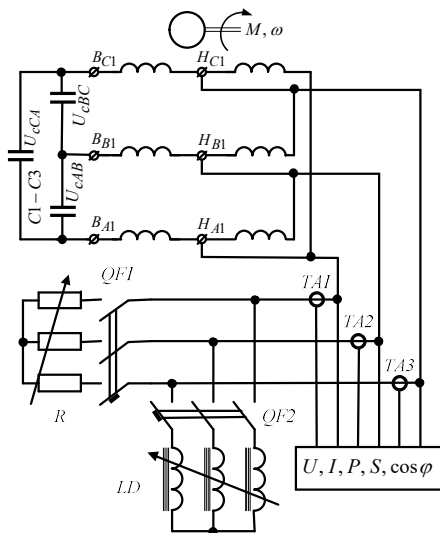


Рисунок 3.3 — Принципиальная схема исследования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

В качестве активной нагрузки использовался жидкостный реостат, в качестве реактивной нагрузки — индукционный регулятор, в качестве двигательной нагрузки — электродвигатели типа SKE63: $P_n = 0,18$ кВт ; $n_n = 2730$ об/мин; $\cos\varphi_n = 0,83$.

Питание приходит от разделительного трансформатора с линейным напряжением 230 В. Измерения проводились на одной фазе т. к. к генератору подключалась симметричная нагрузка (Приложение Б.1).

Характеристика холостого хода устанавливает качественную и количественную связь между магнитной и электрической цепями. Характеристика холостого хода показывает, что напряжение автономного генератора можно плавно регулировать в диапазоне от нуля до $1,35 U_H$ изменением тока возбуждения.

В режиме холостого хода (рисунок 3.4) скольжение $s \approx 0$. Поэтому характеристика холостого хода при постоянной частоте вращения ротора совпадает с характеристикой при постоянной частоте: $U_H = \varphi(I_1)$ при $n_r = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$; $I_H = 0$ В режиме ХХ нагрузка R и LD отключена (I_1 — ток в части обмотки H_{A1} - B_{A1}).

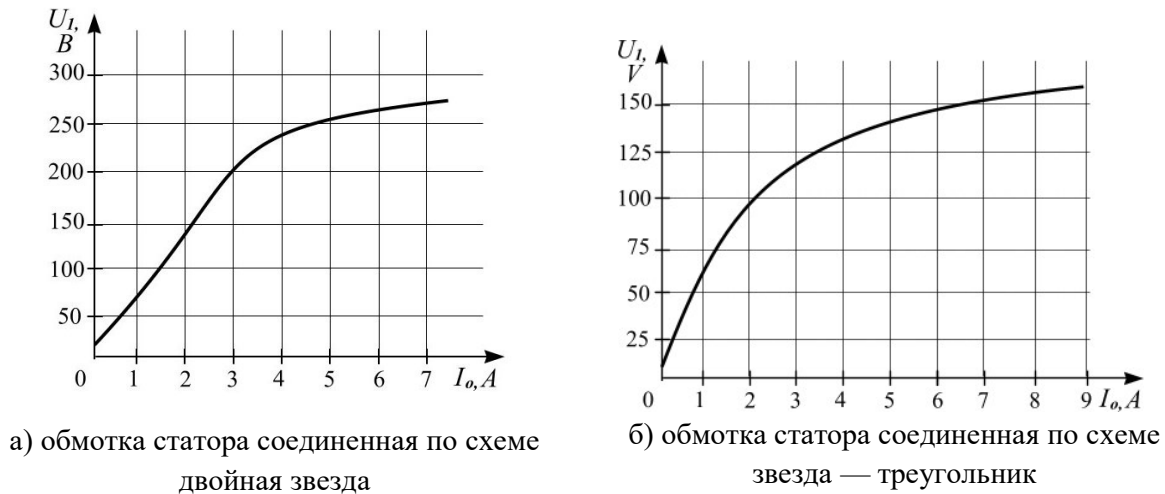


Рисунок 3.4 — Характеристики холостого хода асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Частотная характеристика (рисунок 3.5) позволяет судить о поведении асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением на холостом ходу и изменяющейся скорости вращения ротора n_2 , при постоянной величине подключенной возбуждающей емкости C и представляет собой зависимость фазного напряжения U_ϕ или силы намагничивающего тока от скорости вращения ротора n_2 при постоянном значении возбуждающей емкости $C = 18, 20, 22, 24$ мкФ.

Для различных значений емкости C возбуждение машины происходит при определенной частоте вращения n_2 ротора. Увеличение частоты вращения ротора при постоянной емкости возбуждения повышает напряжение на выводах генератора увеличивает частоту f_1 .

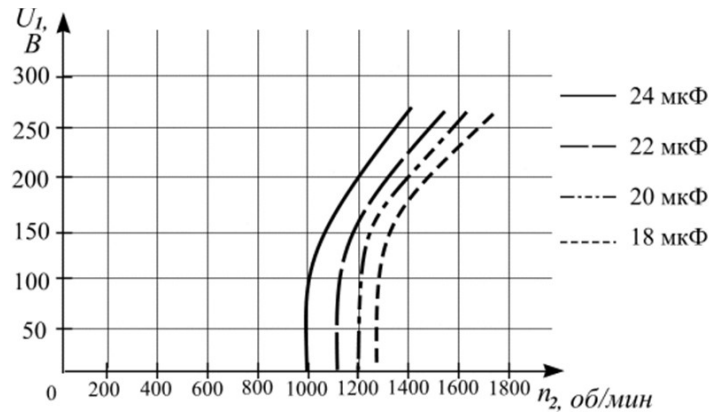


Рисунок 3.5 — Частотные характеристики асинхронного генератора

Это подтверждает работоспособность АГ при переменной частоте вращения приводного двигателя от 1020 до 1610 мин⁻¹ и постоянной емкости возбуждения — 24 мкФ. Результаты (рисунок 3.5) показывают, что при изменении частоты тока в 1,6 раза от 52,4 до 38 Гц генератор устойчиво держит возбуждение.

Внешняя характеристика (рисунок 3.6) представляет собой зависимость напряжения на его зажимах от тока нагрузки при условии постоянства частоты вращения ротора, емкости конденсаторов и коэффициента мощности нагрузки.

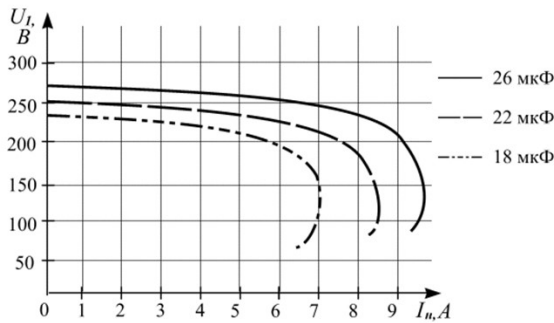
Практический интерес представляет внешняя характеристика в диапазоне изменения нагрузки от номинальной до нуля (холостой ход). Отметим, ток I_4 протекающий в общей части обмотки в $\sqrt{3}$ раза меньше чем ток нагрузки, результат векторной суммы тока нагрузки и тока возбуждения с учетом смещения частей обмотки на электрический угол Θ .

Опытные исследования производились путем изменения активной нагрузки при различных емкостях возбуждения (18–26 мкФ). Частота тока поддерживалась на постоянном уровне 50 Гц. Замерялись значения напряжений: на нагрузке $U_n U_n$, конденсаторах $U_c I_{Kc}$, токов: нагрузки $I_n I_{n2}$, конденсаторов I_c , в частях статорной обмотки асинхронного генератора I_1 и I_4 (I_1 — ток в части обмотки $H_{A1}-B_{A1}$, I_4 — ток в части обмотки $H_{A1}-H_{B1}$) $I_{я}$. Так как нагрузка симметричная измерения производились на одной фазе.

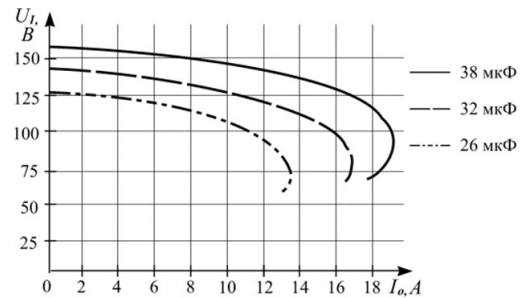
Таблица 3.2 — Данные опыта снятия внешней характеристики асинхронного генератора с обмоткой статора двойная звезда

№	Схема двойная звезда						Схема звезда — треугольник					
	С, мкФ	I_H, A	U_H, B	I_1, A	U_c, B	I_4, A	С, мкФ	I_H, A	U_H, B	I_1, A	U_c, B	I_4, A
1	18	0	228	3,5	399	3,5	26	0	129	4,6	351	3,2
2	18	3,1	216	3,3	373	3,2	26	3,2	124	4,4	342	2,6
3	18	4,3	200	3,1	349	3,5	26	6,1	117	4,2	320	3,3
4	18	4,9	245	2,5	325	4,5	26	8,7	108	3,8	297	4,3
5	18	5,6	146	1,3	260	4,6	26	11,6	93	3,3	257	5
6	22	0	247	4,8	427	4,8	32	0	144	6,3	386	4,3
7	22	3,7	230	4,5	395	4	32	3	141	6,1	679	4
8	22	5,8	224	4,1	391	4,9	32	5,9	134	5,8	365	4,2
9	22	7,7	206	3,8	366	6,5	32	9,1	125	5,5	343	5
10	22	9,2	180	2	323	7,8	32	12,1	117	5,1	326	5,9
11	26	0	266	5,5	443	5,5	38	0	153	7,7	401	5,5
12	26	3,6	256	5,2	435	4	38	6	146	7,4	394	4,9
13	26	4,7	248	4,3	429	4,4	38	12	141	7,1	388	5,5
14	26	7,9	231	4,1	409	6,5	38	18,6	135	6,8	334	6,5

Ток I_4 общей части обмотки статора меньше по величине чем ток нагрузки I_H за счет ориентирования частей обмотки статора одной фазы. Как было показано нами в более ранних работах.



а) обмотка статора соединенная по схеме двойная звезда



б) обмотка статора соединенная по схеме звезда — треугольник

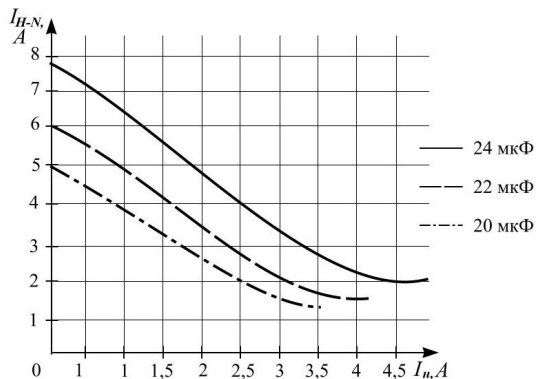
Рисунок 3.6 — Внешние характеристики асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

При соединении статорной обмотки опытного образца в автотрансформаторный треугольник номинальное напряжение на выводах составляет 142 В.

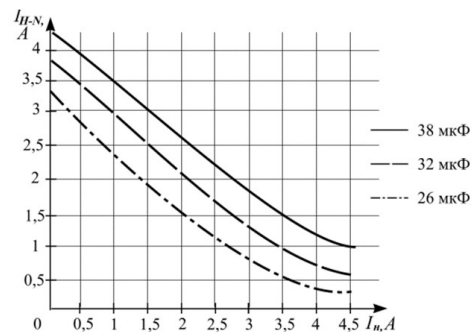
Внешние характеристики показывают, что АГ можно загружать при емкости возбуждения 38 мкФ до 2 кВт активной нагрузки без включения дополнительной емкости. Это соответствует 70 % от номинальной мощности генератора. Для увеличения загрузки генератора до номинальной мощности в 3 кВт необходимо включить дополнительную емкость 8 мкФ.

Необходимо отметить, что результирующий активный ток $I_{H-N} I_{4B}$ общей части обмотки статора $H_{A1}-H_{B1}$ меньше по величине чем ток нагрузки $I_H I_H$, о чем свидетельствуют данные опыта снятия внешней характеристики. Однако, при подключении активно-реактивной нагрузки на выводы Н векторная сумма токов в общей части обмотки $H_{A1}-H_{B1}$ будет еще меньше чем при подключении активной нагрузки.

Чтобы подтвердить расчеты был проведен опыт снятия внешней характеристики (рисунок 3.7). Опыт производился при переменной реактивной нагрузке ($I_H I_H$) с в пределах от 0 до 4 А при различных емкостях возбуждения (26, 32, 38 мкФ). Частота тока поддерживалась на постоянном уровне 50 Гц. Производились замеры напряжений: на нагрузке $U_H U_H$, конденсаторах U_C ; токов: нагрузки I_H , конденсаторов I_C , в общей части обмотки асинхронного генератора Н1–Н2.



а) обмотка статора соединенная по схеме
двойная звезда



б) обмотка статора соединенная по схеме
звезда — треугольник

Рисунок 3.7 — Внешние характеристики асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Для подтверждения утверждений главы 2.1 (рисунок 2.8), выделим из результатов опыта снятия внешней характеристики (схема статорной обмотки двойная звезда) измерения при переменной активной нагрузке (I_H) в пределах от 0 до 9 А, для поддержания необходимого тока возбуждения производилось подключение к конденсаторам номинальной емкости 20 мкФ, дополнительные конденсаторы емкостью 4 мкФ включались при токе нагрузки 6 А (таблица 3.3). Частота тока поддерживалась на постоянном уровне 50 Гц (рисунок 3.8 и 3.9).

Таблица 3.3 — Результаты опыта снятия внешних характеристик

f, Гц	$n_{об}$, мин ⁻¹	U_H , В	I_H , А	U_K , В	I_K , А	I_{H-1} , А	$U_{я}$, В	$I_{я}$, А	C_d , мкФ
50	1500	240	0	405	4,1	4,1	108	5	20
50	1514	226	3,3	380	3,9	3,7	112	14	20
50	1527	209	5,4	356	3,5	4,9	112	18	20
50	1534	231	7,9	409	3,1	7,5	116	29	24
50	1544	201	9,5	409	2,8	8,8	116	35	24

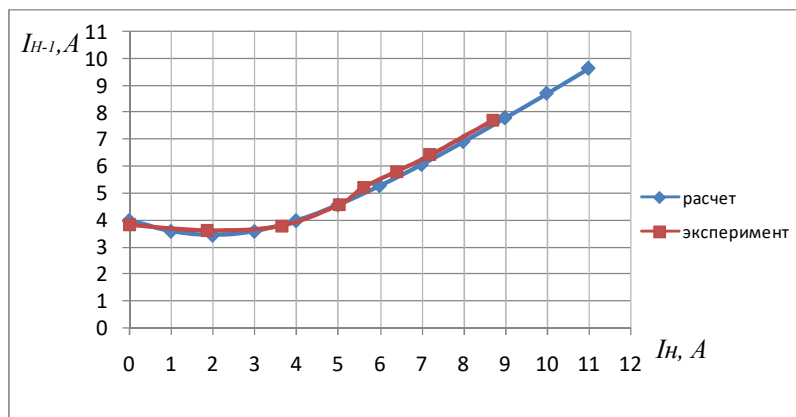


Рисунок 3.8 — Зависимость тока в части обмотки H1-1 от активного тока нагрузки

Результирующий активный ток I_4 в общей части обмотки статора H1-1 снятый в эксперименте практически совпадает с расчетным I_{H1-1} (расхождение не превышает 5 %). Расхождение электрических потерь в генераторе от расчетных связано с уменьшением тока возбуждения в части обмоток H-B при увеличении нагрузки вследствие

падения напряжения на конденсаторах и погрешностью измерений.

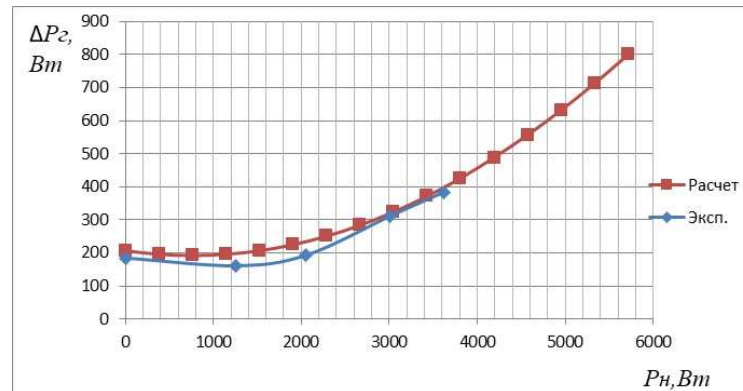


Рисунок 3.9 — Зависимость электрических потерь в обмотках статора асинхронного генератора расчетные на основе теоретических и экспериментальных данных

Режим работы с двигательной нагрузкой проводился без подключения дополнительных конденсаторов возбуждения для подтверждения инженерных расчетов главы 3.1, для этого использовались две вентиляционные установки с электродвигателями типа SKE63: $P_n = 0,18$ кВт; $n_n = 2730$ об/мин; $\cos\varphi_n = 0,83$, так как имеют квадратичную зависимость нарастания момента от скорости. Вентиляционные электроустановки подключались к асинхронному генератору с переключаемой обмоткой статора мощностью 3 кВт соединенной по схемам звезда — треугольник (напряжение номинальное составляет 220 В) и двойная звезда (напряжение номинальное составляет 380 В).

Для сравнения аналогичные опыты проводились с серийным асинхронным двигателем работающем в автономном генераторном режиме по схемам треугольник и звезда. Напряжение и токи измерялись токовыми клещами типа АТК. Осциллограммы токов и напряжений записывались цифровым осциллографом типа DSO.

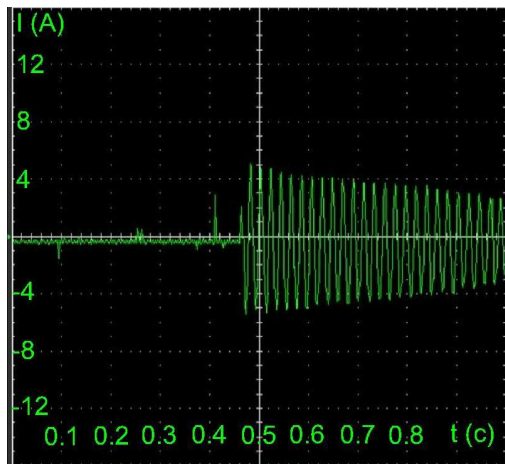
Емкость конденсаторов холостого хода из опыта составляет для генератора на базе серийного двигателя 26 мкФ, для асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора 18 мкФ. В таблице 3.4 приведены опыты с завышенной емкостью конденсаторов для удобного сравнения с результатами испытаний опытного образца.

Таблица 3.4 — Результаты подключения вентиляционных установок к асинхронному генератору с переключаемой обмоткой статора.

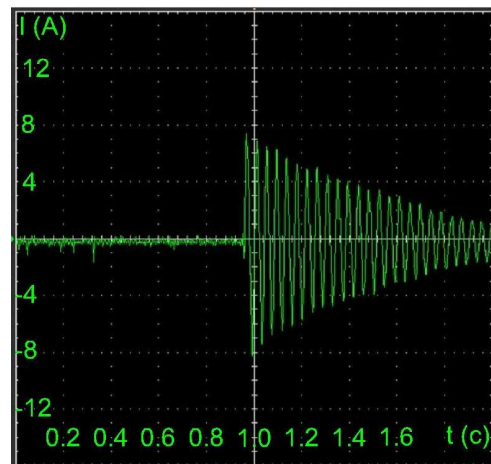
№	C, мкФ	Схема соединения	Режим	I_n , А	$I_{нА}$, А	$U_{н1-н2}$, В	I_1 , А	$U_{сАВ}$, В	f, Гц	ω_g , ^{-1}c	ΔU , %
1	36	звезда — треугольник	холостой ход	0	0	144	6,8	390	50	159.3	0
2	36	звезда — треугольник	пуск	4,3	0,7	141	6,6	384	50	158.9	9,7
3	24	двойная звезда	холостой ход	0	0	245	5	434	50	160.7	0
4	24	двойная звезда	пуск	8,7	1,1	227	4,6	406	50	160.1	37,8
5	70	треугольник	холостой ход	0	0	225	8,8	225	50,1	157.3	0
6	70	треугольник	пуск	3,7	0,4	210	8,5	210	50	156.9	12,5
7	36	звезда	холостой ход	0	0	426	7,6	426	50,1	157.7	0
8	36	звезда	пуск	5,2	0,7	405	7,2	405	50	157.1	45,4

Так как статорная обмотка асинхронного генератора рассчитана на 240 В (на выводах Н), обмотки статора подключаемых электродвигателей соединены треугольником. Далее подключались электродвигатели к асинхронному генератору с обмоткой статора соединенной по схеме звезда — треугольник (напряжение номинальное составляет 140 В) затем по схеме двойная звезда (напряжение номинальное составляет 240 В). Осциллограммы токов и напряжений приведены на рисунках 3.10 и 3.11.

Результаты опытов показывают, что при пуске вентиляционных установок общей мощностью 0,36 кВт от асинхронного генератора с обмоткой статора соединенной в двойную звезду пусковой ток составляет 8,7 А, при этом напряжение на выводах составляет 141 В (напряжение на выводах генератора падает на 37,8 %). Соединении обмотки статора по схеме звезда — треугольник позволяет снизить пусковой ток до 4,3 А, благодаря этому падение напряжения составило 131 В напряжение на выводах генератора падает на 9,7 %).

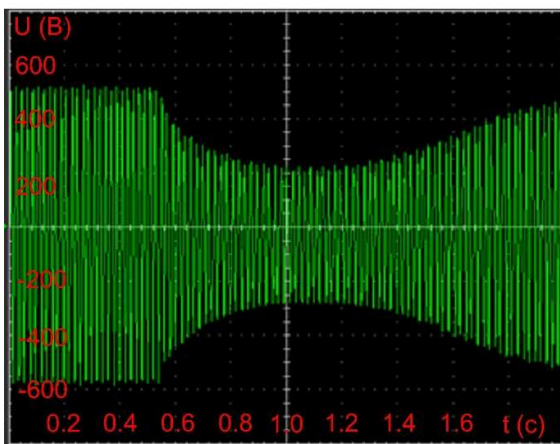


обмотка статора соединенная по схеме звезда — треугольник

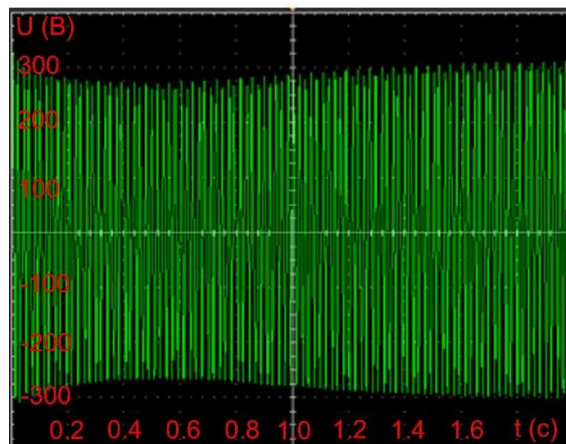


б) обмотка статора соединенная по схеме двойная звезда

Рисунок 3.10 — Осциллограммы токов при включении электродвигателей к асинхронному генератору с переключаемой обмоткой статора (настройки осциллографа 4 А/кл, 100 мс/кл)



а) серийная обмотка статора соединенная звездой



б) обмотка статора соединенная по схеме звезда — треугольник

Рисунок 3.11 — Осциллограммы напряжений при включении двигательной нагрузки мощностью 0,36 кВт к асинхронному генератору (настройки осциллографа 100 В/кл, 200 мс/кл)

Отсюда следует, что при включении резервной электростанции с асинхронным генератором для питания двигательной нагрузки со схемой статорной обмотки звезда — треугольник с последующим переключением на двойную звезду позволит

снизить пусковой ток — из опыта практически в 2 раза, при этом падение напряжения снизится почти в 4 раза, что позволяет подключать к генератору двигательную нагрузку большей мощности без срыва возбуждения.

3.3 Разработка принципиальной схемы системы возбуждения асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора

Исследование системы возбуждения генератора с переключаемой обмоткой статора проводились на автоматизированном стенде для снятия осциллограмм токов переходных процессов и определения электрических потерь (рисунок 3.12).

Для самовозбуждения асинхронный генератор должен вращаться с определенной частотой вращения, при этом к его выводам должны подключаться конденсаторы с определенной емкостью. Поддержание постоянной скорости осуществляется ПЧВ путем обратной связи с энкодером. Емкость основного конденсатора в экспериментальной установке установлена рядом с генератором, а дополнительный конденсатор рядом с нагрузкой чтобы осуществить компенсацию реактивного тока в питающей линии. Подключение осуществляется к выводам U, V и W. При этом на выводах генератора напряжение равно 380 В. Но при подключении трехфазной нагрузки к тем же выводам происходит снижение напряжения на всех трех фазах. Согласно ГОСТ Р 54149-2010: положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю [11].

Для изменения частоты вращения двигателя в стенде используется частотный преобразователь. Такое решение обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, при сохранении высокой жесткости механических характеристик.

Автоматизированный стенд управления асинхронным генератором (рисунок 3.12) состоит из трехфазного источника питания, устройств защиты и коммутации

(QF1–QF2 и KM1–KM4), ПЧВ, приводного двигателя M1 соединенного с генератором G, нескольких блоков конденсаторов (C1–C2), нагрузки в виде электродвигателя M и устройств для измерения, а параметров электрической сети (анализатор сети Овен) и программируемого контроллера ПЛК-63.

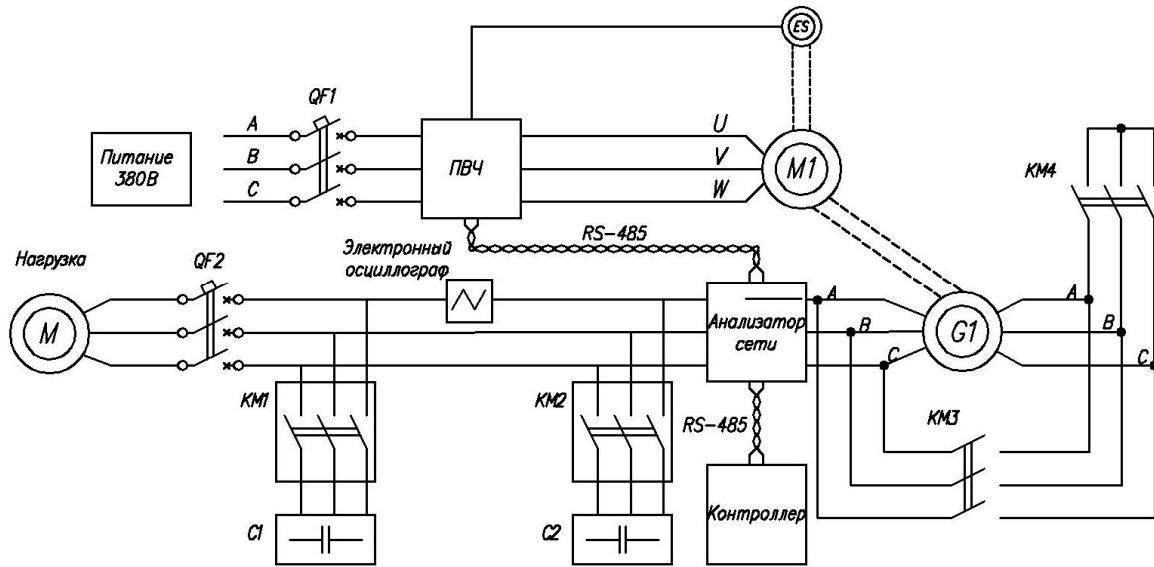


Рисунок 3.12 — Автоматизированный стенд испытания асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Исходя из расчетов был выбран частотный преобразователь компании ОВЕН ПЧВ101-К37-А с функцией поддержание заданной скорости вращения двигателя, что было реализовано путем подключения инкрементального энкодера Autonics E40S6-100-3-T-24 к цифровому входу частотного преобразователя. Благодаря наличию обратной связи, энкодер позволяет с высокой точностью поддерживать заданную скорость.

Главным элементом управления стендом является программируемый логический контроллер для малых систем автоматизации от компании ОВЕН ПЛК100-24/220.Р. Исходными переменными для системы автоматического регулирования напряжения являются параметры сети асинхронного генератора. Для получения этих данных используется модуль измерения параметров электрической сети ОВЕН МЭ110-220.3М. (Приложение Б.2)

Значения величины силы тока, напряжения, частоты, мощности, фазового угла и коэффициента мощности и передавались в сеть по интерфейсу RS-485.

В программе ПЛК на языке SFC это реализуется путем сравнения значения напряжения, полученного в виде переменной от анализатора сети, с заданным максимальным (418 В) и минимальным значением (342 В).

По результатам расчета было принято решение, что конденсаторные батареи будут включаться в сеть генератора в три ступени: 4, 8, 18 мкФ соответственно. Таким образом физически контроллер управляет тремя контакторами, коммутирующими конденсаторные батареи емкостью 4, 8, 18 мкФ. Но программно мы расширим этот диапазон до шести значений: 8, 12, 18, 22, 26, 30 мкФ, путем комбинирования коммутируемых батарей конденсаторов.

Программа выравнивания напряжения (рисунок 3.13) сети реализована путем последовательного подбора необходимой емкости конденсаторных батарей. Алгоритм работы следующий: напряжение сети сравнивается заданной уставкой, если условие $U_c < U_{уст}$ выполняется, то подается сигнал на R-триггер RT1 для включения основной емкости с помощью SR-триггера SR1 и на вход таймера TON1. Происходит самовозбуждение генератора. Если напряжение еще ниже уставки, то по истечении времени задержки TON1 подается сигнал на отключение SR1 и включение SR2. Емкость увеличивается на одну ступень. Процесс повторяется до тех пор, пока напряжение не превысит минимальное значение уставки. При выполнении выше сказанного условия, процесс останавливается на текущем значении емкости, пока напряжение опять не выйдет за критические значения. Процесс регулирования по верхней границе построен аналогично, только перебор емкостей производится в обратном порядке.

Для подтверждения теоретических расчетов потерь электроэнергии при пуске бустерного насоса главы 2.2 проведены контрольные испытания пуска асинхронного двигателя серии АИР100S4 мощностью 3 кВт от асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора той же мощности и от сети. В первом случае конденсаторы были разделены на рабочие емкостью 26 мкФ (подключены к выводам генератора) и дополнительные емкостью 70 мкФ (подключены к выводам асинхронного

двигателя), причем дополнительные конденсаторы включались на время пуска, а после — емкость конденсаторов сокращалась до 13 мкФ для компенсации реактивной составляющей тока двигателя. Цифровой осциллограф отслеживал уже скомпенсированный ток в линии до асинхронного генератора. Переключение емкости конденсаторов произошло после пуска, чтобы был хорошо виден переходный процесс (рисунок 3.14). Во втором случае пуск асинхронного двигателя производился напрямую от сети.

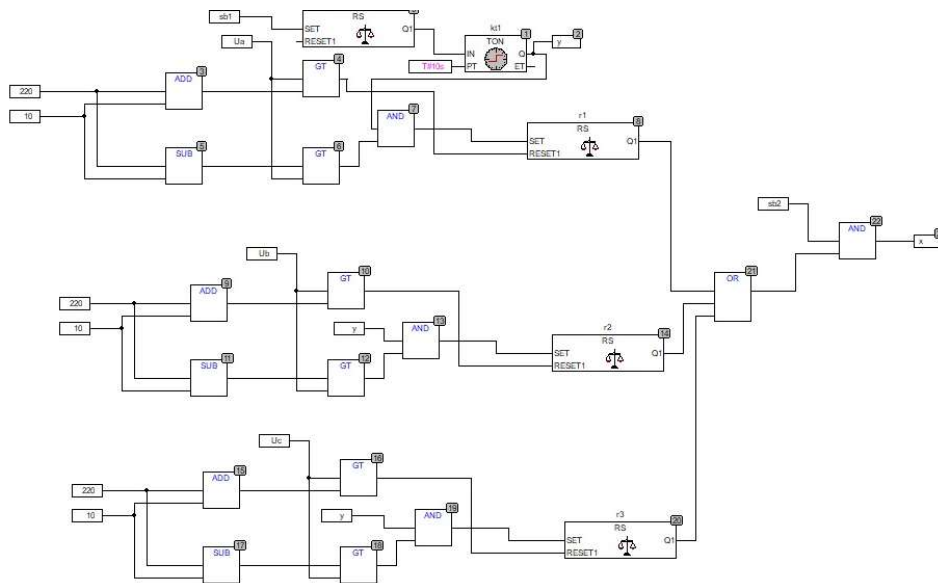
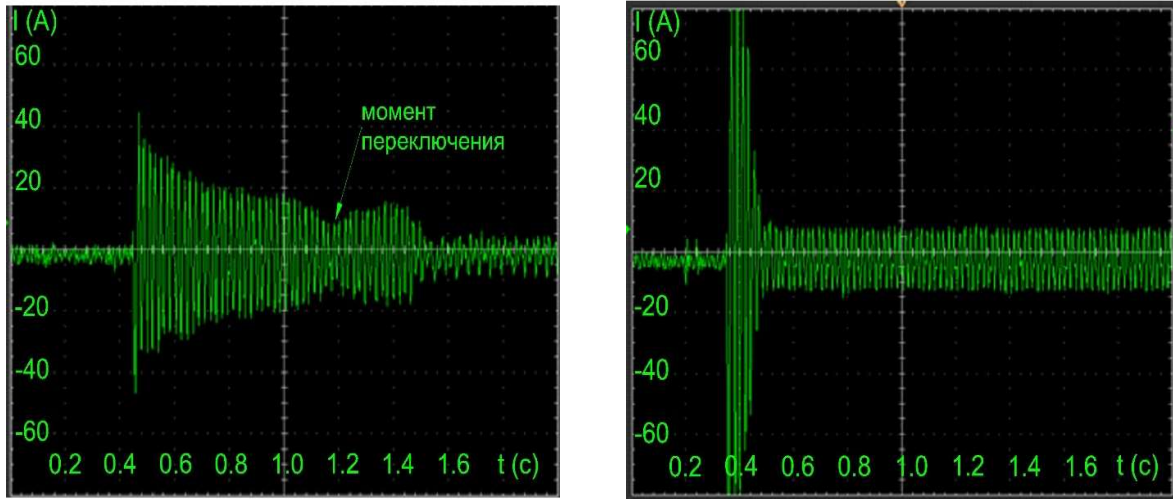


Рисунок 3.13 — Схема управления автоматическим подключением конденсаторных ступеней

Осциллограммы токов показывают, что пуск из-за сниженного напряжения по времени растянулся до 300 мс, в сравнении с прямым пуском -100 мс, но ток в линии в случае использования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора (амплитудное значение 44 А) ниже практически в 2 раза и совпадают с расчетной осциллограммой токов (амплитудное значение 49 А на рисунке 2.15).



а) к асинхронному генератору с переключаемой обмоткой статора (момент переключения емкости конденсаторов)

б) от сети

Рисунок 3.14 — Осциллограммы токов при включении двигательной нагрузки (настройки осциллографа 20 А/кл, 200 мс/кл)

Расчет электрических потерь электроэнергии производился по формулам 2.14, 2.14 и 2.20 для линии электроснабжения длиной 300 м сечением 10 мм², а потери электроэнергии показал по формуле 2.26. Потери электроэнергии в случае с использованием асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора составляет $\Delta W_2 = 44$ кВтч за один цикл и отличается на 11,3 % от расчетного в главе 2.2.

Разработанный автоматизированный стенд позволил записать осциллограмму токов пуска асинхронного двигателя от асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора и момент переключения статорной обмотки из звезда — треугольник в двойную звезду с включением конденсаторов необходимой емкости автоматически (рисунок 3.15).

Испытания показали, что при переключении обмотки статора асинхронного генератора происходит бросок тока, который объясняется контактным переключением в схеме электропитания генератор-двигатель, где обмотки двигателя представляют собой индуктивную нагрузку. Напряжение самоиндукции обмоток асинхронного двигателя, в момент переключения может приводить к образованию искры в

контактных соединениях, что ведет к снижению надежности и механическому износу.

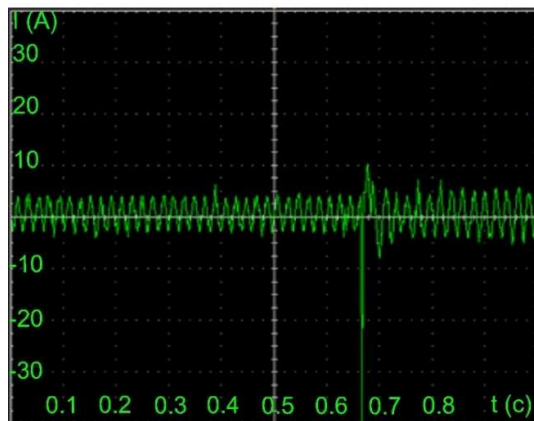


Рисунок 3.15 — Осциллограммы тока в момента переключения статорной обмотки из звезда — треугольник в двойную звезду (настройки осциллографа 10 А/кл, 100 мс/кл)

При переключении обмоток асинхронного генератора могут наводиться затухающие совпадающие по фазе ЭДС, которые могут увеличивать в начальный момент ЭДС значительно больше 380 В. Поэтому актуальным направлением исследования является разработка электронных коммутирующих элементов — ключей, которые имеют более высокое быстродействие и лучшие энергетические показатели, например возможно адаптировать предложенный Харченко Д.П. вариант микроконтроллерного блока управления симисторами.

3.4 Выводы по третьей главе

1. Произведен сравнительный инженерный расчет магнитной системы асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора и с серийной обмоткой статора, который показал, что при пуске электродвигательной нагрузки мощностью 0,36 кВт в случае с серийной обмоткой статора асинхронного генератора напряжение

на выводах генератора снижается до 46 %, а в случае с переключаемой обмоткой статора до 9 %.

2. Проверена работоспособность асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора. Проведены испытания с записью характеристик генератора (характеристика холостого хода, частотная, внешняя, регулировочная). Полученные данные токов в частях переключаемой обмотки во время снятия внешней характеристики близки к расчетным, погрешность при этом составляет до 5 %.

3. На основании экспериментально полученных характеристик произведен расчет электрических потерь в переключаемой обмотке статора асинхронного генератора, расхождение с теоретически полученными данными не превышает 5 %, которое связано с уменьшением тока возбуждения при увеличении нагрузки вследствие падения напряжения на конденсаторах и погрешностью измерений.

4. Проведены экспериментальные испытания с пуском двигательной нагрузки мощностью 0,36 кВт. Доказано, что при использовании асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора пусковой ток двигательной нагрузки снижается в 2 раза, о чем свидетельствуют полученные осциллограммы токов, что приводит к снижению падения напряжения с 45,4 до 9,7 %. Использование автотрансформаторного варианта обмотки статора позволяет снизить емкость конденсаторной установки на холостом ходу с 28 до 19 мкФ, а при пуске — с 70 до 36 мкФ.

4 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ СТАТОРНОЙ ОБМОТКОЙ В СОСТАВЕ МОБИЛЬНОГО ПОЛИВНОГО АГРЕГАТА

4.1 Экономическая эффективность внедрения асинхронного генератора в составе дождевальнoй машины кругового действия

На рынке для полива площадей представлен ряд дождевальнoх машин с различным количеством поливальных секций формируя радиус полива 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 м. Таким образом при анализе экономической эффективности необходимо учитывать три составляющие электрических потерь — в питающей линии, электродвигателе и в генераторе. Так как потери электрические в электродвигателе и асинхронном генераторе при компенсации реактивной мощности не зависят от места установки конденсаторных батарей основная экономия электроэнергии будет зависеть от параметров питающей линии.

При расчете экономической эффективности для сравнения будем рассматривать два варианта питания электрооборудования дождевальнoй машины от автономного источника:

- с серийным генератором (асинхронный и синхронный генератор);
- с асинхронным генератором с переключаемой обмоткой статора.

Для расчета стоимости используем средние цены оборудования, которое можно приобрести в свободном доступе на рынке на 2021 г. При расчете капиталовложения учтены затраты на строительнo-монтажные работы (10 %) и транспортные расходы (10 %)

Анализ серийных автономных источников рассмотрен в главе 1.2, который показал, что для питания электрооборудования дождевальнoх машин применяются дизельные с 4-тактным приводным двигателем генераторные установки частотой вращения 3000 об/мин и 1500 об/мин приводящиеся во вращение, наработка на отказ от 4000 до 20000 часов. Приведем для сравнения с предлагаемым автономным источником синхронный и асинхронный генератор переменного тока трехфазного исполнения с функцией автостартерного пуска (таблица 4.2) .

Таблица 4.1 — Расчет стоимости асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Наименование	Кол-во, шт.	Стоимость единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
Энкодер Autonics E40S6-100-3-T-24	1	6030	6000
Логический контроллер ОВЕН ПЛК100/150/154	1	15600	15600
Модуль измерения параметров электрической сети ОВЕН МЭ110-220.3М.	1	4980	5000
Трансформаторы тока	3	900	2700
Конденсаторы	15	6400	9700
Приводной двигатель	1	45000	45000
Магнитный пускатель	5	500	2500
Автоматический выключатель	5	500	2500
Пуско-сигнальная арматура, соединительные провода и т. к.	1	2000	2000
Асинхронный генератор	1	30000	30000
Монтажные работы,	-	-	6050
Транспортные расходы	-	-	9680
Итого	-	-	136730

Таблица 4.2 — Расчет стоимости оборудования

Наименование	Кол-во, шт.	Стоимость единицы оборудования, руб.
Дизельный генератор, SKAT УГД-7500ЕТ. Мощность 7,5 кВт, 230/400 В (синхронный генератор)	1	112210
Дизельный генератор Geko 7801 ED-AA/ZEDA 380 В, мощность 6,4 кВт электростартер (асинхронный генератор)	1	339900

Анализ режима работы дождевальная машины (глава 1, рисунок 1.7) показал наличие частых пусков электродвигателей тележек и бустерного насоса (таблица 4.3). Так как мощность электроприводов тележек значительно меньше мощности бустерного насоса, потери при этом также будут значительно меньше, поэтому расчет

экономической эффективности произведем с учетом уменьшения электрических потерь при питании только бустерного насоса за счет использования компенсирующих конденсаторов, которые для асинхронного генератора являются одновременно конденсаторами возбуждения и сниженного напряжения при пуске.

Таблица 4.3 — Данные для анализа режима работы дождевальной машины

Электродвигатели дождевальной машины	Кол. пусков в одном цикле, шт.	$T_{ц}$, с	$T_{шц}$, с	$T_{рц}$, с	$T_{п,мин}$	$T_{р,мин}$
Электропривода тележек	6	35	2,88	32,12	3,32	37,08
	5	30	2,4	27,6	2,77	31,86
	4	23	1,92	21,08	2,22	24,33
	3	16	1,44	14,56	1,66	16,81
	2	11	0,96	10,04	1,11	11,59
	1	7	0,48	6,52	0,55	7,53
Бустерный насос	8	45	2,56	42,44	2,96	48,99
Всего					14,96	177,81

где T_p — суммарное время работы электродвигателей тележек и бустерного насоса без учета затраченного времени на пуск за один день;

T_n — суммарное время затраченное на пуск электродвигателей тележек и бустерного насоса за один день;

$T_{рц}$ — суммарное время работы электродвигателей тележек и бустерного насоса без учета затраченного времени на пуск за один цикл перемещения дождевальной машины;

$T_{шц}$ — суммарное время затраченное на пуск электродвигателей тележек и бустерного насоса за один цикл перемещения дождевальной машины;

$T_{ц}$ — время работы электродвигателей тележек и бустерного насоса одного цикла за который происходит перемещения дождевальной машины на определенный угол;

Электрические потери в линии относятся к нагрузочным потерям электроэнергии и могут быть рассчитаны за период T часов (D дней) методом оперативных

расчетов, при котором электрические потери рассчитывают на основе заданной схемы сети и нагрузок ее элементов, определенных с помощью измерений или с помощью расчета нагрузок элементов электрической сети в соответствии с законами электротехники. Этот метод удобен для расчета питающей линии дождевальной машины так как известна нагрузочная диаграмма (рисунок 2.18).

$$\Delta W = 3 \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot \sum_{j=1}^m I_{ij}^2 \cdot \Delta t_{ij}$$

где n — число элементов сети; Δt — интервал времени, в течение которого токовую нагрузку I_{ij} i -го элемента сети с сопротивлением R_i , принимают неизменной; m — число интервалов времени.

Токовые нагрузки элементов сети определяют на основе данных диспетчерских ведомостей, оперативных измерительных комплексов и автоматизированных систем учета и контроля электроэнергии. Расчет электрических потерь в питающей линии дождевальной машины при применении асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора и серийного генератора приведены в таблице 4.4. В таблице: L — длина питающей линии дождевальной машины, кВт; $R_{л}$ — сопротивление питающей линии дождевальной машины, кВт; $\Delta P_{элп}$ — потери электрические при пуске электродвигателя бустерного насоса, кВт; $\Delta P_{элр}$ — потери электрические при питании электродвигателя бустерного насоса, кВт; $У$ — сумма ущерба от электрических потерь, руб/год;

Таблица 4.4 — Расчет электрических потерь в питающей линии дождевальной машины при применении асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора и серийного генератора

$L, м$	$R_{л}, Ом$	$s, мм^2$	$\Delta P_{элр}, Вт$	$\Delta P_{элп}, Вт$	$\Delta W_{элр}, кВтч/день$	$\Delta W_{элп}, кВтч/день$	$\Delta W_{\Sigma эл}, кВтч/год$	$У, руб/год$
асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора								
100	0,29	6	218,2	209,5	0,86	0,03	215,2	1127,7
200	0,57	6	436,5	418,9	1,72	0,07	430,4	2255,5
300	0,86	6	654,7	628,4	2,59	0,10	645,6	3383,2
400	1,15	6	873,0	837,9	3,45	0,14	860,9	4510,9

L, м	R _л , Ом	s, мм ²	ΔP _{элр} , Вт	ΔP _{элп} , Вт	ΔW _{элр} , кВтч/день	ΔW _{элп} , кВтч/день	ΔW _{Σэл} , кВтч/год	У, руб/год
500	1,44	6	1091,2	1047,3	4,31	0,17	1076,1	5638,6
600	1,79	6	1359,6	1304,9	5,37	0,22	1340,7	7025,4
700	2,01	6	1527,7	1466,3	6,03	0,24	1506,5	7894,1
100	0,17	10	130,9	125,7	0,52	0,02	129,1	676,6
200	0,34	10	261,9	251,4	1,03	0,04	258,3	1353,3
300	0,52	10	392,8	377,0	1,55	0,06	387,4	2029,9
400	0,69	10	523,8	502,7	2,07	0,08	516,5	2706,5
500	0,86	10	654,7	628,4	2,59	0,10	645,6	3383,2
600	0,98	10	744,4	714,4	2,94	0,12	734,0	3846,3
700	1,21	10	916,6	879,8	3,62	0,15	903,9	4736,5
100	0,11	16	81,8	78,5	0,32	0,01	80,7	422,9
200	0,22	16	163,7	157,1	0,65	0,03	161,4	845,8
300	0,32	16	245,5	235,6	0,97	0,04	30,3	158,6
400	0,43	16	327,4	314,2	1,29	0,05	322,8	1691,6
500	0,54	16	409,2	392,7	1,62	0,07	403,5	2114,5
600	0,54	16	409,2	392,7	1,62	0,07	403,5	2114,5
700	0,75	16	572,9	549,8	2,26	0,09	564,9	2960,3
100	0,07	25	52,4	50,3	0,21	0,01	51,7	270,7
200	0,14	25	104,8	100,5	0,41	0,02	103,3	541,3
300	0,21	25	157,1	150,8	0,62	0,03	155,0	812,0
400	0,28	25	209,5	201,1	0,83	0,03	206,6	1082,6
500	0,34	25	261,9	251,4	1,03	0,04	258,3	1353,3
600	0,41	25	311,4	298,9	1,23	0,05	307,1	1609,2
700	0,48	25	366,7	351,9	1,45	0,06	361,6	1894,6
серийный генератор								
100	0,29	6	933,5	1779,7	3,69	0,30	955,8	5008,3
200	0,57	6	1867,1	3559,3	7,37	0,59	1911,6	10016,7
300	0,86	6	2800,6	5339,0	11,06	0,89	2867,4	15025,0
400	1,15	6	3734,2	7118,6	14,75	1,18	3823,2	20033,4
500	1,44	6	4667,7	8898,3	18,44	1,48	4779,0	25041,7
600	1,79	6	5815,7	11086,7	22,97	1,84	5954,3	31200,5
700	2,01	6	6534,8	12457,6	25,81	2,07	6690,5	35058,4
100	0,17	10	560,1	1067,8	2,21	0,18	573,5	3005,0
200	0,34	10	1120,3	2135,6	4,42	0,35	1146,9	6010,0
300	0,52	10	1680,4	3203,4	6,64	0,53	1720,4	9015,0
400	0,69	10	2240,5	4271,2	8,85	0,71	2293,9	12020,0
500	0,86	10	2800,6	5339,0	11,06	0,89	2867,4	15025,0
600	0,98	10	3184,0	6069,8	12,58	1,01	3259,9	17081,8
700	1,21	10	3920,9	7474,5	15,49	1,24	4014,3	21035,0
100	0,11	16	350,1	667,4	1,38	0,11	358,4	1878,1

L, м	R _л , Ом	s, мм ²	ΔP _{элр} , Вт	ΔP _{элп} , Вт	ΔW _{элр} , кВтч/день	ΔW _{элп} , кВтч/день	ΔW _{Σэл} , кВтч/год	У, руб/год
200	0,22	16	700,2	1334,7	2,77	0,22	716,8	3756,3
300	0,32	16	1050,2	2002,1	4,15	0,33	1075,3	5634,4
400	0,43	16	1400,3	2669,5	5,53	0,44	1433,7	7512,5
500	0,54	16	1750,4	3336,9	6,91	0,55	1792,1	9390,6
600	0,54	16	1750,4	3336,9	6,91	0,55	1792,1	9390,6
700	0,75	16	2450,6	4671,6	9,68	0,78	2509,0	13146,9
100	0,07	25	224,1	427,1	0,88	0,07	229,4	1202,0
200	0,14	25	448,1	854,2	1,77	0,14	458,8	2404,0
300	0,21	25	672,2	1281,4	2,65	0,21	688,2	3606,0
400	0,28	25	896,2	1708,5	3,54	0,28	917,6	4808,0
500	0,34	25	1120,3	2135,6	4,42	0,35	1146,9	6010,0
600	0,41	25	1332,1	2539,4	5,26	0,42	1363,8	7146,5
700	0,48	25	1568,4	2989,8	6,19	0,50	1605,7	8414,0

Расчет электрических потерь при двух вариантах питания электрооборудования дождевальная машины от автономного источника показал, что потери электрические в линии существенно зависят от протяжения и сечения питающей линии. В случае с питающей линией сечением 6 мм² потери электрические при питании от серийного автономного источника в зависимости от длины линии составляет 136 — 956 кВтч в год, а от асинхронного генератора с переключаемой обмоткой: 619 — 4338 кВтч в год.

Для покрытия электрических потерь серийный генератор должен дополнительно выработать электрической энергии на что расходуется топливо [23]:

$$У = C_T \cdot G_T \cdot \Delta W_{\Sigma эл}$$

где C_T — стоимость дизельного топлива 47 руб/л;

G_T — удельный расход топлива (для большинства двигателей мощностью 10–100 кВт $G_T = 0,3$ кг/кВтч).

Доход от применения асинхронного генератора с переключаемой обмоткой будет определяться по формуле

$$Д_{эл} = У_{СГ} - У_{АГ}$$

и находиться в пределах 6811–47679 руб/год, что указывает на разный срок окупаемости.

Учтем степень инфляции (8 % в 2021г., I), минимальную норму прибыли (5 %, PP) и некоторый риск (5 %, P) вложения инвестиций:

$$E = I + PP + P = 8 + 5 + 2 = 15 \% ,$$

где E — ставка сравнения или коэффициент дисконтирования, I — темп инфляции (8 % в 2021г.).

Определим чистый дисконтированный доход за 5 лет эксплуатации при норме дисконта $E = 0,15$ для случая с питающей линией $s = 6 \text{ мм}^2$ и $L = 100 \text{ м}$

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} &= \sum_{i=1}^5 \frac{D}{(1+E)^i} - K_0 = \\ &= \frac{10,4}{(1+0,15)^1} + \frac{10,4}{(1+0,15)^2} + \frac{10,4}{(1+0,15)^3} + \frac{10,4}{(1+0,15)^4} + \frac{10,4}{(1+0,15)^5} - 136,7 = -100,9 \text{ тыс. руб} \end{aligned}$$

Таким образом этот вариант не окупаем. Для сравнения произведем расчет при норме дисконта $E = 0,15$ для случая с питающей линией $s = 6 \text{ мм}^2$ и $L = 500 \text{ м}$

$$\begin{aligned} \text{ЧДД} &= \sum_{i=1}^5 \frac{D}{(1+E)^i} - K_0 = \\ &= \frac{52,2}{(1+0,15)^1} + \frac{52,2}{(1+0,15)^2} + \frac{52,2}{(1+0,15)^3} + \frac{52,2}{(1+0,15)^4} + \frac{52,2}{(1+0,15)^5} - 136,7 = 39 \text{ тыс. руб} \end{aligned}$$

Так как ЧДД положителен, этот вариант уже возможен к рассмотрению. Определить границы окупаемости возможно через индекс доходности (рентабельности) инвестиций ИД (PI), который показывает возвратность вложенных капиталовложений за расчетный период, в данном случае:

$$\text{ИД} = \frac{\text{ЧДД}}{K} + 1 = \frac{39}{136,7} + 1 = 1,29.$$

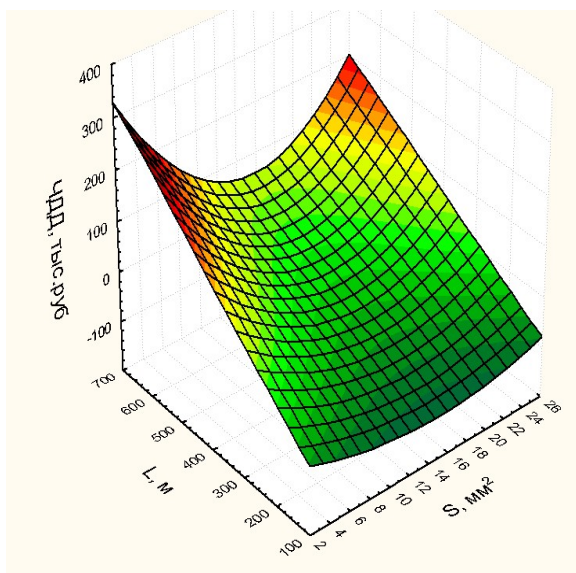
Произведем расчет ЧДД и индекса доходности IP для случаев с параметрами питающей линии $L(100; 200; 300; 400; 500; 600; 700 \text{ м})$ и $s(6; 10; 16; 25 \text{ мм}^2)$, причем при сечении $s > 6 \text{ мм}^2$ появляется дополнительный доход, так как при проектировании линии сечение возможно уменьшить при использовании асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора. Дополнительный доход будет определяться как

$$D_n = (C_{2s} - C_{1s}) \cdot L$$

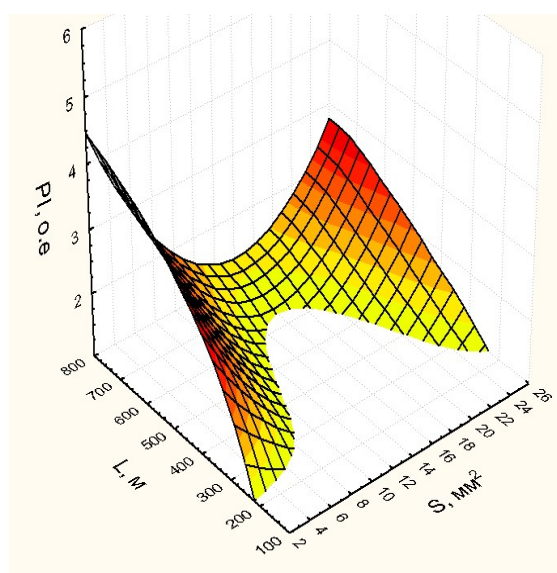
где C_{1s} — стоимость одного метра линии уменьшенного сечения (4x 6; 4x10; 4x16); C_{2s} — стоимость одного метра линии с сечением (4x6; 4x 10; 4x16; 4x25 мм²) в расчетах принято соответственно (290; 418;620; 968 руб/м)

Тогда в случае расчета ЧДД при проектировании линии $s > 6$ мм² формула изменится (Рисунок 4.1)

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^5 \frac{D}{(1+E)^i} - K_0 + D_{\text{л}}$$



а)



б)

Рисунок 4.1 — ЧДД а) и индекс доходности PI б) в зависимости от длины L и сечения питающей линии S

Анализ ЧДД и индекс доходности PI показал, что применение асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора для питания дождевальнх машин целесообразно при проектировании питающей линии с длиной больше 300 м, в случае с сечением близким к 2,5 мм² экономический эффект будет больше проявляться за счет снижения электрических потерь, при сечении близкого к 25 мм² экономический эффект будет больше достигаться за счет проектирования питающей линии меньшего сечения (таблица 4.5).

Таблица 4.5 — Результаты расчета ЧДД и индекс доходности PI в зависимости от длины L и сечения питающей линии S

L, м	S, мм ²	У _{АГ} , руб/год	У _{СГ} , руб/год	Д, руб/год	ЧДД, руб/год	PI, о. е.
6	100	3035	13477	10442	-100996	0,26
6	200	6069	26953	20884	-65993	0,51
6	300	9104	40430	31326	-30989	0,77
6	400	12138	53907	41768	4014	1,03
6	500	15173	67383	52211	39018	1,29
6	600	18904	83955	65051	82062	1,60
6	700	21242	94337	73095	109025	1,80
10	100	1821	8086	6265	-102198	0,25
10	200	3641	16172	12531	-68396	0,50
10	300	5462	24258	18796	-34594	0,75
10	400	7283	32344	25061	1009	0,99
10	500	9104	40430	31326	33011	1,24
10	600	10350	45964	35615	60186	1,44
10	700	12745	56602	43857	100615	1,74
16	100	1138	5054	3916	-102674	0,25
16	200	2276	10107	7832	-69347	0,49
16	300	427	15161	14735	-26008	0,81
16	400	4552	20215	15663	-2695	0,98
16	500	5690	25269	19579	30632	1,23
16	600	5690	25269	19579	50832	1,37
16	700	7966	35376	27411	97284	1,72
25	100	728	3234	2506	-92799	0,32
25	200	1457	6469	5012	-49598	0,64
25	300	2185	9703	7518	-6397	0,95
25	400	2913	12938	10024	36803	1,27
25	500	3641	16172	12531	80004	1,59
25	600	4330	19230	14900	122747	1,90
25	700	5098	22641	17543	166406	2,22

Для расчета срока окупаемости рассматриваются варианты с положительными ЧДД в границах 4 тыс.руб до 166 тыс. руб.. Произведем расчет срока окупаемости (таблица 4.6) для случая с питающей линией $s = 10 \text{ мм}^2$ и $L = 500; 600 \text{ м}$ так как при

прокладке линии необходимо учитывать падение напряжения на электрооборудовании (ЧДД положителен и равен соответственно 33; 66,1 тыс. руб.).

Таблица 4.6 — Техничко-экономические показатели внедрения генерирующей установки дождевальнoй машины с питающей линией 500 м.

№ п.п	Показатели	Варианты		
		СГ (УГД-7500ЕТ)	АГ (Geko 7801)	АГ
1	Электрические потери, кВтч в год	2867	645	645
2	Капиталовложения, тыс. руб.	112,2	339,9	136
3	Номинальная мощность, кВт	7,5	6,4	7,5
4	Экономия средств от прокладки питающей линии меньшего сечения, тыс.руб.	-	-	101
5	Потребляемые дополнительные энергоресурсы: Дизтопливо, тыс. руб/год	26,2	26,2	5,7
6	Годовой доход, тыс. руб.	-	-	31,3
7	Чистый дисконтированный доход, руб.	-	-	207
8	Индекс доходности, отн. ед.	-	-	1,32
9	Срок окупаемости, лет	-	-	3,02

При постоянстве годового дохода динамический срок окупаемости показывает время, за которое инвестор вернет израсходованные средства и получит нормативный доход на уровне принятой ставки. Проект считается целесообразным, если $T_{ок} < T$. Определим срок окупаемости проекта

$$T_{ок} = - \frac{\ln\left(1 - \frac{(K-D_n)}{D} \times E\right)}{\ln(1 + E)}$$

Срок окупаемости для случая с питающей линией $s = 10 \text{ мм}^2$ и $L = 500; 600 \text{ м}$ составит соответственно 3,02 ; 2,05 года. Что также указывает на значительное уменьшение срока окупаемости при увеличении длины питающей линии.

4.2 Выводы по четвертой главе

1. Применение асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора при проектировании дождевальных машин с различным количеством поливальных секций на радиус полива 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 м позволяет получить доход до 166 тыс.руб в год. Причем экономический эффект будет больше проявляться за счет снижения электрических потерь при низких значениях сечения (близких к 4 мм^2) и за счет проектирования питающей линии меньшего сечения при высоких значениях сечения (близких к 25 мм^2).

2. Снижение электрических потерь при применении асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора ведет к уменьшению затрат до 73,09 тыс. руб. за год, что выражается в чисто дисконтированном доходе до 166 тыс. руб. в год.

3. Анализ индекса доходности показал, что не смотря на положительный ЧДД, использование асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора целесообразно на длинах от 400 м при сечении 25 мм^2 , от 500 м при сечении 16 мм^2 , от 400 м при сечении 10 мм^2 и от 500 м при сечении 6 мм^2 до 700 м питающей линии. Использование более низких сечений питающей линии ограничивается потерей напряжения на электрооборудовании и поэтому целесообразно использовать при проектировании дождевальных установок на 200 и 300 м.

4. На примере дождевальной машины на 500 и 600 м был произведен расчет экономической эффективности. Экономия затрат за счет снижения электрических потерь и использование более низкого сечения питающей линии выраженного в ЧДД равного 33 и 66,1 тыс. руб. приведет к окупаемости проекта за 3,02 и 2,05 года соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены математическое описание и математическая модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора на базе дифференциальных уравнений, которые позволяют получить представление о переходных и стационарных процессах, протекающих в электроустановке.

2. Исследование математической модели показало, что использование автотрансформаторного варианта обмотки статора с диаметральным шагом и выполнение частей обмотки разным сечением проводников позволяет снизить электрические потери в генераторе на 5 % по сравнению с серийной электрической машиной.

3. Определены основные параметры асинхронного генератора: количество обмоток статора одной фазы — 2, число витков в обмотках одной фазы $w_1 = 120$, $w_2 = 240$, количество пар полюсов — 2, тип — двухслойная с диаметральным шагом — 9. При пуске емкость конденсаторов должна составлять 130 мкФ, в номинальном режиме — 26 мкФ, на холостом ходу — 18 мкФ.

4. Для оценки электрических потерь в системе электроснабжения дождевальной машины разработана компьютерная модель в программном комплексе SimInTech. Пуск электродвигателя бустерного насоса на пониженном напряжении и при включении компенсирующих конденсаторов приводит к уменьшению электрических потерь энергии в электроустановке: в генераторе в 2,5 раза, в линии в 2,6 раза, в электроприводах в 2,9 раза.

5. Математическое моделирование показало, что использование асинхронного генератора с в качестве источника питания приводит к уменьшению потери энергии до 39 Вт·ч за один цикл перемещения. При работе дождевальной машины с радиусом полива 300 м на площади 36 га, с предлагаемым асинхронным генератором сокращается расход топлива на 12 %.

6. Изготовлен опытный образец на базе асинхронного двигателя 4А100S4 и проведены лабораторные исследования экспериментального образца асинхронного генератора с автотрансформаторной переключаемой обмоткой статора с записью характеристик генератора, осциллограмм токов и напряжений. На основании экспери-

ментально полученных характеристик произведен расчет электрических потерь в переключаемой обмотке статора асинхронного генератора, расхождение с теоретически полученными данными не превышает 5 %. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных по расходу энергии оценивалось по относительной ошибке, которая составила не более 11 %.

7. Техничко-экономическое обоснование эффективности применения асинхронного генератора с переключаемой автотрансформаторной обмоткой статора приведено на примере дождевальной машины радиусом 500 м. Снижение эксплуатационных и материальных затрат привело к получению ЧДД в размере 207 тыс. руб. при сроке окупаемости проекта 3 года.

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. Ахунов, Т.А. Особенности построения новой серии RA асинхронных машин / Т.А. Ахунов, Л.Н. Макаров, В.И. Попов // Электротехника. — 1999. — № 9. — С. 6–10.
3. Бакиров, С. М. Особенности электроснабжения дождевальных машин кругового действия / С. М. Бакиров, Г. С. Котюшко, А. В. Чернов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. — Саратов : ЦеСАин, 2017. — С. 10–11.
4. Бакиров, С. М. Анализ использования самоходной электрифицированной рельсовой тележки / С. М. Бакиров, А. П. Ищенко // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. междунар. науч.-практ. конф. — Саратов : ЦеСАин, 2016. — С. 83–88.
5. Бакиров, С. М. Анализ энергозатрат на дождевальную машину / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. — 2019. — № 10. — С. 95–98.
6. Бакиров, С. М. Особенности электроснабжения дождевальных машин кругового действия / С. М. Бакиров, Г. С. Котюшко, А. В. Чернов // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. — Саратов : ЦеСАин, 2017. — С. 10–11.
7. Бакиров, С. М. Перспективы развития дождевальной техники / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. — 2020. — № 1. — С. 50–55.
8. Бакиров, С. М. Разработка устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, используемых в составе электроприводов секций дождевальной машины / С. М. Бакиров // Вестник аграрной науки Дона. — 2020. — № 3 (51). — С. 77–85.
9. Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В.А. Балагуров. — М.: Высш. школа, 1982. — 272 с.

10. Баракин, Н.С. Параметры обмотки статора и режимы асинхронного генератора, повышающие качество электроэнергии для питания электрооборудования почвенно-экологической лаборатории дис. ... к-та техн. наук : 05.20.02 / Баракин Николай Сергеевич. — Краснодар, 2014. — 191 с.
11. Баракин, Н.С. Синхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой соединенной звездой с улучшенными стабилизирующими свойствами / Баракин Н.С., Кумейко А.А. // Агротехника и энергообеспечение. — 2016. — № 4-2 (13). — С. 31–37.
12. Богатырев, Н.И. Асинхронные генераторы для питания сварочной дуги / Н.И. Богатырев, А.С. Креймер, Н.С. Баракин // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. — Краснодар: КубГАУ, 2011. — №73(09). — Шифр Информрегистра: 0421100012\0360. — Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/52./p28.asp>.
13. Богатырев, Н.И. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Ч. 1. Обоснование параметров асинхронного генератора / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер // Науч. журн. КубГАУ [Электронный ресурс]. — Краснодар: КубГАУ, 2010. — №05(59). — Шифр Информрегистра: 04201000012/0095. — Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/05/26/p26.asp>.
14. Богатырев, Н.И. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Ч. 2. Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета обмоток / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер // Науч. журн. КубГАУ [Электронный ресурс]. — Краснодар: КубГАУ, 2010. — №06(60). — Шифр Информрегистра: 04201000012/0116. — Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/31/p31.asp>.
15. Богатырев, Н.И. Асинхронный генератор в режиме нагрузочного устройства / Н.И. Богатырев, В.Н. Темников, П.П. Екименко и др. // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропитания для АПК. — (Тр. / КубГАУ; Вып. 422(150). — Краснодар, 2005. — С. 81–90).
16. Богатырев, Н.И. Асинхронный генератор как источник питания сварочной дуги / Н.И. Богатырев // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. — 2004. — №11. — С. 33–36.

17. Богатырев, Н.И. Выбор системы автономного электропитания для мобильных электротехнологических установок в растениеводстве. / Н.И. Богатырев, Н.С. Баракин, А.В. Вронский и др. // Технические и технологические системы: Материалы междунар. науч.-техн. конф. — Краснодар, 2009. — С. 140–145.
18. Богатырев, Н.И. Методика исследования асинхронных и синхронных генераторов / Н.И. Богатырев, А.С. Оськина, А.В. Сеницын // Новые технологии в сел. хоз-ве и пищевой пром-сти с использованием электрофизических факторов и озона: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. — Ставрополь, 2006. — С. 113–116.
19. Богатырев, Н.И. Методика определения электромеханических характеристик асинхронного генератора / Н.И. Богатырев, Я.А. Ильченко, Н.С. Баракин и др. // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. — 2008. — №6. — С. 20–21.
20. Богатырев, Н.И. Методика расчета автономного источника на повышенную частоту тока / Н.И. Богатырев, Я.А. Ильченко, Н.С. Баракин и др. — (Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 1(10). — Краснодар, 2008. — С. 209–215).
21. Богатырев, Н.И. Методика расчета и результаты лабораторных испытаний асинхронного генератора с модулированной обмоткой статора / Н.И. Богатырев, О.В. Вронский, Н.С. Баракин и др. — (Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 3(24). — Краснодар, 2010. — С. 164–168).
22. Богатырев, Н.И. Новые схемы генераторов для ветро- и гидроэлектростанций малой мощности / Н.И. Богатырев, Н.С. Баракин, Я.А. Ильченко и др.: материалы Междунар. агропромышл. конгресса. — СПб.: Ленэкспо., 2009. — С. 78.
23. Богатырев, Н.И. Обоснование источников резервного и автономного электропитания 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.
24. Богатырев, Н.И. Обоснование системы автономного электропитания мобильных электротехнологических установок для защиты садов. / Н.И. Богатырев, Н.С. Баракин, П.П. Екименко и др. // Технические и технологические системы: материалы междунар. науч.-техн. конф. — Краснодар, 2009. — С. 145–149.

25. Богатырев, Н.И. Параметры и характеристики электрических машин переменного тока: моногр. / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, П.П. Екименко: — Краснодар, 2011. — 256 с.: ил.
26. Богатырев, Н.И. Работа асинхронного генератора параллельно с сетью / Н.И. Богатырев, Н.С. Баракин, Д.Ю. Семернин // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. — М.: 2012. — С. 162–168.
27. Богатырев, Н.И. Расчет параметров асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой / Н.И. Богатырев, В.М. Семенов, А.И. Сеницын // Наука и технологии: шаг в будущее — 2006: материалы 1-й междунар. науч. — практ. конф. — Белгород: Руснаучкнига, 2006. — С. 66–68.
28. Богатырев, Н.И. Синтез обмоток статора для асинхронных генераторов и двигателей / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, Н.С. Баракин и др. // Науч. журн. КубГАУ [Электронный ресурс]. — Краснодар: КубГАУ, 2011. — №74(10). — Шифр Информрегистра: 04201000012/0116. — Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/74./p26.asp>.
29. Богатырев, Н.И. Статорная многофункциональная обмотка асинхронного генератора: Информ. л. № 25-024-06/ Н.И. Богатырев, Ванурин В.Н. Баракин Н.С. и др. — Краснодар: ЦНТИ, 2006. — 4 с.
30. Богатырев, Н.И. Структурный анализ сельскохозяйственных электротехнологических установок и выбор источников для их автономного электропитания. / Н.И. Богатырев, Н.С. Баракин, А.В. Вронский и др. — (Тр. / Куб. ГАУ; Вып. № 6(21). — Краснодар, 2009. — С. 225–232).
31. Богатырев, Н.И. Схемы статорных обмоток, параметры и характеристики электрических машин переменного тока: моногр. / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, О.В. Вронский; под. ред. В.Н. Ванурина: — Краснодар, 2007. — 301 с.: ил.
32. Богатырев, Н.И. Элементы систем автономного электроснабжения мобильных электротехнологических процессов в АПК / Н.И. Богатырев, П.П. Екименко, Н.С.

Баракин и др. // Новые технологии в сел. хоз-ве и пищевой пром-сти с использованием электрофизических факторов и озона: сб. науч. трудов по материалам Всерос. науч.-практ. конф. — Ставрополь, 2010. — С. 3–10.

33. Богатырев, Н.И. Энергосберегающий источник питания с асинхронными генераторами / Н.И. Богатырев, А.С. Оськина, П.П. Екименко // Промышленная энергетика. — 2006. — № 12. — С. 4–6.

34. Бородин, И. Ф. Практикум по основам автоматики и автоматизации производственных процессов / И. Ф. Бородин, Н. И. Кирилин. — М. : Колос, 1974. — 255 с.

35. Бохян, С.К. Высокоскоростные асинхронные генераторы в автономных специализированных источниках питания / С.К. Бохян, М.Ц. Симонян, В.Ф. Яламов. // Электромеханика. — 1981. — № 2. — С. 20–22.

36. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А Семендяев. — М.: Наука, 1981. — 720 с.

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

38. Ванурин, В.Н. Исследование асинхронного генератора / Ванурин В.Н., Богатырев Н.И., Баракин Н.С. и др. // Техника в сел. хоз-ве. — 2013. — №5 — С. 29–31.

39. Ванурин, В.Н. Многоскоростные асинхронные электродвигатели для привода стационарной техники / В.Н. Ванурин // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. — 2000. — № 5. — С. 19–22.

40. Ванурин, В.Н. Модулирующая обмотка асинхронного генератора автономного источника электроснабжения / В.Н. Ванурин, Н.И. Богатырев, О.В. Вронский // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. — 2004. — №4. — С. 20–21.

41. Ванурин, В.Н. Статорные обмотки асинхронных электродвигателей / В.Н. Ванурин. — зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 2001. — 200 с.

42. Ванурин, В.Н. Электрические машины: учеб. для вузов / В.Н. Ванурин. — М.: Колос, 1995. — 256 с.

43. Варивода, М. С. Электрооборудование мелиоративных насосных установок / М. С. Варивода, Д. А. Михайлов, И. Г. Стрижков // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : матер. IX Всерос. конф. молодых ученых. — Краснодар : КубГАУ им И. Т. Трубилина, 2016. — С. 328–329.
44. Введение в работу с программным обеспечением «Среда динамического моделирования технических систем «SimInTech» / Руководство по работе с библиотекой «ЭЦ-Динамика», ООО «ЗВ Сервис», 2020.
45. Вольдек, А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов по напр. «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика» / А.И. Вольдек, В.В. Попов. — СПб. : Питер, 2008. — 349 с.
46. ГОСТ 17.4.3.01-83 Охрана природы. Общие требования к отбору проб –Введ. 01.07.1984. — М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1983. — 3 с.
47. ГОСТ 17513–72. Электропривод колесных машин тяговый. Термины и определения. — М. : Межгосударственный стандарт, 1972. — 2 с.
48. ГОСТ Р 50369–92. Электроприводы. Термины и определения. — М. : Госстандарт России, 1992. — 13 с.
49. ГОСТ Р 53472-2009. — Введ. 2011-01-01. — М. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний :: Стандартиформ, 2011. — 46 с.
50. ГОСТ Р 54149-2010 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.
51. 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.
52. Джендубаев, А.-З. Р. Математическая модель асинхронного генератора с учетом потерь в стали / А.-З. Р. Джендубаев // Электричество. — 2003. — № 7. — С. 36–45.

53. Джендубаев, З. Р. Схемы замещения асинхронной машины с двумя статорными обмотками / З. Р. Джендубаев, Л.Я. Шапиро // *Электричество*. — 1993. — № 10. — С. 71–74.
54. Дождевальная машина «Кубань» ЭДМФ : инструкция по эксплуатации. — Л., 1981. — 11 с.
55. Дождевальная машина кругового действия. Оросительная техника T-L Irrigation : руководство оператора [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.tlirr.com. — (Дата обращения : 15.06.2019).
56. Ерошенко, Г. П. Снижение мощности электропривода секции дождевальной машины за счет изменения диаметра водораспределительного трубопровода / Г. П. Ерошенко, Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. — 2019. — № 2 (55). — С. 178–184.
57. Есин, А. И. Обоснование применения бустерного насоса с электроприводом крайней секции дождевальной машины / А. И. Есин, Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров // *Аграрный научный журнал*. — 2020. — № 4. — С. 83–87.
58. Жерве, Г.К. Обмотки электрических машин / Г.К. Жерве. — Л., 1989. — 400 с.
59. Журавлева, Л. А. Оптимизация режима работы электрифицированных дождевальных машин кругового действия / Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев, А. Н. Кузнецов // *Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : матер. I Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием*. — Саратов : ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2019. — С. 70–75.
60. Змитрович, В.С. Методика расчета процесса самовозбуждения асинхронного генератора при работе с дроссель — трансформатором / В.С. Змитрович, М.Д. Кимкетов. // *Электрификация с.-х. пр-ва*. — (Тр. / КубСХИ; Вып. 95(123). — Краснодар, 1974. — С. 123–132).
61. 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 сел. хоз-ва*. — (Тр. / Куб. СХИ; Вып. 166 (194). — Краснодар, 1978. — С. 10–15).

62. Зубков, Ю.Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением / Ю.Д. Зубков. — Алма-Ата: Изд-во АН Каз ССР, 1949. — 112 с.
63. Иванникова, Н. Ю. Схемная оптимизация электрической сети по показателю средней продолжительности прекращения передачи электрической энергии / Н. Ю. Иванникова, В. Г. Сазыкин, А. А. Багметов // Промышленная энергетика. — 2019. — № 3. — С. 12–17.
64. Иванов, А.А. Аналитический расчет характеристик асинхронного генератора / А.А. Иванов, В.Б. Пулатов // Электромашиностроение и электрооборудование. Вып. 3. — Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1966. — С. 33–39.
65. Иванов, А.А. Асинхронные генераторы для гидроэлектрических станций небольшой мощности / А.А. Иванов. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 125 с.
66. Иванов, А.А. Электростанции с асинхронным генератором / А.А. Иванов, В.Б. Пулатов, А.А. Тищенко. — Киев: Техника, 1967. — 158 с.
67. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов –Смоленский. — М.: Энергия, 1980. — 928 с.
68. Инструкция по эксплуатации Bauer — Centerstar 9000 133 EL, 168 EL, 168 E, 203 EL, 203 E. — Фойтсберг, 2003. — 103 с.
69. Карпов, В. Н. Повышение энергоэффективности мобильных автономных агрегатов — дождевальных машин фронтального действия : [монография] / В. Н. Карпов, З. Ш. Юлдашев ; Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. — СПб., 2019. — 187 с.
70. Карпов, В. Н. Повышение энергоэффективности мобильных автономных агрегатов — дождевальных машин фронтального действия : [монография] / В. Н. Карпов, З. Ш. Юлдашев ; Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. — СПб., 2019. — 187 с.
71. Каталог. Отличительные особенности ирригационных машин Reinke [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.reinke.com. — (Дата обращения : 08.11.2019).
72. Кешуов, С. А. Режимы работы автономного электропривода мобильных сельскохозяйственных машин / Кешуов С. А. — Алматы : КазгосИНТИ, 1994. — 86 с.

73. Китаев, А.В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А.В. Китаев, И.Н. Орлов // Электричество. — 1978. — №4. — С. 47–51.
74. Кицис, С.И. Аналитическое определение магнитной характеристики асинхронного самовозбуждающегося генератора / С.И. Кицис // Электромеханика: изв. вузов. — 1980. — №6. — С. 597–605.
75. Кицис, С.И. Метод стабилизации выходного напряжения асинхронного самовозбуждающегося генератора / С.И. Кицис, П.Л. Белоусов // Электромеханика: изв. вузов — 1991. — №5. — С. 50–53.
76. Копылов, И.П. Математическое моделирование асинхронных машин : И.П. Копылов, Ф.А. Мамедов, В.Я. Беспалов. — М.: Энергия, 1969. — 95 с.
77. Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справ / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др. — М.: Энергоиздат, 1982. — 504 с.
78. Кумейко, А.А. Автономные источники питания — надежность работы электроустановок / Баракин Н.С., Федак С.Н., Кумейко А.А. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. — 2015. — № 4 (24). — С. 71–76.
79. Кумейко, А.А. Автономные источники электроэнергии как ускоритель процесса внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий выращивания сельскохозяйственных культур // Кумейко А.А. // Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса. Междунар. Научн.-практич. Конф.. Составитель Н.А. Щербакова. — 2019. — С. 551–555.
80. Кумейко, А.А. Анализ и расчет допустимой и безопасной нагрузки асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой / Баракин Н.С., Федак С.Н., Кумейко А.А., Ферейра К. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. — 2017. — № 1 (29). — С. 83–90.
81. Кумейко, А.А. Анализ способов стабилизации напряжения асинхронных генераторов / Баракин Н.С., Кумейко А.А., Ферейра К. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. — 2016. — № 4 (28) — С. 51–56.

82. Кумейко, А.А. Асинхронный генератор — как возможный сегмент фактора улучшения экологической обстановки и снижения пожароопасности в лесах / Кумейко А.А. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Всеросс. (нац.) конф. Ответственный за выпуск А. Г. Кощаев. — 2019. — С. 311–312.
83. Кумейко, А.А. Асинхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой статора / Баракин Н.С., Соболев А.Н., Кумейко А.А. // Сельский механизатор. — 2018. — № 7-8. — С. 48–49.
84. Кумейко, А.А. Асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора / Оськин С.В., Баракин Н.С., Кумейко А.А. // Сельский механизатор. — 2020. — № 12. — С. 28–29.
85. Кумейко, А.А. Исследование асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора / Оськин С.В., Баракин Н.С., Кумейко А.А. // Сельский механизатор. — 2021. — № 2. — С. 28–29.
86. Кумейко, А.А. Исследование асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой статора для питания двигательной нагрузки / Оськин С.В., Баракин Н.С., Кумейко А.А. // Сельский механизатор. — 2018. — № 10. — С. 44–45.
87. Кумейко, А.А. Исследование стабилизации напряжения асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой / Баракин Н.С., Кумейко А.А., Заволока А.А. // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе. Междунар. Научн.-практич. конф. — 2017. — С. 10–13.
88. Кумейко, А.А. О беспилотных летательных аппаратах для исследования воздушных линий электропередач в сельском хозяйстве / Кумейко А.А. // British Journal of Innovation in Science and Technology. — 2018. — Т. 3. № 4. — С. 35–38.
89. Кумейко, А.А. О некоторых аспектах новых рисков и проблем для безаварийной работы воздушных линий электропередач при внедрении в сельском хозяйстве новых технологий с использованием беспилотных летательных аппаратов / Кумейко А.А., Баракин Н.С. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 74-й научн.-практич. Конф. студентов по итогам НИР за 2018 год. — Ответственный за выпуск А.Г. Кощаев. — 2019. — С. 977–980.

90. Кумейко, А.А. О некоторых аспектах обеспечения безопасности жизнедеятельности человека в современных условиях / Баракин Н.С., Кумейко А.А., Ферейра К. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. — 2017. — № 4 (32). — С. 143–148.
91. Кумейко, А.А. Особенности расчета электропривода пробоотборника почвы / Баракин Н.С., Кумейко А.А. // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона. XII Международный. Научн.-практич. Конф. — 2018. — С. 13–18.
92. Кумейко, А.А. Перспективы использование автотрансформаторных обмоток в автономных источниках АПК / Кумейко А.А., Баракин Н.С. // В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 75-й научн.-практич. Конф. студентов по итогам НИР за 2019 год. — Отв. За выпуск А.Г. Кощев. — 2020. — С. 950-951.
93. Кумейко, А.А. Применение автономного асинхронного генератора в составе газогенератора / Кумейко А.А., Баракин Н.С. // В книге: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Всеросс. (национ.) конф. Ответственный за выпуск А. Г. Кощев. — 2019. — С. 647–648.
94. Кумейко, А.А. Применение статорной обмотки асинхронного генератора с четным количеством фазных зон в резервных автономных источниках питания / Кумейко А.А., Кваша И.К. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. XI Всеросс. Конф. молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. Ответственный за выпуск А. Г. Кощев. — 2017. — С. 388–389.
95. Кумейко, А.А. Факторы улучшения электроснабжения потребителей краснодарского края в современных условиях / Кумейко А.А. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 72-й научн.-практич. Конф. студентов по итогам НИР за 2016 год. — 2017. — С. 629–631.
96. Кумейко, А.А. Электробезопасность жителей многоквартирных домов вторичного фонда жилья / Кумейко А.А., Баракин Н.С. // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. — 2018. — № 3 (35). — С. 104–106.

97. 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.
98. 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.
99. Лищенко, А.И. Исследование рабочих характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением / А.И. Лищенко, В.А. Лесник, А.П. Фаренюк // Техн. электродинамика. — 1983. — № 3. — С. 24–25.
100. Мажугин, Е. И. Машины для эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов : учебное пособие / Е. И. Мажугин. — Горки : БГСХА, 2010. — 335 с.
101. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение : справочник / под ред. Б. Б. Шумакова. — М. : Колос, 1999. — 432 с.
102. Оськин, С. В. Электротехнологические установки : учебник / С. В. Оськин. — Краснодар : КРОН, 2016. — 339 с.
103. Оськина, А.С. Параметры и режимы асинхронных генераторов для питания электрифицированных инструментов и электротехнологических установок в садах и виноградниках : автореф. дис. канд. техн. наук. / А.С. Оськина — Краснодар, 2007. — 24 с.
104. Пат. 180746 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/09, СПК А 01 G 25/09. Многоопорная дождевальная машина кругового действия с гидроприводом / Рязанцев А. И., Антипов А. О., Рембалович Г. К., Ахтямов А. А., Евсеев Е. Ю. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». — № 2018107819 ; заявл. 02.03.2018 ; опубл. 22.06.2018, Бюл. № 18. — 5 с.
105. Пат. 2522526 С 1 Российская Федерация, МПК А 01G 25/16, А 01G 25/09, G 01 N 25/56, G 01 S 19/05. Устройство автоматизированного управления многоопорной дождевальной машиной фронтального действия для точного полива / Карпов В.Н., Смелик В.А., Юлдашев З.Ш., Юлдашев Р.З. ; заявители и патентообладатели

ФГБОУ ВПО «СПбГАУ», Карпов Валерий Николаевич. — № 2012153613/13 ; заявл. 11.12.2012 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. — 20 с.

106. Пат. RU2640403 С1 Автономный асинхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой статора [Текст] / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, Н.С. Баракин, А.Ю. Попов, Ю.В. Потапенко, А.А. Кумейко. (РФ) заявитель и патентообладатель Куб. гос. аграр. ун-т. // Заявл. № 2017107993 от 10.03.2017. Опубл. 09.01.2018.

107. Приказ Минсельхоза РФ от 28 сентября 2018 г. № 443 «О реализации мероприятий направления (подпрограммы) «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России» Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы» [Электронный ресурс] : Документы Министерства 366 сельского хозяйства РФ. — Режим доступа : <http://agroportal2.garant.ru:81/SESSION/PILOT/main.htm> (дата обращения 10.08.2019).

108. 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.

109. Сайт — <https://specagro.ru/news/202002/polozhenie-del-v-apk-krasnodarskogo-kraja-za-2019-god-po-napravleniyu-rastenievodstvo> / (дата обращения 26.11.20) — Текст: электронный.

110. Сайт. — URL: <https://kubnews.ru/selskoe-khozyaystvo/2020/08/10/kak-v-krasnodarskom-krae-vypolnyaetsya-programma-melioratsii-zemel/> (lfnf j,hfotybz 25.11.2021) — Текст: электронный.

111. Сайт. — URL: <https://dizelnye-generatory.com/dizelnye-generatory/filter/vendor-is-serii-ad/> (дата обращения 26.11.21). — Текст: электронный.

112. Сеницын, А.В. Асинхронный генератор на две частоты тока для мобильных установок сельскохозяйственного производства: автореф. дис. канд. техн. наук. / А.В. Сеницын — Краснодар, 2008. — 24 с.

113. Соловьев, Д.А. Моделирование нейрорегуляции скоростью дождевальных машин / Д. А. Соловьев [и др.] // Аграрный научный журнал. — 2020. — № 7. — С. 81–84.

114. Стрижков, И.Г. Лабораторный практикум по электрическим машинам: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений по специальности «Электрификация и автоматизация с.х.» / И.Г. Стрижков, Е.Н. Чеснюк. — Краснодар: КубГАУ, 2006. — 296 с.
115. Стрижков, И.Г. Электрооборудование технологических комплексов орошаемого земледелия: дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Стрижков Игорь Григорьевич. — Краснодар, 2001. — 318 с.
116. Темников, В.Н. Универсальный автономный источник для питания средств электромеханизации АПК и сварочной дуги: автореф. дис. канд. техн. наук. / В.Н. Темников — Краснодар, 1997. — 25 с.
117. Торопцев, Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения / Н.Д. Торопцев. — М.: Энергоатомиздат, 2005. — 215 с.
118. Учебная версия программы SimInTech. Открытый доступ: <https://www.https://simintech.ru/>
119. 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.
120. 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.
121. Фришман, В.С. Проектирование автономных асинхронных генераторов / В.С. Фришман, Г.А. Прохорова, С.З. Эвентов // Электротехника. — 1986. — № 4. — С. 26–28.
122. Bogdan, A.V. “A mathematical model of autonomous self-excitation asynchronous generator” / Sobol A. N. // Proc. of the higher educational institutions. Electro mechanics, vol. 2, pp. 47–50, 2012.
123. Canale, M. A revolution in wind energy generation / Fagiano, L., Milanese, M. // Int. J. Energy, Vol. 34, pp. 355–361.

124. Chan, T.F. A novel excitation scheme for a stand-alone three-phase induction generator supplying single phase loads / Lai, L.L. // *IEEE Trans. on Energy Convers.*, Vol. 19, pp. 136–142.
125. Kumeyko, A.A. Asynchronous Generator Automated Control System for Supplying Electricity to Sprinkling Machine / Oskin, S.V., Barakin, N.S., Kumeyko, A.A. // *2021 Proceedings — 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021*, pp. 892–896.
126. Kumeyko, A.A. Asynchronous generator mathematical model for of asymmetrical modes calculation Barakin, N.S. // *2017 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 — Proc. electronic edition*, 8076299, 2017.
127. Kumeyko, A.A. Asynchronous generator with a switchable stator winding for powering the electrical equipment of sprinkling machines: Research results / Oskin, S.V., Barakin, N.S., Kumeyko, A.A. // *2021 Proceedings — 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*, pp. 90–95.
128. Kumeyko, A.A. Asynchronous generator with winding capable of switching between double star and star-triangle forms / Barakin N.S., Bogatyrev N.I., Kumeyko A.A. // *Всборнике: Proceedings — 2019 International Russian Automation Conference, rusautocon 2019. — 2019. — С. 8867693.*
129. Kumeyko, A.A. Calculation of parameters asynchronous generator with stator winding connected in the star-delta / Barakin N.S., Kumeyko A.A., Garkavyi K.A. // *Всборнике: 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, fareastcon 2019. 2019. С. 8933984.*
130. Levi, E. Multiphase induction motor drives — A technology status review / Bojoi, R., Profumo, F., Toliyat, H.A., Williamson, S. / *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 1, pp. 489–516.
131. Lipo, T.A. A d-q model for six phase induction machines *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM), Athens Greece*, pp. 860–867.
132. Ojo, O. PWM-VSI inverter assisted stand-alone dual stator winding induction generator / Davidson, I.E. // *IEEE Trans. on Energy Convers.*, Vol. 36, pp. 1604–1611.

133. Rcsende, J. T. Control of the generated voltage by a three-phase induction generator self-excited by capacitors using control techniques / Schclb A. J. II. C., R. Ferreira, E. P. Manasscs // IEEE CNF vol. 1, pp. 530 — 535, Dec. 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 — Опытные данные экспериментов

опыт 1														
№	С	Ин	Un	n	Ik	Uк	П	I2	Уя	Ия	f		Рэл	Рмех
1	32	0	142	1514	6,3	388	4,4	4,2	29	5	50		0	145
2	32	4	135	1516	6	329	5	2,5	29	9	50		935,3074	261
3	32	8	125	1509	5,4	326	5,9	3,3	29	17	49,5		1732,051	493
4	32	12	106,2	1507	5,1	312	7,6	5,7	29	26	48,8		2207,326	754
5	32	0	148	1560	6,8	398	4,8	4,8	29	5	52		0	145
6	32	4	142	1560	6,5	384	5,5	3	28	14	54		983,8049	392
7	32	8	130	1555	5,9	361	6,3	3,4	27	20	50		1801,333	540
8	32	12	12,3	1560	5,5	345	7,7	5,7	27	26	49,6		255,6507	702
9	32	0	131	1460	5,6	352	3,9	3,9	27	6	48		0	162
10	32	4	125	1459	5,3	340	4,7	2,2	27	13	48		866,0254	351
11	32	8	114	1456	4,9	317	5,8	3,6	26	19	47,3		1579,63	494
12	32	12	102	1456	4,2	283	6,9	5,7	26	20,5	47		2120,03	533
13	32	0	121	1390	4,9	320	3,3	3,3	26	5,5	46,5		0	143
14	32	4	114	1396	4,6	304	4,2	1,9	26	13	46		789,8152	338
15	32	8	102	1406	4,5	286	5,4	3,6	26	17	45,2		1413,353	442
16	32	10	89	1402	3,7	237	6,1	5,2	26	18	46		1541,525	468
опыт 2														
№	С	Ин	Un	n	Ik	Uк	П	I2	Уя	Ия	f		Рэл	Рмех
1	26	0	152	1504	4,6	349	3,1	3,1	28	5	50		0	140
2	26	4	121	1503	4,2	323	2,8	5,6	28	12	49,7		838,3126	336
3	26	8	104	1505	3,6	282,8	4	7,5	29	15	51,5		1441,066	435
4	26	0	138,2	1552	5	370,2	3,4	3,4	29	5,5	50,8		0	159,5
5	26	4	127,1	1550	4,6	347,7	3	6,3	29	15	50,4		880,5746	435
6	26	8	116,2	1550	4,2	319	4,1	8	29	17,5	50,8		1610,114	507,5
7	26	9	92,7	1555	3,4	264,8	4,7	8,4	29	15,5	50,8		1445,05	449,5
8	26	0	112	1397	3,6	292	2,2	2,2	26	4,5	46		0	117
9	26	4	97,7	1397	3,1	266,8	2,1	4,9	26	10	45,7		676,8855	260
10	26	5,1	88,5	1348	2,8	241	2,6	5,2	26	11	45,5		781,7611	286
11	26	0	122,6	1455	4,2	323	2,8	2,8	27	5	48,6		0	135
12	26	4	108,5	1444	3,6	296,5	2,4	5,5	27	11	47,9		751,7101	297
13	26	6,7	88,4	1450	2,9	231,1	3,1	6,1	27	11	47,5		1025,859	297
опыт 3														
№	С	Ин	Un	n	Ik	Uк	П	I2	Уя	Ия	f		Рэл	Рмех
1	38	0	160	1543	8,5	421	6,2		30	18	51,6		0	540
2	38	2	161	1546	8,6	427	5,9		30	15	51,7		557,7204	450
3	38	4	155	1556	8,3	412,5	5,6		30	16	51,3		1073,872	480
4	38	6,5	147	1550	7,8	397	5,7		30	20	50,8		1654,975	600
5	38	8	144	1550	7,7	391,5	5,8		20	21	50,3		1995,323	420
6	38	10	139	1550	7,3	375	6,2		20	27	50		2407,551	540
7	38	0	152	1500	7,7	399	5,7		28	6	50		0	168
8	38	2	150	1504	7,6	398	4,9		28	13	49,3		519,6152	364
9	38	4	144	1495	7,3	387	4,6		28	16	49,1		997,6613	448
10	38	6,5	140	1492	7,1	377	5		28	19	49		1576,166	532
11	38	8	13	1500	6,9	363	5,2		28	20	48,8		180,1333	560
12	38	10	130	1500	6,8	358	5,8		28	24	48,7		2251,666	672

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

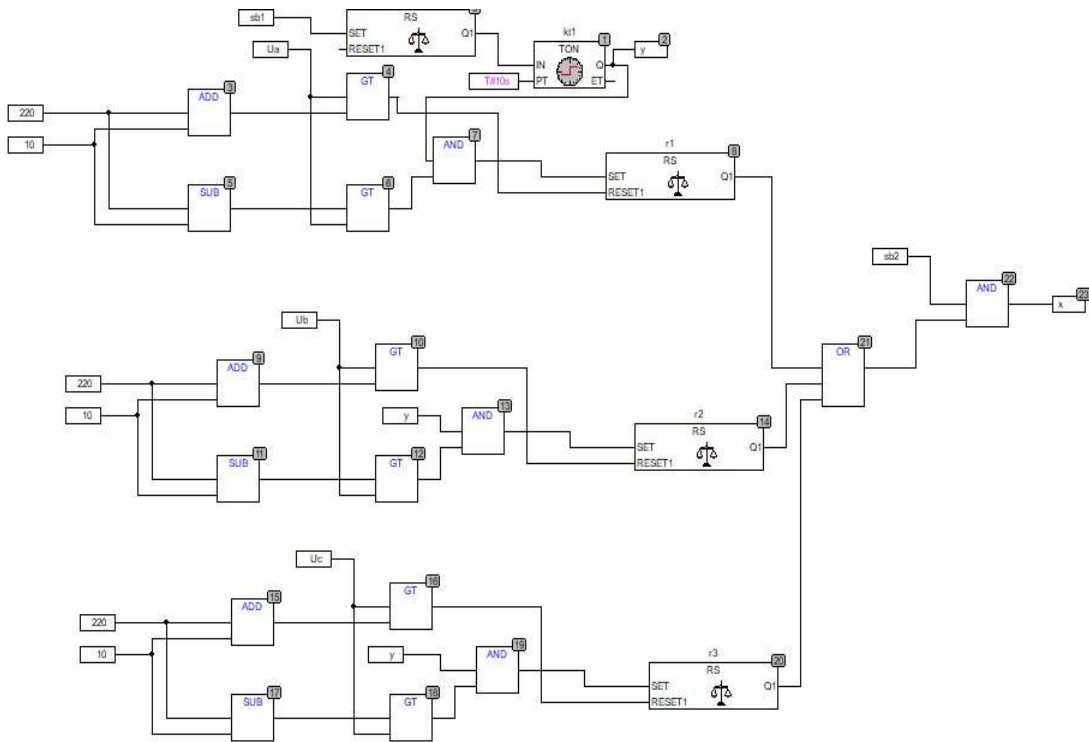


Рисунок Б.1 — Принципиальная схема системы автоматизации



Рисунок Б.2 — Изображение лабораторного стенда

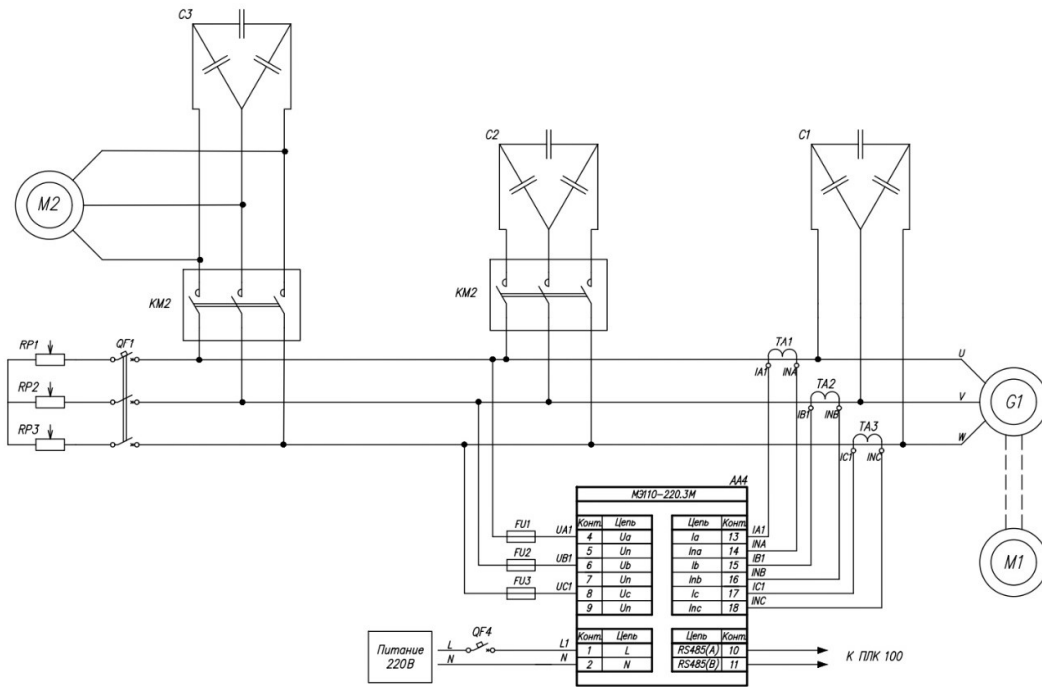


Рисунок Б.3 — Схема подключения анализатор параметров сети МЭ110-220.3Б

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 -Техническое задание для приобретения КДМ

Наименование параметра	Описание
Длина машины	310м
Количество ДМ	1
Тип машины	Колесная, многоопорная, электрифицированная, кругового перемещения, используется на одной позиции
Производительность системы с концевым распылителем R55 и концевым водометом SR100	154м ³ /ч
Общая площадь покрытия с концевым водометом	36,3Га
Давление на входе в центральную опору	2,5бар
Давление в конце системы	1,5бар
Поливная норма за 24 ч	9мм
Расстояние от поверхности земли до нижнего пояса металлоконструкции (на ровном участке поля между тележками)	3±0,2 м
Тип распылителей	Nelson R3000
Тип набора распылителей	15 psi
Гибкие поливные шланги	PVC, армированные, UV стойкие
Крепление поливного шланга	хомут проволоочный из нержавеющей стали
Прокладки трубопровода	Должны обеспечивать герметичность системы на весь срок службы, UV стойкие
Допустимый геодезический перепад поверхности земли по длине машины	±1,5м
Расстояние между распылителями	Поставщик предоставляет обоснованный расчет
Диаметр охвата распылителей	17,7м
Мощность бустерного насоса для концевого водомета	5,5кВт
Напор бустерного насоса для концевого водомета	37м
Подача бустерного насоса для концевого водомета	29м ³ /ч
Тип концевого водомета	Nelson SR100
Охват концевого водомета	30м
Общий угол, орошаемый водометом	360град., с устройством ограничения хода
Тип концевого распылителя	Nelson R55
Бумбек одиночный, по 2шт на пролетах после 400м от центра	Нет
Спаренные дождеватели, разводка по шпренгелям на пролетах после 400м от центра	Нет
Источник питания	380В/50Гц
Сечение кабеля	10 жил (3*10+1*4+6*1,5)
Способ полива	В движении машины по кругу по направлению и против направления движения часовой стрелки
Вид орошаемых культур	Кормовые, зерновые, овощные, технические культуры, включая кукурузу
Температура окружающего воздуха	от -35 до +45°С
Привод передвижения машины	Электромеханический, реверсивный, индивидуальный для каждой тележки

Колеса опорных тележек	Колеса для ирригационных машин типоразмера 14.9*24, два колеса на каждой тележке, гальванизированные диски
Глубина протектора колеса опорных тележек	30мм
Тип привода опорных тележек	Электромеханический
Режим работы машины	В движении с поливом;
	В движении без полива (перегон)
Режимы движения машины (соответствуют режиму работы электродвигателя мотор-редуктора крайней опорной тележки)	Непрерывный, старт-стопный
Тип водопроводящего трубопровода	Секционный, ферменной конструкции
Тип антикоррозионного покрытия	Горячее цинкование согласно стандарта GB/T 13912-2002
Сливной кран в конце системы	Да
Манометр на входе в систему	Да
Освещение центральной башни и последней тележки	Да
Светодиодный проблесковый маяк в конце системы	Да
Лестница для обслуживания на центральной башне	Да
Манометр в конце системы	Да
Выключение концевого водомета и остановка в определенном месте	Да
Аварийная защита от недопустимых выбегов соседних опорных тележек	Да
Аварийная защита от коротких замыканий в электрических цепях	Да
Аварийная защита при остановке технологического устройства во время работы машины	Да
Расположение органов оперативного управления	На центральной башне
Возможность подключения дистанционного управления	Да
Возможность подключения датчика давления	Да
Система альтернативного выравнивания	Да
Место размещения заземляющего устройства	На центральной башне
Степень защиты коммуникационных блоков и центрального распределителя не ниже	Блок управления тележкой: IP33
	Кольцевой токосъемник: IP65
Функции панели управления	Вкл/Выкл питания
	Управление питанием
	Выключатель воды
	Переключатель контроля направления
	Индикатор % (регулировка скорости)
	Автоматический реверс
Надписи, органы управления	Корпус выполнен из листовой стали с классом защиты не ниже IP 65
	Язык надписей — русский, интуитивно-понятные изображения

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 — Технические характеристики широкозахватной дождевальной машины «Valley» кругового действия

Тип дождевальной машины	Многоопорная кругового действия, с дождеванием в движении и питанием от закрытой оросительной сети									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Типоразмер дождевальной машины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина дождевальной машины, м	250	265	300	350	375	400	450	470	500	510
Привод движения (перемещения)	Электромеханический с помощью мотор-редукторов опорных тележек									
Источник энергии	Дизель-генератор									
Максимальная амплитуда отметок поверхности земли*	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0
Расход воды, л/с	26,23	29,29	37,1	49,86	56,94	64,5	81,01	69,36	107,7	91,47
Длина поля, м	500	530	600	700	750	800	900	940	1000	1020
Ширина поля, м	500	530	600	700	750	800	900	940	1000	1020
Площадь поля, га:	25,0	28,09	36,0	49,0	56,25	64,0	81,0	88,36	100,0	104,04
	общая	21,86	24,41	30,92	41,55	47,45	53,75	67,51	69,36	82,85
поливная										
Охват поливного участка, %	87,44	86,90	85,89	84,80	84,36	83,98	83,35	78,50	82,85	78,50
Охват конечного водомета, м	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Давление на входе, МПа	0,174	0,177	0,188	0,213	0,231	0,256	0,240	0,235	0,288	0,264
Скорость движения машины, м/ч	135,6	135,6	135,6	135,6	135,6	135,6	135,6	124,45	135,6	135,6
Минимальное время прохода, ч/проход	11,40	11,67	12,73	15,95	16,49	18,23	20,53	23,08	22,92	23,19

Минимальная поливная норма за проход машины, мм	4,93	5,04	5,50	6,89	7,12	7,88	8,87	8,31	10,73	9,35
-------------------------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------

Таблица Г. 2 — Технические характеристики дождевальной установки Valley Rainger

Характеристики	Подача из канала	Подача по шлангу
Источник воды	Земляной или бетонный канал	Напорный трубопровод
Источник питания	Встроенный двигатель тележки	Встроенный двигатель тележки или шнур питания
Наведение	GPS, надили подземный кабель, борозда	Надили подземный кабель, борозда
Площадь поля, га	130-607	9-47
Максимальная ширина полосы полива, м	973	400
Расход воды, л/с	32-285	12-88

Таблица Г.3 - Техничко-технологические показатели дождевальных машин Monostar BMS-100 и двухконсольного дождевального агрегата ДДА-100Т

Показатели дождевальных машин	Значения показателей по дождевальным машинам	
	BMS-100	ДДА-100Т
Тип машины	Электрическая, двухопорная, самопередвигающаяся, фронтального перемещения, с дождеванием в движении и забором воды из открытых оросителей	Двухконсольный дождевальный агрегат с поливом в движении, при фронтальном перемещении и с забором воды из открытых оросителей
Привод движения	Электромеханический от мотор-редукторов	Трактор Т-150-05
Источник энергии	Дизель-генератор	Трактор Т-150-05
Генератор	Marelli MSB-4B	—
Мощность кВА (кВт)	30 (24)	—
Расход воды, л/с	34	120

Ширина захвата, м	102	120
Давление в насосе, МПа	0,27	0,30
Рабочая скорость движения, м/мин	0,3-3,9	12,0-17,2 (вперед) 16,8 (назад)
Средний слой дождя за один проход, мм	5,0-60,0	3,3-4,2
Коэффициент распределения слоя дождя по ширине захвата: <ul style="list-style-type: none"> • эффективного полива • недостаточного полива • избыточного полива 	0,69	0,61
	0,21	0,18
	0,10	0,21
Средний диаметр каплеь, мм	0,9	1,1
Расход топлива, кг/ч	4,59	16,90
Потребляемая мощность от энергетического средства, кВт	18,1	73,6
Удельный расход горючего при норме полива (200-600) м3/га, кг/га	7,52-22,6	7,82-23,5

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 640 403** (13) **С1**(51) МПК
H02K 17/42 (2006.01)
H02K 17/12 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H02K 17/42 (2017.08); H02K 17/12 (2017.08)

(21)(22) Заявка: 2017107993, 10.03.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.03.2017Дата регистрации:
09.01.2018Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.03.2017

(45) Опубликовано: 09.01.2018 Бюл. № 1

Адрес для переписки:
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13,
Кубанский ГАУ, отдел организации и
мониторинга научной деятельности

(72) Автор(ы):

Богатырев Николай Иванович (RU),
Ванурин Владимир Николаевич (RU),
Баракин Николай Сергеевич (RU),
Попов Андрей Юрьевич (RU),
Потапенко Юлия Владимировна (RU),
Кумейко Андрей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т.
Трубилина" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2479097 С2, 10.04.2013. RU
2252474 С1, 20.05.2005. UA 89884 С2,
10.03.2010. MD 2089 С2, 30.09.2003. WO
1999029028 А1, 10.06.1999. WO 2002060034
А2, 01.08.2002.

(54) Автономный асинхронный генератор с автотрансформаторной обмоткой статора

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике и может быть использовано в асинхронных генераторах для автономных источников электроэнергии. Технический результат - снижение электрических потерь. Автономный асинхронный генератор содержит автотрансформаторную обмотку статора, состоящую из двенадцати катушечных групп с выводами. Первые три вывода соединены между собой и взяты от концов третьей, пятой и седьмой катушечных групп. Вторые три вывода взяты из объединенных начал девятой и конца восьмой катушечных групп, из объединенных начала одиннадцатой и конца десятой катушечных групп,

из объединенных начала первой и конца двенадцатой катушечных групп соответственно. Три третьих вывода взяты от начал второй, четвертой и шестой катушечных групп. Конец второй катушечной группы соединен с началом восьмой катушечной группы, конец девятой с началом третьей, конец четвертой с началом десятой, конец одиннадцатой с началом пятой, конец шестой с началом двенадцатой, конец первой катушечной группы соединен с началом седьмой катушечной группы. Конденсаторы возбуждения подключены к третьим выводам генератора, а нагрузка - ко вторым трехфазным выводам. 2 ил.

RU 2 640 403 С1

RU 2 640 403 С1

ПРИЛОЖЕНИЕ Е



УТВЕРЖДАЮ

первый проректор ФГОУ ВО
«Кубанский ГАУ», профессор
С.М. Резниченко

А К Т

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
аспиранта Кумейко Андрея Анатольевича в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет»
на факультете энергетики

Комиссия в составе:

председателя – декана факультета энергетики и электрификации
к.т.н., доцента Шевченко А.А.;

членов комиссии: заведующего кафедрой «Электрические машины и
электропривод», д.т.н., профессора Оськина С. В.; профессора кафедры
«Электрические машины и электропривод», д.т.н., профессора Стрижкова
И.Г. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной ра-
боты «Параметры и режимы асинхронного генератора с переключаемой
статорной обмоткой дождевальнoй машины кругового действия», пред-
ставленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, ис-
пользованы в учебном процессе на факультете энергетики.

Комиссия установила, что материалы диссертационной работы аспи-
ранта Кумейко А.А. использованы при изучении дисциплин «Электриче-
ские машины», «Электропривод», «Электротехнологии и электрооборудо-
вание в сельском хозяйстве» на кафедре электрических машин и электро-
привода.

Комиссия считает, что материалы диссертации, включенные в рас-
сматриваемые дисциплины повышают степень освоения профессиональ-
ных компетенций обучающимися по направлениям подготовки 35.03.04 и
35.06.04.

Председатель комиссии:  А.А. Шевченко

Члены комиссии:  С.В. Оськин

 И. Г. Стрижков

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Руководитель предприятия

А.Г. Асеев/



АКТ

внедрения результатов научного проекта

Комиссия в составе: председатель комиссии - д.т.н., профессора Оськина С.В., члены комиссии - доцента Баракина Н.С., аспиранта Кумейко А.А., составили акт на предмет передачи предприятию макетного образца и научного отчета по проектированию и изготовлению асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора. В отчете представлена схема переключаемой обмотки статора асинхронного генератора, приведены результаты испытания и даны конкретные параметры для проектируемых асинхронных генераторов.

Асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора мощностью 3 кВт был изготовлен (пат. РФ на изобретение RU 2640403 C1, опубликовано 09.01.2018, бюл. № 1) и при испытаниях показал полную работоспособность, хорошие технико-экономические и эксплуатационные показатели. Использование асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора является комплексным решением снижения электрических потерь, так как позволяет запускать электродвигатели на пониженном напряжении для уменьшения пускового тока, а конденсаторные установки возбуждения используются для компенсации реактивной мощности с целью уменьшения электрических потерь в линии.

Председатель комиссии:
заведующий кафедрой ЭМ и ЭП
д.т.н., профессор

 Оськин С.В.

Члены комиссии:

 Н. С. Баракин

 А. А. Кумейко