

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

| | |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель | Оськин Сергей Владимирович доктор технических наук, профессор |
| Официальные оппоненты: | Хорольский Владимир Яковлевич доктор технических наук, профессор, Ставропольский государственный аграрный университет, кафедра «Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования» (г. Ставрополь); Юндин Михаил Анатольевич кандидат технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, кафедра «Электроэнергетика и электротехника» (г. Зерноград) |
| Ведущая организация: | ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар) |

Защита состоится «28» февраля 2022 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета механизации, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор
Фролов Владимир Юрьевич



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Восстановление и развитие мелиоративного фонда является приоритетной задачей в Краснодарском крае согласно долгосрочной краевой целевой программе «Развитие мелиорации сельскохозяйственных земель в Краснодарском крае», что подразумевает внедрения новых и модернизацию существующих систем полива. Дождевание широко применяется для полива, потому что оно создаёт необходимый водный режим почвы без нарушения её структуры. Для достижения лучшего экономического эффекта при дождевом орошении производители современных многоопорных широкозахватных дождевальных машин выпускают их в модификации машины кругового перемещения. Энергетика таких машин включается в себя дизель-генераторную установку, электроприводы передвижных тележек и бустерного насоса. В качестве генератора в большинстве случаев используются синхронные машины.

При известных преимуществах, таких как повышенная надежность, меньшие массогабаритные показатели, высокое качество электроэнергии, применение асинхронных генераторов сдерживается. Причинами ограниченного применения асинхронных генераторов являются недостаточная степень стабилизации напряжения и частоты тока, что приводит к необходимости использования дополнительных схем управления или применения инверторного преобразователя частоты.

Создание надежного автономного источника электрической энергии с асинхронным генератором, позволяет осуществлять пуск двигательной нагрузки с одновременным снижением реактивной составляющей пускового тока в питающей линии, что приводит к снижению материальных и эксплуатационных затрат.

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

Степень разработанности темы. В начале XXI века возрос интерес к автономным асинхронным генераторам для систем автономного электроснабжения. Научные проблемы использования автономных источников с асинхронными генераторами широко исследу-

довались многими учеными: 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. В работах В. Н. Ванурина детально описаны принципы проектирования асинхронных машин при помощи матричного способа формирования обмоток. Под руководством Богатырева Н.И. в КубГАУ, создана научная школа по исследованию и разработке статорных обмоток асинхронных генераторов, куда входят Баракин Н.С., Екименко П.П., Ильченко Я. А., Оськина А. С., Синицин А. С. Результатом совместной работы авторов является создание более 40 новых схем статорных обмоток. В этих работах исследования направлены на увеличение многофункциональности асинхронных генераторов, генерирующие разный уровень напряжения, частоту тока или увеличение степени стабилизации напряжения генератора, но не рассматривается применение асинхронного генератора как комплексное решение для снижения энергетических потерь в оборудовании.

Исследованием режимов и проблем экономии энергетических ресурсов дождевальных машин занимались С. М. Бакиров, А. И. Есин, Л. А. Журавлева, Карпов З. Ш., В. Г. Юлдашев, И. Г. Стрижков, Д. А. Соловьев. Смежными вопросами энергосбережения занимались в Кубанском государственном технологическом университете Кашин Я.М., Автайкин И.Н., Квон А.Н., Копелевич Л.Е., Попов С.А., Ладенко Н.В. Несмотря на глубину разработки тем, задача повышения энергоэффективности дождевальных машин кругового действия остается актуальной. Длина линии электроснабжения электроприводов дождевальной машины может достигать 1000 м, что приводит к необходимости завышать сечение проводников и использовании дополнительных способов снижения электрических потерь. В результате потребитель несет значительные расходы при эксплуатации системы энергоснабжения дождевальной машины.

Рабочая гипотеза – используя график электрической нагрузки и учитывая требования к качеству электроэнергии, можно разработать рациональный асинхронный генератор автономного источника с особой конструкцией переключаемой обмоткой 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, позволяющие 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.

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 и SimInTech. Экспериментальные исследования асинхронных генераторов выполнены в Кубанском ГАУ на кафедре электрических машин и электропривода.

Объект исследования – электрооборудование дождевальных машин, графики электрических нагрузок, асинхронный генератор с автотрансформаторной переключаемой обмоткой статора, схемы ре-

гулирования 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 характеристики асинхронных генераторов.

Научная новизна работы.

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

2. Компьютерная модель системы электроснабжения дождевальной 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:

- 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 электроснабжения удаленных электроприемников;

- в разработке 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 дождевальной машины;

- в экспериментально полученных внешних и регулировочных характеристиках 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 C1) 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 (Краснодар, 2017–2020 гг.); на Международной научно-практической конференции «Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса» (Благовещенск, 2019), на Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе» (Ставрополь, 2017), на Международной научно-практической конференции «International Russian Automation Conference, 2019» (Сочи, 2019). Материалы исследований отмечены дипломом за 3 место краевого конкурса «IQ года».

На защиту выносятся:

- математическая модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора;
- компьютерная модель системы электроснабжения дождевальной 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.

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

Объём и структура работы. Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы, приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность исследований, приведены цель работы, научная новизна, практическая значимость, и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ режима работы на основе графиков нагрузки и способов электроснабжения дождевальной машины кругового действия. Наличие частых пусков электродвигателей приводных тележек и бустерного насоса приводят к завышениям сечений питающих проводников и расходу топлива.

Расчет электромеханической характеристики показал, что при пуске электродвигателя реактивная составляющая потребляемого тока существенно больше чем активная. Снижение реактивной составляющей тока ведет к существенному снижению электрических потерь в дождевальных машинах, так как их питание осуществляется по сетям электроснабжения низкого напряжения большой протяженностью.

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, а основной блок конденсаторов возле асинхронного генератора. Получена научная 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.

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.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования и математическое моделирование асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора.

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 (Рис. 1). Генератор с такой схемой статорной обмотки возможно соединить как в автотрансформаторную звезду (при этом формируется напряжение 380 В на выводах Н1-Н3), так и по схеме звезда-треугольник (напряжение на выводах Н1-Н3 составит 220 В).

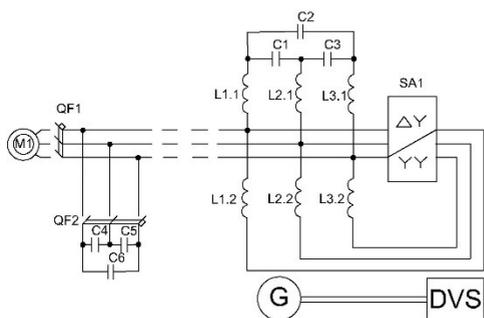


Рисунок 1 -Схема переключаемой обмотки статора асинхронного генератора с включением конденсаторов треугольником для питания двигательной нагрузки

Математическая модель асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора выполнена в трехфазной системе координат. Токи обмоток асинхронного генератора находятся в результате решения системы алгебраических уравнений методом обратной матрицы.

Для математического описания асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора сделано допущение, что при пуске

электродвигателя компенсируется вся реактивная составляющая тока. Тогда можно представить нагрузку генератора как активную, которая меняется в зависимости от скольжения. Сопротивление нагрузки является функцией скольжения электродвигателя $r_n(s)$ и рассчитывается на основании расчетов его электромеханической характеристики. На рисунке 2 представлена схема соединения звезда – треугольник автотрансформаторной обмотки статора асинхронного генератора с включением конденсаторов треугольником для 3-фазной нагрузки.

При моделировании использовались общепризнанные при проектировании электрических машин обозначения: C_A, C_B, C_C - емкости возбуждения; $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6$ - потокоцепления 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; i_{nA}, i_{nB}, i_{nC} - токи нагрузки; $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ - активные сопротивления частей обмотки статора; r_{nA}, r_{nB}, r_{nC} - сопротивления нагрузки; L_{s1}, L_{s2}, L_{s2} – индуктивности рассеяния обмотки статора; $k_s = w_1 / w_2$ - коэффициент, учитывающий часть используемой обмотки; w_1 - количество витков L_{1-1} и w_2 - количество витков L_{1-2} .

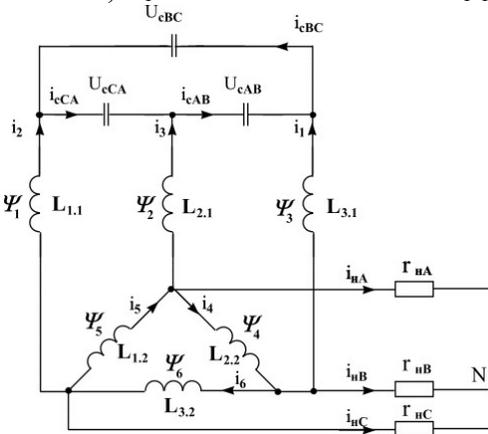


Рисунок 2 - Схема соединения звезда –треугольник автотрансформаторной обмотки статора асинхронного генератора с включением конденсаторов треугольником для 3-фазной нагрузки

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

$$\begin{cases}
k_s \frac{d\psi_1}{dt} = -k_s R_1 i_1 + k_s R_2 i_2 + r_{nC} i_{nC} - \frac{1}{2} u_{cCB} + \frac{1}{2} u_{cAB} - \frac{1}{2} u_{cCA} \\
k_s \frac{d\psi_2}{dt} = k_s R_1 i_1 + k_s R_3 i_3 + r_{nA} i_{nA} + \frac{1}{2} u_{cCB} - \frac{1}{2} u_{cCA} - \frac{1}{2} u_{cAB}; \\
k_s \frac{d\psi_3}{dt} = -k_s R_2 i_2 - k_s R_3 i_3 + r_{nB} i_{nB} - \frac{1}{2} u_{cCB} - \frac{1}{2} u_{cAB} + \frac{1}{2} u_{cCA} \\
(1-k_s) \frac{d\psi_6}{dt} = -(1-k_s) R_6 i_6 + r_{nB} i_{nB} + r_{nC} i_{nC}; \\
(1-k_s) \frac{d\psi_4}{dt} = -(1-k_s) R_4 i_4 + r_{nA} i_{nA} + r_{nB} i_{nB}; \\
(1-k_s) \frac{d\psi_5}{dt} = -(1-k_s) R_5 i_5 + r_{nA} i_{nA} + r_{nC} i_{nC}.
\end{cases} \quad (1)$$

Токи проходящих в обмотке статора по схеме звезда-треугольник асинхронного генератора определяются системой уравнения:

$$\begin{cases}
i_{cBC} = \frac{i_1 - i_2}{3}; \quad i_{cAB} = \frac{i_3 - i_1}{3}; \quad i_{cCA} = \frac{i_2 - i_3}{3}; \\
i_{nB} = -i_6 + i_4 - i_3; \quad i_{nA} = i_5 - i_4 - i_2; \quad i_{nC} = -i_5 + i_6 - i_1; \\
i_{nA} + i_{nB} + i_{nC} = 0; \quad i_4 + i_5 + i_6 = 0; \quad i_{cAB} + i_{cBC} + i_{cCA} = 0.
\end{cases} \quad (2)$$

При равных емкостях конденсаторов изменены напряжения на них можно определить с помощью дифференциальных уравнений:

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

В результате исследования углов смещения частей статорных обмоток друг относительно друга определена матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей $m_0 = f(L)$.

Расчет электрических потерь в статорной обмотке асинхронного генератора определяется после нахождения всех токов в частях статорной обмотки:

$$\Delta P_{\text{эл}} = 3 \cdot (i_1^2 \cdot R_1 + i_2^2 \cdot R_2 + i_3^2 \cdot R_3 + i_4^2 \cdot R_4 + i_5^2 \cdot R_5 + i_6^2 \cdot R_6) \quad (4)$$

В работе проведена реализация математической модели для асинхронного генератора мощностью 3 кВт на базе асинхронного двигателя 4A100 S4. Схема соединений обмотки представлена на рисунке 3.

Получена математическая модель асинхронного генератора:

$$\left\{ \begin{array}{l}
k_s \frac{d\psi_1}{dt} = -k_s R_1 i_1 + k_s R_2 i_2 + r_n(s) i_{nC} - \frac{1}{2} u_{cCB} + \frac{1}{2} u_{cAB} - \frac{1}{2} u_{cCA}; \\
k_s \frac{d\psi_2}{dt} = k_s R_1 i_1 + k_s R_3 i_3 + r_n(s) i_{nA} + \frac{1}{2} u_{cCB} - \frac{1}{2} u_{cCA} - \frac{1}{2} u_{cAB}; \\
k_s \frac{d\psi_3}{dt} = -k_s R_2 i_2 - k_s R_3 i_3 + r_n(s) i_{nB} - \frac{1}{2} u_{cCB} - \frac{1}{2} u_{cAB} + \frac{1}{2} u_{cCA}; \\
(1 - k_s) \frac{d\psi_6}{dt} = -(1 - k_s) R_6 i_6 + r_n(s) (i_{nB} + i_{nC}); \\
(1 - k_s) \frac{d\psi_4}{dt} = -(1 - k_s) R_4 i_4 + r_n(s) (i_{nA} + i_{nB}); \\
(1 - k_s) \frac{d\psi_5}{dt} = -(1 - k_s) R_5 i_5 + r_n(s) (i_{nA} + i_{nC}); \\
m_0 = f(L); \quad U_c = f(i); \quad i_{cBC} = \frac{i_1 - i_2}{3}; \quad i_{cAB} = \frac{i_3 - i_1}{3}; \quad i_{cCA} = \frac{i_2 - i_3}{3} \\
i_{nB} = -i_6 + i_4 - i_3; \quad i_{nA} = i_5 - i_4 - i_2; \quad i_{nC} = -i_5 + i_6 - i_1; \\
i_{nA} + i_{nB} + i_{nC} = 0; \quad i_4 + i_5 + i_6 = 0; \quad i_{cAB} + i_{cBC} + i_{cCA} = 0; \\
\Delta P_{91e} = 3 \cdot (i_1^2 \cdot R_1 + i_2^2 \cdot R_2 + i_3^2 \cdot R_3 + i_4^2 \cdot R_4 + i_5^2 \cdot R_5 + i_6^2 \cdot R_6).
\end{array} \right. \quad (5)$$

Для полного математического описания электромеханических процессов использовалась система уравнений обобщенной электрической машины в трехфазной системе координат с учетом формирования электромагнитного момента токами статорной и роторной обмоток:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d\psi_{r1}}{dt} = -R_{r1} \cdot i_{r1} - \frac{\psi_{r2} - \psi_{r3}}{\sqrt{3}} \omega_r; \quad \frac{d\psi_{r2}}{dt} = -R_{r2} \cdot i_{r2} - \frac{\psi_{r3} - \psi_{r1}}{\sqrt{3}} \omega_r; \\
\frac{d\psi_{r3}}{dt} = -R_{r3} \cdot i_{r3} - \frac{\psi_{r1} - \psi_{r2}}{\sqrt{3}} \omega_r; \\
\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J_\Sigma} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_m \cdot f(B) (i_{s1} \cdot i_{r3} + i_{s2} \cdot i_{r1} + i_{s3} \cdot i_{r2} - i_{s1} \cdot i_{r2} - i_{s2} \cdot i_{r3} - i_{s3} \cdot i_{r1} + \\
+ i_{s4} \cdot i_{r3} + i_{s5} \cdot i_{r1} + i_{s6} \cdot i_{r2} - i_{s4} \cdot i_{r2} - i_{s5} \cdot i_{r3} - i_{s6} \cdot i_{r1}) + \frac{M_{np} - M_c}{J_\Sigma} \\
M_{3m} = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m (i_{s1} \cdot i_{r3} + i_{s2} \cdot i_{r1} + i_{s3} \cdot i_{r2}) - (i_{s1} \cdot i_{r2} + i_{s2} \cdot i_{r3} + i_{s3} \cdot i_{r1}) + \\
+ (i_{s4} \cdot i_{r3} + i_{s5} \cdot i_{r1} + i_{s6} \cdot i_{r2}) - (i_{s4} \cdot i_{r2} + i_{s5} \cdot i_{r3} + i_{s6} \cdot i_{r1}).
\end{array} \right. \quad (6)$$

где p – количество пар полюсов, L_m – взаимноиндуктивность обмоток, $M_{пр}$ – момент приводного двигателя, J_{Σ} – суммарный момент инерции, M_c – момент сопротивления.

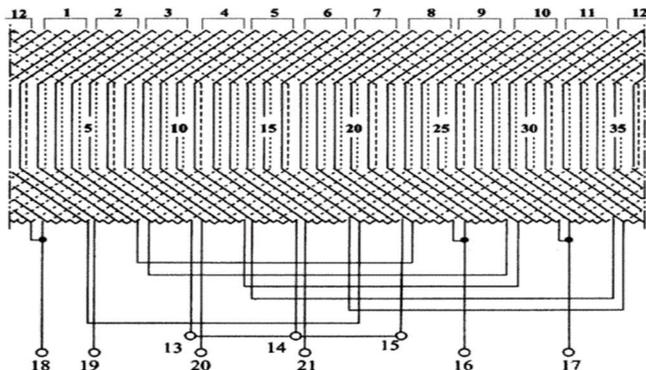


Рисунок 3 – Схема соединений генератора с автотрансформаторной обмоткой статора (патент RU2640403)

Все потери были разделены на три составляющие - в электродвигателе ΔP_d , в линии ΔP_l и в генераторе ΔP_g . В результате расчета электрических потерь в генераторе с переключаемой обмоткой статора получена графическая зависимость, представленная на рисунке 4. Для оценки электрических потерь при пуске и установившемся режиме работы бустерного насоса дождевальной машины использовалось компьютерное моделирование в программном комплексе SimInTech.

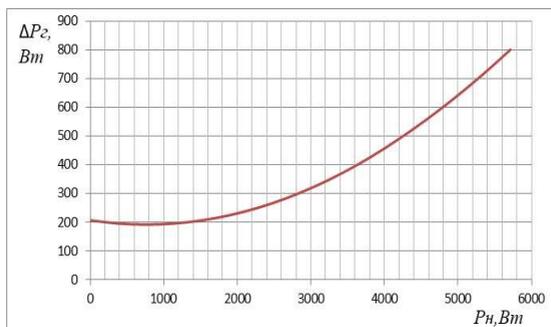


Рисунок 4 – Зависимость электрических потерь в обмотках статора асинхронного генератора от мощности нагрузки

Компьютерная модель электропривода бустерного насоса дождевальной машины основана на Т-образной схеме замещения с вынесенной цепью намагничивания, без учета насыщения. Блок для реализации модели асинхронного электродвигателя описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \psi_{qs}; \quad u_{ds} = R_d i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs}; \\ u_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r Z_p) \psi_{dr}; \quad u_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r Z_p) \psi_{qr}; \\ M_e = 1,5 p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}); \\ \psi_{qs} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}; \quad \psi_{ds} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{qr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}; \quad \psi_{dr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_{ce}). \end{array} \right. \quad (7)$$

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; M_e – электромагнитный момент двигателя; M_{ce} – момент сопротивления насоса; J – момент инерции эл. двигателя.

Параметры линии электропитания заложены в блоке «сопротивления линии» компьютерной модели и зависят от длины линии. Генератор представлен в виде источника электроэнергии блоком «U». Компьютерная модель снабжена необходимым комплектом измерительных устройств. В компьютерной модели анализировались электрические потери во всей электроустановке и в следующих режимах: пуск при номинальном напряжении, пуск при пониженном

напряжении 220 В с компенсацией реактивного тока и установившийся режим работы электропривода.

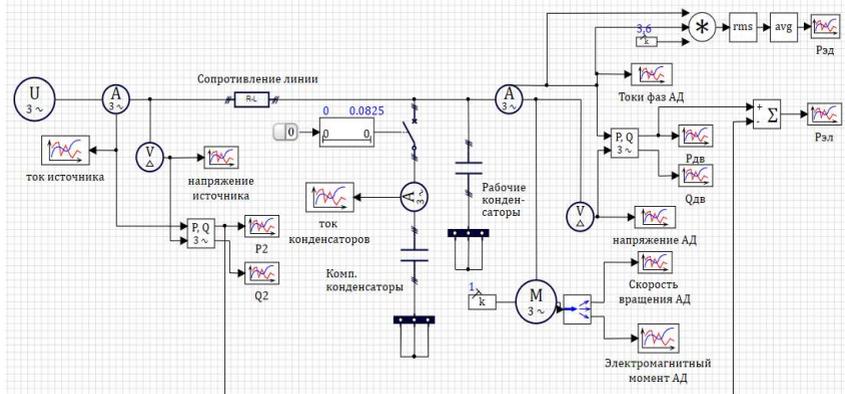
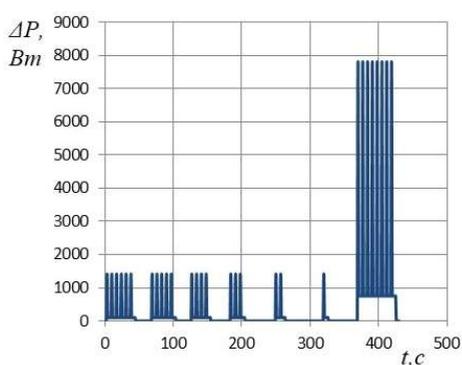


Рисунок 5 – Блок схема компьютерной модели системы электропитания дождевальной установки для оценки электрических потерь в линии и электродвигателе бустерного насоса

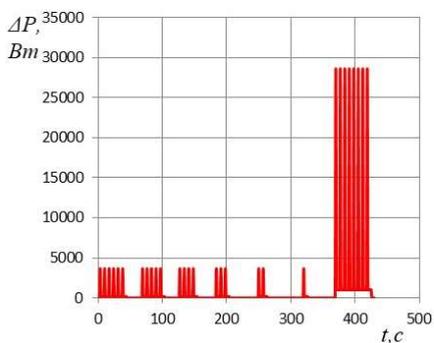
В качестве исходных данных вводились следующие: номинальная мощность асинхронного двигателя бустерного насоса - 3 кВт, линия электропитания длиной 300 м и сечением каждого проводника 10 мм². В результате моделирования установлено, что снижение напряжения и использование компенсирующих конденсаторов приводит к уменьшению электрических потерь энергии, во всех составляющих энергосистемы: в генераторе в 2,5 раза, в линии в 2,6 раза, в электроприводах 2,9 раза. На основании расчетов получен график потерь мощности в электродвигателях дождевальной машины кругового действия в течении одного цикла (Рисунок 6). Рассчитаны сравнительные потери энергии во всех составляющих электроустановки за один цикл: при использовании асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора - $\Delta W_c = 39$ Вт·ч, а при питания от типового генератора - $\Delta W_c = 104$ Вт·ч.

Количество циклов перемещения дождевальной машины за день зависит от нормы полива. При средней норме полива 300 м³/га, количество циклов за сутки составляет около 20 штук, что приводит

к общему потреблению энергии в размере 9,5 кВт·ч, в том числе потери энергии составят 2,1 кВт·ч.



а) с компенсирующими конденсаторами



б) без компенсирующих конденсаторов

Рисунок 6 – График общих потерь мощности дождевальная машины кругового действия в течении времени работы

Использование предлагаемого генератора приводит сокращению электрических потерь электроэнергии и уменьшению расхода топлива на 12 %. Кроме того, завышенные потери электроэнергии приводят к сокращению моторесурса автономного источника питания.

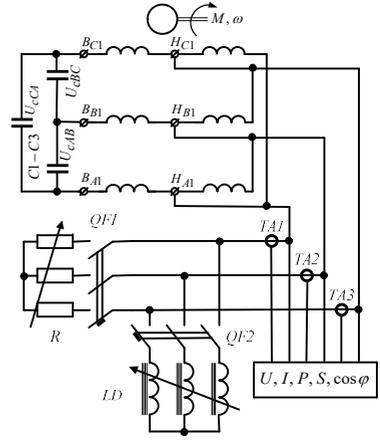
В третьей главе приведен расчет магнитной системы асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора и с серийной обмоткой статора. В результате расчета установлено, что при пуске электродвигательной нагрузки мощностью 0,36 кВт, и использовании серийного асинхронного генератора на 3 кВт запуск электроприводов становится невозможным из-за сильного снижения напряжения (до 46%) и размагничивания генератора. При использовании предлагаемого генератора той же мощности наблюдается устойчивый запуск электроприводов при снижении напряжения на 8,7%.

Экспериментальные исследования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора выполнены на специализированном испытательном стенде и содержат испытания с записью характеристик: холостого хода, частотных, внешних и регулировочных.

Внешний вид экспериментального стенда и его принципиальная схема представлены на рисунке 7.



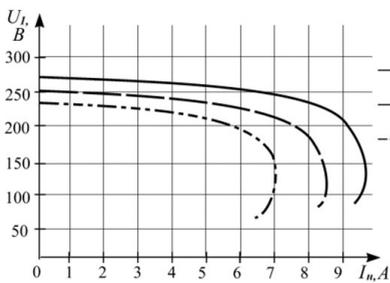
а) внешний вид экспериментального стенда



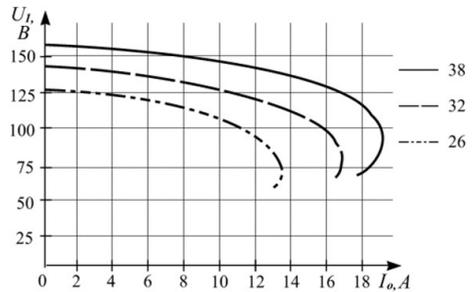
б) принципиальная схема

Рисунок 7 - Экспериментальный стенд для исследования асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Внешние характеристики показывают, что такой асинхронный генератор можно нагружать до 70% от установленной мощности при емкости возбуждения 18 мкФ. При увеличении нагрузки свыше 2 кВт необходимо будет включить дополнительную емкость 8 мкФ (рисунок 8).



а) обмотка статора, соединенная по схеме двойная звезда



б) обмотка статора соединенная по схеме звезда – треугольник

Рисунок 8 – Внешние характеристики асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора

Сопоставление электрических потерь в генераторе полученных расчетным путем и экспериментально, представлено на рисунке 9, из которого видно, что максимальная относительная ошибка не превышала 5% (рисунок 9).

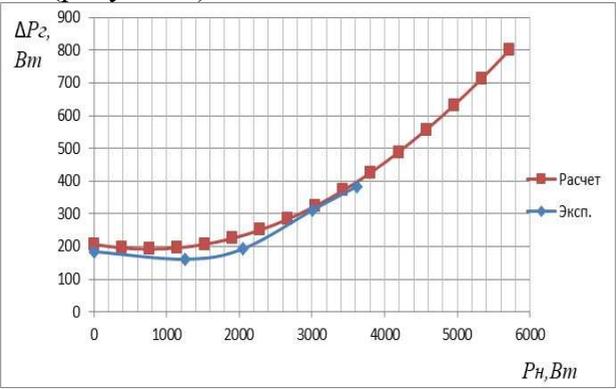
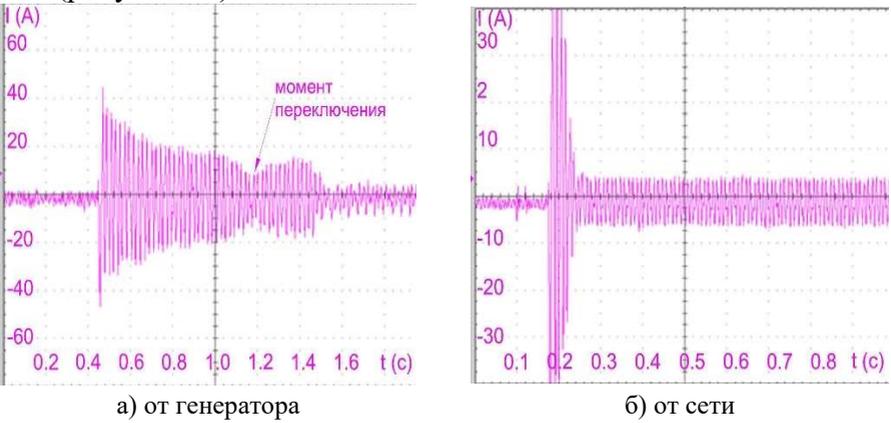


Рисунок 9 – Зависимость электрических потерь в обмотках статора асинхронного генератора, теоретические и экспериментальные данные

Для подтверждения теоретических расчетов потерь электроэнергии в электродвигателе бустерного насоса при пуске проводился эксперимент с асинхронной машиной серии АИР100S4 мощностью 3 кВт (рисунок 10).



а) от генератора
 б) от сети
 Рисунок 10 - Осциллограммы токов при включении двигательной нагрузки

Эксперимент показал, что опытные данные по потерям мощности практически совпали. Осциллограммы токов электродвигателя в момент пуска и при переключении представлены на рисунке 10, которые показывают, что при использовании асинхронного генератора с переключаемой статорной обмоткой значительно уменьшается пусковой ток. После пуска электродвигателя включение компенсирующих конденсаторов позволяет уменьшить ток в линии электропередач в 1,6 раза. Таким образом, при использовании предлагаемого генератора можно рекомендовать уменьшить сечение питающих проводников.

Расчет потерь электроэнергии по экспериментальным данным производился для линии электроснабжения длиной 300 м сечением 10 мм². В случае использованием асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора потери энергии за цикл составляют 44 Вт·ч, что отличается от расчетного на 11,3 %.

В четвертой главе произведен расчет экономической эффективности внедрения асинхронного генератора в составе дождевальной машины кругового действия с питающей линией электрооборудования длиной 500 м, применяемой для полива полей кукурузы площадью 50 га. Снижение электрических потерь при применении асинхронного генератора с переключаемой обмоткой статора ведет к уменьшению эксплуатационных затрат и дает возможность спроектировать линию с меньшим сечением проводников. Внедрение предлагаемых мероприятий приводит к получению ЧДД равного 207 тыс. руб. за 5 лет эксплуатации. При этом срок окупаемости проекта составляет 3 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

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 диамет-

ральным 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 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 экспериментально 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 ма-

шины радиусом 500 м. Снижение эксплуатационных и материальных затрат привело к получению ЧДД в размере 207 тыс. руб. при сроке окупаемости проекта 3 года.

Рекомендации производству

Рекомендации исследования могут быть использованы при проектировании асинхронных генераторов с переключаемой обмоткой статора электроснабжающих удаленных потребителей. При эксплуатации дождевальных машин кругового действия, работающих с большим радиусом полива предлагается провести модернизацию: заменить типовой генератор на генератор с переключаемой обмоткой и уменьшить сечение проводников.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Используя теоретические и экспериментальные данные, полученные в ходе проведения исследований, можно разработать математическую модель отражающую физические процессы, которые протекают в асинхронном генераторе с переключаемой обмоткой статора, например, в программе COMSOL Multiphysics. Такое исследование позволит оптимизировать саму конструкцию машины и рекомендовать более рациональный режим работы. Актуальным направлением исследования является разработка электронных коммутирующих элементов – ключей для необходимых переключений обмотки статора асинхронного генератора, которые имеют более высокое быстродействие и лучшие энергетические показатели. Дальнейшие исследования по сочетанию предлагаемого асинхронного генератора при работе с частотно управляемыми электроприводами тележек дождевальной машины приведет к экономии энергоресурсов и повышению надежности агрегата.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

1. Kumeyko, A.A. Determination of currents in an autotransformer stator winding of an autonomous asynchronous generator connected as a double star / Barakin N.S., Kumeyko A.A., Bogdan A.V. // Proceedings - 2020

International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. – 2020. – С.385–389.

2. Kumeyko, A.A Calculation of parameters asynchronous generator with stator winding connected in the star-delta / Barakin N.S., Kumeyko A.A., GarKavyu K.A. // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – С. 8933984.

3. 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. // Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. – 2019. – С. 8867693.

4. 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. – с. 892-896

5. 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. – с. 90-95

- в изданиях, рекомендованных ВАК:

6. 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.

7. Кумейко, А.А. Исследование асинхронного генератора с / Оськин С.В., Баракин Н.С., Кумейко А.А. // Сельский механизатор. – 2021. – № 2. – С. 28–29.

8. 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.

- в прочих изданиях:

9. 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

10. 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. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Составитель Н.А. Щербакова. – 2019. – С. 551-555.

11. Кумейко, А.А. Асинхронный генератор - как возможный сегмент фактора улучшения экологической обстановки и снижения пожароопасности в лесах / Кумейко А.А. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник тезисов по материалам Всеросс. (нац.) конф. отв. за вып. А. Г. Кощяев. – 2019. – С. 311-312.

12. 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. Сборник статей по материалам 74-й научно-практической. – 2019. – С. 977-980.

13. Кумейко, А.А. Перспективы использование автотрансформаторных обмоток в автономных источниках АПК / Кумейко А.А., Баракин Н.С. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам 75-й науч.-практич. конф. студентов по итогам НИР за 2019 год. отв. за вып. А.Г. Кощяев. 2020. С.950 - 951.

14. Кумейко, А.А. Применение автономного асинхронного генератора в составе газогенератора / Кумейко А.А., Баракин Н.С. // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник тезисов по материалам Всеросс. (национ.) конф. отв. за вып. А. Г. Кощяев. – 2019. – С. 647-648.

15. 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. Сборник статей по материалам XI Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. отв. за вып. А. Г. Кощяев. 2017. С. 388-389.

16. Кумейко, А.А. Факторы улучшения электроснабжения потребителей краснодарского края в современных условиях / Кумейко А.А. // В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам 72-й научн.-практич. конф. студентов по итогам НИР за 2016 год. – 2017. – С. 629-631.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. Кумейко, А.А. Исследование стабилизации напряжения асинхронного генератора с автотрансформаторной обмоткой / Баракин Н.С., Кумейко А.А., Заволока А.А. // В сборнике: Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе. Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции. 2017. – С. 10-13.

23. 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.

24. Кумейко, А.А. Особенности расчета электропривода пробоотборника почвы / Баракин Н.С., Кумейко А.А. // В сборнике: Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона. Материалы XII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 13-18.

25. Кумейко, А.А. О беспилотных летательных аппаратах для исследовании воздушных линий электропередач в сельском хозяйстве / Кумейко А.А. // British Journal of Innovation in Science and Technology. 2018. – Т. 3. № 4. – С. 35-38.

26. Кумейко, А.А. 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.

Подписано к печати
Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 1
Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16
Офсетная печать
Заказ № 15

Отпечатано в типографии ООО «Крон»
350044, Краснодар, пр. Чекистов 20