

*На правах рукописи*

**ГОЛУБЦОВА Ирина Васильевна**



**АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В РЕЖИМЕ СИНХРОННОГО  
ГЕНЕРАТОРА НА ОБКАТОЧНОМ СТЕНДЕ  
ДЛЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электрические машины и эксплуатация электрооборудования в сельском хозяйстве» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Челябинская государственная агроинженерная академия».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Буторин Владимир Андреевич**

Официальные оппоненты: **Стрижков Игорь Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электрические  
машины и электропривод» ФГБОУ ВПО  
«Кубанский государственный аграрный  
университет»

**Носков Виталий Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Электротехника,  
электрооборудование и электроснабжение»  
ФГБОУ ВПО «Ижевская государственная  
сельскохозяйственная академия»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский  
государственный университет»  
(Национальный исследовательский  
университет)

Защита состоится «10» июня 2015 г., в 9.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.069.01 на базе ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 75.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия» <http://www.csaa.ru>.

Автореферат разослан «17» апреля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Плаксин  
Алексей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из важнейших условий эффективного использования электрической энергии в сельскохозяйственном производстве является бесперебойное электроснабжение потребителей, поскольку перебои в электроснабжении наносят экономический ущерб. Поэтому проблема надежного обеспечения сельскохозяйственного производства электроэнергией требует решения. В связи с этим необходимо изыскивать дополнительные меры по резервированию электропитания, используя базу имеющегося на сельскохозяйственных предприятиях электрооборудования. В настоящее время с целью обеспечения безотказности электроснабжения применяются автономные источники электроснабжения на базе дизельных электростанций. Однако использование данных электростанций при нечастых отключениях сельскохозяйственных производителей экономически нецелесообразно из-за их достаточно большой стоимости.

На предприятиях и в мастерских по ремонту двигателей внутреннего сгорания мобильной сельскохозяйственной техники имеются обкаточные стенды. Эти стенды укомплектованы асинхронными машинами с фазным ротором. В Челябинской области до 1991 г. имелось свыше 150 обкаточных стендов. В настоящее время по экспертным оценкам в рабочем состоянии находится около 50 стендов.

Асинхронная машина с фазным ротором конструктивно подобна синхронной машине с неявнополюсным ротором. В асинхронной машине с фазным ротором так же, через контактные кольца и щетки, можно питать обмотку ротора постоянным током. Таким образом, асинхронную электрическую машину можно перевести в режим синхронного генератора, который будет составлять основу источника электропитания, однако данный перевод требует дальнейшего исследования. Поэтому тема диссертационной работы, посвященная исследованию синхронного генератора на основе асинхронного двигателя обкаточного стенда, является актуальной.

Работа выполнена на основании государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». Утверждена 27 декабря 2010 г. № 2446–р.

**Цель работы:** повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей путем использования асинхронных машин обкаточных стендов в качестве синхронных генераторов.

**Задачи исследования:**

1. На основе теоретических взаимосвязей между параметрами нагрузки, устройства возбуждения и электрической машины разработать методику расчета характеристик синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором обкаточного стенда.

2. На основе тепловых расчетов обмотки возбуждения (ротора) определить мощность синхронного генератора на базе асинхронного двигателя.

3. На основе экспериментальных исследований провести сравнение опытных характеристик генератора с характеристиками, полученными теоретическими расчетами.

4. Оценить технико-экономическую возможность использования асинхронных электрических машин, установленных на обкаточных стендах, в качестве синхронных генераторов.

**Объект исследования:** процесс работы синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором.

**Предмет исследования:** взаимосвязи между параметрами электрической машины, элементами устройств возбуждения, током нагрузки и напряжением генератора.

**Научная новизна основных положений, выносимых на защиту:**

1. Теоретически обоснована и предложена методика расчета характеристик синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором.

2. Уточнена методика расчета температуры нагрева обмотки возбуждения с учетом конструктивных особенностей фазного ротора асинхронной машины при работе в режиме синхронного генератора.

3. На основе тепловых расчетов предложена методика определения мощности синхронного генератора.

**Практическая ценность работы и реализация ее результатов.** Использование асинхронных двигателей в качестве синхронных генераторов на обкаточных стендах позволит снизить потребность в приобретении дорогостоящих резервных электростанций.

Разработанная методика расчета позволяет получать характеристики синхронного генератора без необходимости проведения натурных испытаний.

Уточненная методика оценки теплового состояния обмотки ротора (возбуждения) позволяет определить ее температуру нагрева и, в соответствии с классом нагревостойкости изоляции обмотки ротора, определить мощность генератора.

В ОАО «Нижняя Санарка» Челябинской области принята методика определения мощности источника электропитания с использованием асинхронной машины обкаточно-тормозного стенда на основе оценки температуры ротора.

Материал проведенных теоретических и экспериментальных исследований используется в курсе лекций по дисциплинам «Электрические машины» и «Эксплуатация электрооборудования в сельском хозяйстве» в ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия».

**Апробация работы.** Основное содержание диссертации докладывалось на ежегодных научно-технических конференциях ЧГАА (г. Челябинск, 2006–2014 гг.), КГУ (г. Курган, 2010 г.), СГАУ (г. Саратов, 2010; 2014 гг.), КНАУ (г. Алматы, 2010 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 17 научных статьях, в том числе три статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (119 наименований), шести приложений; содержит 140 страниц основного текста, в том числе 30 рисунков и 12 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы и поставлена цель работы, определены объект и предмет исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** «*Состояние вопроса и задачи исследования*» на основании анализа литературных источников и анализа электроснабжения сельскохозяйственных районов Челябинской области подтверждена необходимость использования резервных источников электропитания.

Вопросами резервного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей занимались научно-исследовательские организации

и высшие учебные заведения, такие как ВИЭСХ, РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, ВИМ, ЧГАА и др.

Основные теоретические и практические рекомендации по выбору автономных резервных электростанций и их технические характеристики опубликованы в работах И.А. Будзко, П.Е. Эбина, М.С. Левина, В.Н. Андрианова, А.Е. Мурадяна, Г.Л. Эбиной, Н.Ф. Молоснова, Д.Н. Быстрицкого, А.П. Алексеева, Е.Е. Чекунова, Е.И. Медведева и др.

В данной главе проанализированы возможности использования асинхронных и синхронных машин в резервных источниках электропитания. Синхронные машины выполняются для работы в режиме синхронных генераторов и применяются в выпускаемых промышленностью автономных резервных электростанциях.

Представляет интерес применение асинхронных двигателей с фазным ротором в качестве синхронных генераторов в источниках электроэнергии временного назначения на объектах агропромышленного комплекса. Так, предприятия по ремонту двигателей внутреннего сгорания мобильной сельскохозяйственной техники оснащены обкаточными стендами, укомплектованными асинхронными машинами с фазным ротором. Двигатель внутреннего сгорания совместно с асинхронной машиной фактически представляет электростанцию.

Необходимо перевести данный стенд в режим автономной электростанции путем применения устройства возбуждения, которое переводит асинхронную машину с фазным ротором в режим синхронного генератора. При этом обмотка ротора является обмоткой возбуждения. В итоге выбрана схема возбуждения асинхронной машины со статическими конденсаторами для самовозбуждения, подключаемыми к выводам обмотки статора, с использованием амплитудного компаундирования в виде трех трансформаторов, работающих в режиме трансформаторов тока, и трансформатора возбуждения. Трансформаторы через выпрямительные устройства подключены к обмотке возбуждения генератора. Трансформатор возбуждения служит для установки необходимого значения напряжения на холостом ходу генератора. На основании приведенного в первой главе анализа состояния вопроса были определены задачи исследования.

*Во второй главе «Теоретические предпосылки исследования синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным*

ротором» с использованием принципиальной схемы возбуждения синхронного генератора, представленной на рисунке 1, разработана методика расчета характеристик генератора с использованием асинхронной машины с фазным ротором в качестве синхронного генератора с соответствующим устройством возбуждения.

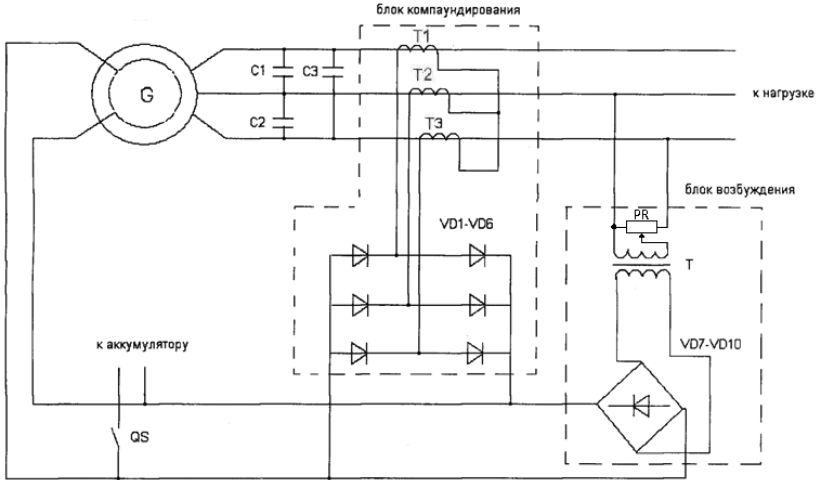


Рисунок 1 – Принципиальная схема возбуждения синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором

Разработана методика определения характеристик генератора, которая состоит в следующем:

1. Задаются токами нагрузки  $I_1$  в пределах  $I_{\text{ном}}$  электрической машины с коэффициентом мощности  $\cos \varphi_1$ .
2. Определяют ток генератора, протекающий по обмотке статора:

$$I_{\Gamma} = \sqrt{I_1^2 + I_C^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_C \cdot \sin(\varphi_1 + \gamma)}, \text{ А}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – угол между ЭДС в воздушном зазоре  $E_{\delta}$  и падением напряжения в обмотке статора;

$$I_C = \frac{U}{x_C} \text{ – ток конденсатора, А;}$$

$x_C$  – емкостное сопротивление конденсаторов.

3. Приводят ток генератора к обмотке ротора:

$$I'_Г = I_Г \cdot K_a, \text{ А}, \quad (2)$$

где  $K_a$  – коэффициент приведения токов статора и ротора:

$$K_a = \sqrt{1,5} \cdot \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}. \quad (3)$$

Здесь  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение обмотки статора, В;

$U_{2\phi}$  – фазное напряжение обмотки ротора, В.

4. Определяют ток обмотки возбуждения:

$$I_В = I'_Г + I_{ТК}, \text{ А}, \quad (4)$$

где  $I_{ТК}$  – ток от трансформаторов компаундирования, А:

$$I_{ТК} = I_1 \cdot K_{ТК} \cdot K_{СХ}. \quad (5)$$

Коэффициент трансформации трансформатора компаундирования  $K_{ТК}$  определяется по выражению:

$$K_{ТК} = \frac{I_{2Н}}{I_{1Н} \cdot K_{СХ}}, \quad (6)$$

где  $K_{СХ}$  – коэффициент, учитывающий схему выпрямления (для схемы Ларионова  $K = 0,815$ );

$I_{1Н}$  – номинальный ток обмотки статора, А;

$I_{2Н}$  – номинальный ток обмотки ротора, А.

5. Определяют ЭДС в воздушном зазоре:

$$\underline{E}_\delta = \underline{E}_0 = \sqrt{\underline{I}_В^{0,49}}, \quad (7)$$

где  $\underline{E}_0$  и  $\underline{I}_В$  – значения ЭДС и тока возбуждения в относительных единицах, при этом  $\underline{E}_0 = \underline{E}_0 \cdot E_n$ .

Выражение (7) получено аппроксимацией опытной кривой холостого хода генератора для рабочей части.

6. Определяют напряжение генератора:

$$U_Г = \sqrt{E_\delta^2 + (I_Г \cdot Z_1)^2 - 2 \cdot E_\delta \cdot I_Г \cdot Z_1 \cdot \cos \varphi}, \text{ В}, \quad (8)$$

где  $Z_1$  – сопротивление фазы обмотки статора генератора, Ом.



7. Рассчитывают напряжение на зажимах источника электропитания:

$$U = \sqrt{U_{\Gamma}^2 + U_1^2 - 2 \cdot U_{\Gamma} \cdot U_1 \cdot \sin(\gamma + \varphi_1 + \varphi_0)}, \text{ В}, \quad (9)$$

где  $U_1$  – напряжение первичной обмотки трансформатора компаундирования, В:

$$U_1 = U_2 \cdot K_{\text{ТК}}. \quad (10)$$

Здесь  $U_2 = 0,43 \cdot \left[ \frac{I_1 \cdot K_{\text{ТК}} \cdot r_{\text{В}}}{0,815} + \Delta U_{\text{Щ}} \right] + \Delta U_{\text{В}}, \text{ В};$

$U_2$  – напряжение вторичной обмотки трансформатора компаундирования, В;

$r_{\text{В}}$  – сопротивление обмотки возбуждения (двух фаз обмотки ротора), Ом;

$\Delta U_{\text{Щ}}$  – падение напряжения в щеточных контактах, В;

$\Delta U_{\text{В}}$  – падение напряжения в выпрямителе, В.

Предложенная методика отличается от существующих использованием выражений (4), (6), (7), учитывающих параметры элементов исследуемой схемы возбуждения генератора.

Полученные по данной методике расчетные величины позволяют построить внешние  $U = f(I_1)$  и регулировочные  $I_{\text{В}} = f(I_1)$  характеристики генератора без проведения испытаний в производственных условиях.

**В третьей главе** «Методика оценки температуры нагрева обмотки возбуждения генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором» уточнена методика расчета температуры обмотки ротора.

В исследуемом генераторе ток для создания магнитного потока в генераторе подается в обмотку возбуждения (ротора). Так как МДС обмотки ротора в асинхронном двигателе меньше, чем МДС обмотки статора, то ограничение по нагреву обмотки ротора не дает возможности использования номинальной мощности асинхронного двигателя при его работе в режиме синхронного генератора. В соответствии с этим появляется необходимость определения

значения тока обмотки ротора, соответствующего допустимой температуре нагрева класса изоляции, примененной в данной электрической машине.

Существующие методики тепловых расчетов асинхронных машин учитывают протекание токов во всех фазах трехфазной обмотки ротора. Особенностью исследуемого генератора является то, что токи протекают только в двух фазах обмотки ротора, которая используется в качестве обмотки возбуждения. Это учитывается в предлагаемой методике оценки температуры нагрева обмотки возбуждения при определении тепловых сопротивлений.

Для определения средней температуры нагрева отдельных частей электрической машины используется широко распространенный метод тепловых схем замещения. При этом применяют понятие тепловых сопротивлений между нагретой поверхностью и охлаждающей средой, а также тепловых сопротивлений пазовой изоляции.

На рисунке 2 представлена преобразованная тепловая схема замещения с учетом всех конструктивных элементов ротора.

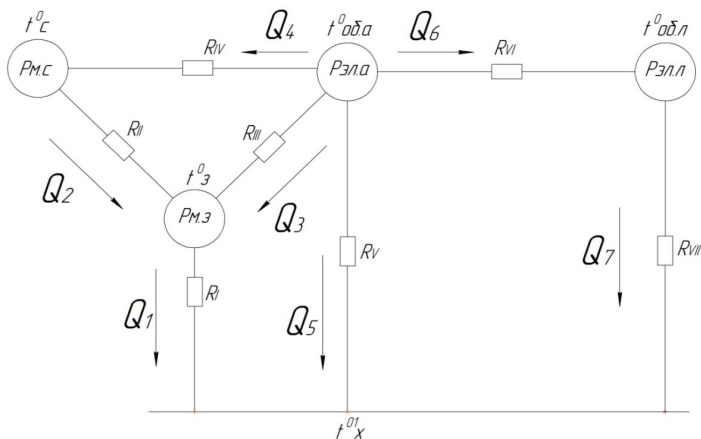


Рисунок 2 – Преобразованная тепловая схема замещения ротора

Параметр  $R$  на рисунке 2 обозначает:

$R_I$  – тепловое сопротивление зубца вдоль листов стали и с поверхности зубцов в воздушный зазор, °С/Вт;  $R_{II}$  – сопротивление тепловому потоку, идущему от сердечника ротора к зубцу, °С/Вт;  $R_{III}$  – сопротивление тепловому потоку, идущему из паза ротора

к зубцу ротора, °C/Вт;  $R_{IV}$  – сопротивление тепловому потоку, идущему из сердечника ротора в паз ротора, °C/Вт;  $R_V$  – сопротивление тепловому потоку, который рассеивается с поверхности клина в воздушный зазор между ротором и статором, °C/Вт;  $R_{VI}$  – сопротивление тепловому потоку, идущему вдоль проводников из активной части обмотки в лобовую часть обмотки ротора, °C/Вт;  $R_{VII}$  – сопротивление тепловому потоку, который рассеивается с лобовой части обмотки ротора, °C/Вт.

Используя законы Кирхгофа, получаем систему уравнений для определения превышения температуры отдельных частей электрической машины над температурой окружающей среды:

$$t_{\text{об.л}} - t_x = \Theta_{\text{л}} = R_{VII} \cdot Q_7, \quad (11)$$

$$t_{\text{об.а}} - t_x = \Theta_{\text{а}} = R_V \cdot Q_5, \quad (12)$$

$$t_3 - t_x = \Theta_3 = R_I \cdot Q_1, \quad (13)$$

$$t_c - t_x = \Theta_c = R_{II} \cdot Q_2 + R_I \cdot Q_1, \quad (14)$$

$$\Theta_{\text{а}} - \Theta_{\text{л}} = R_{VI} \cdot Q_6, \quad (15)$$

$$\Theta_{\text{а}} - \Theta_3 = R_{III} \cdot Q_3, \quad (16)$$

$$\Theta_{\text{а}} - \Theta_c = R_{IV} \cdot Q_4, \quad (17)$$

$$\Theta_c - \Theta_3 = R_{II} \cdot Q_2, \quad (18)$$

$$P_{\text{эл.л}} = Q_7 - Q_6, \quad (19)$$

$$P_{\text{эл.а}} = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (20)$$

$$P_{\text{м.с}} = Q_2 - Q_4, \quad (21)$$

$$P_{\text{м.з}} = Q_1 - Q_2 - Q_3. \quad (22)$$

Здесь  $t_{\text{об.л}}$  – температура лобовой части обмотки ротора, °C;  
 $t_{\text{об.а}}$  – температура пазовой части обмотки ротора, °C;

$t_x$  – температура окружающей среды, °С;  
 $t_3$  – температура зубца ротора, °С;  
 $t_c$  – температура сердечника ротора, °С;  
 $\Theta_{л}$  – превышение температуры лобовой части обмотки ротора над окружающей средой (40 °С);  
 $\Theta_a$  – превышение температуры пазовой части обмотки ротора, °С;  
 $\Theta_c$  – превышение температуры сердечника ротора, °С;  
 $\Theta_3$  – превышение температуры зубца ротора, °С;  
 $Q_1 \dots Q_7$  – тепловые потоки, Вт;  
 $P_{эл.л}$  – электрические потери лобовой части обмотки ротора:

$$P_{эл.л} = 2 \cdot R_{\phi} \cdot I^2 \cdot K_{л}, \text{ Вт}, \quad (23)$$

где  $R_{\phi}$  – сопротивление одной фазы обмотки ротора при 75 °С, Ом;  
 $I$  – ток в обмотке ротора, А;  
 $K_{л}$  – коэффициент, учитывающий длину лобовой части обмотки ротора;  
 $P_{эл.а}$  – электрические потери мощности в пазовой части обмотки ротора:

$$P_{эл.а} = 2 \cdot R_{\phi} \cdot I^2 \cdot K_{а}, \text{ Вт}, \quad (24)$$

где  $K_{а}$  – коэффициент, учитывающий длину пазовой части обмотки ротора;

$P_{м.с}$  – магнитные потери в сердечнике статора, Вт;

$P_{м.з}$  – магнитные потери в зубцах ротора, Вт.

Составленная система уравнений решена в среде математического пакета фирмы MathSoft – MathCAD, в версии 10, определена температура нагрева лобовой и пазовой частей обмотки ротора в зависимости от тока возбуждения (приложение 2 в диссертации).

По допустимой температуре нагревостойкости класса изоляции, примененной для изоляции обмотки ротора, и полученным кривым нагрева определяют допустимый ток обмотки ротора, т.е. ток возбуждения. По значению допустимого тока ротора, используя регулировочную характеристику, определяют ток статора генератора и мощность генератора.

**В четвертой главе «Экспериментальные исследования»** изложена реализация следующей программы экспериментов:

1. Согласование частоты вращения вала ДВС и частоты вращения вала генератора.

2. Определение внешних и регулировочных характеристик синхронного генератора экспериментальным путем, а также получение характеристик расчетным путем и их сравнение.

3. Испытание ротора генератора на нагрев по ГОСТ 27222-91 методом сопротивления в такой последовательности:

– измерение на постоянном токе сопротивления обмотки ротора в холодном состоянии;

– работа генератора под нагрузкой и при изменении тока возбуждения до 1,3 номинального значения с целью определения значения тока обмотки ротора при допустимой температуре класса нагревостойкости изоляции;

– измерение сопротивления обмотки ротора в нагретом состоянии при разных токах;

– расчет температуры обмотки через значения сопротивлений.

4. Оценка времени восстановления системы электроснабжения с использованием предлагаемого источника резервного электроснабжения.

Для согласования частоты вращения ДВС и частоты вращения генератора двигатель внутреннего сгорания должен работать на частичном режиме при частоте вращения 1500 об/мин.

В соответствии с программой исследований на основании теоретических положений (глава 2 диссертации) разработана компьютерная программа расчета характеристик синхронного генератора. Расчеты приведены в приложении 1 диссертации.

По результатам расчетов построены внешние характеристики синхронного генератора на базе асинхронной машины 4АНК2Б-250М4У3, представляющие зависимости напряжения от тока нагрузки – кривые 1 и 2 (рисунок 3).

Также на рисунке 3 представлены характеристики генератора, полученные сотрудниками кафедры ЭМЭЭСХ ЧГАА в производственных условиях (кривые 3 и 4) на стенде КИ5540М – ГОСНИТИ.

Расчетные внешние характеристики генератора несколько отличаются от экспериментальных. Это объясняется тем, что при разработке методики расчета характеристик были приняты некоторые допущения. Так, например, было принято, что намагничивающий ток от конденсаторов не изменяется при изменении напряжения. Поэтому расчетные значения напряжения несколько выше экспериментальных.

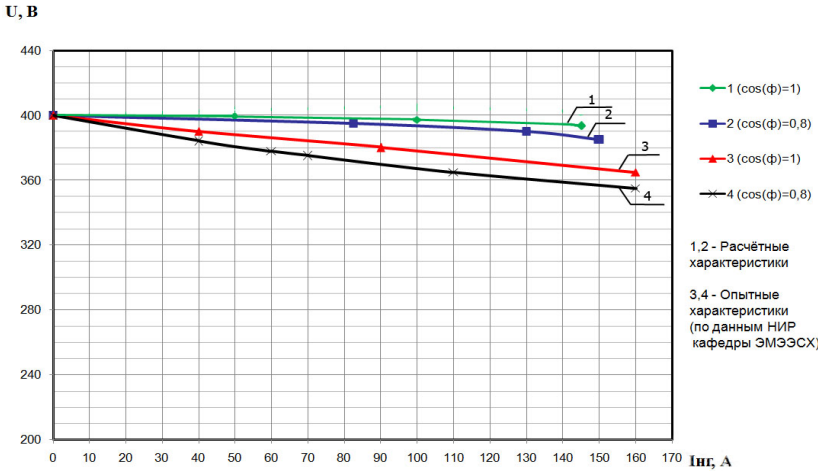


Рисунок 3 – Расчетные и опытные внешние характеристики генератора

Адекватность характеристик экспериментальным данным свидетельствует о достоверности разработанной методики расчета характеристик генератора.

Полные экспериментальные исследования синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором проводились на физической модели, представляющей собой асинхронный двигатель с фазным ротором.

Эксперимент на физической модели позволяет использовать методику исследований на электрических машинах большей мощности с учетом новых материалов и конструкций изоляции их обмоток.

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 4.

Лабораторная установка состоит из асинхронной машины с фазным ротором мощностью 2,8 кВт, приводного двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, устройства возбуждения и компаундирования синхронного генератора.

При получении внешних и регулировочных характеристик нагрузку изменяли с помощью жидкостного реостата, частоту вращения генератора поддерживали изменением тока возбуждения двигателя постоянного тока, для измерения электрических величин использовали приборы класса точности 0,5.

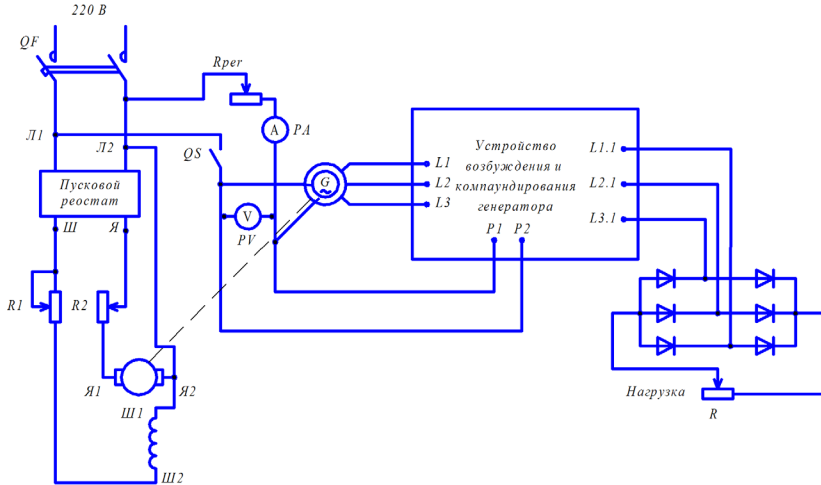


Рисунок 4 – Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

Опытная внешняя  $U = f(I)$  и регулировочная  $I_B = f(I)$  характеристики представлены на рисунках 5 и 7, где  $I$  – ток нагрузки,  $U$  – напряжение на зажимах генератора. Из характеристик видно, что напряжение при увеличении нагрузки изменяется не более чем на 5 %.

На тех же рисунках представлены расчетные характеристики генератора, полученные на ЭВМ (приложение 2 в диссертации), по методике, изложенной в главе 2. Расхождение между опытными и расчетными значениями напряжений составляет не более 3 %.

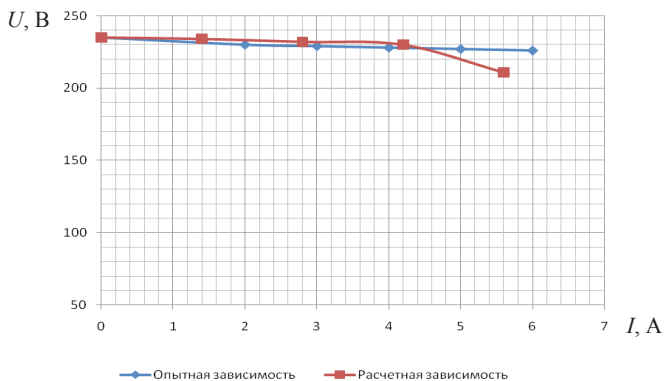


Рисунок 5 – Внешние характеристики генератора

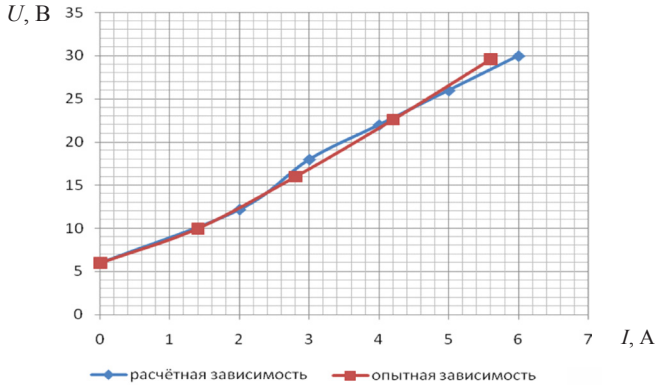


Рисунок 6 – Регулировочные характеристики генератора

Тепловые испытания генератора проводились при работе генератора под нагрузкой и при изменении тока возбуждения (ротора) до 1,3 номинального значения. При этом для каждого значения тока возбуждения (и тока нагрузки) выдерживалось время, равное четырем значениям постоянной времени нагрева – 80 мин. При отключенном генераторе измерялись значения сопротивления нагретой обмотки ротора методом амперметра-вольтметра и рассчитывались значения температуры обмотки.

Полученные при этом значения сопротивления обмотки ротора и ее температуры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты опытного определения температуры обмотки

Ток возбуждения, А	Измеренное сопротивление, Ом	Температура обмотки, °С
Холодная машина	0,125	20,0
15,0	0,136	43,1
22,5	0,148	67,3
30,0	0,165	98,5

Температуру обмотки определяли по формуле:

$$t_{\Gamma} = \frac{r_{\Gamma} - r_x}{r_x} \cdot (235 + t_x) + t_x, \quad (25)$$



где  $r_T$  и  $r_x$  – сопротивления обмотки ротора в нагретом и холодном состоянии, Ом;

$t_x$  – температура обмотки ротора в холодном состоянии, °С.

Экспериментальная зависимость температуры обмотки ротора от тока возбуждения представлена на рисунке 7.

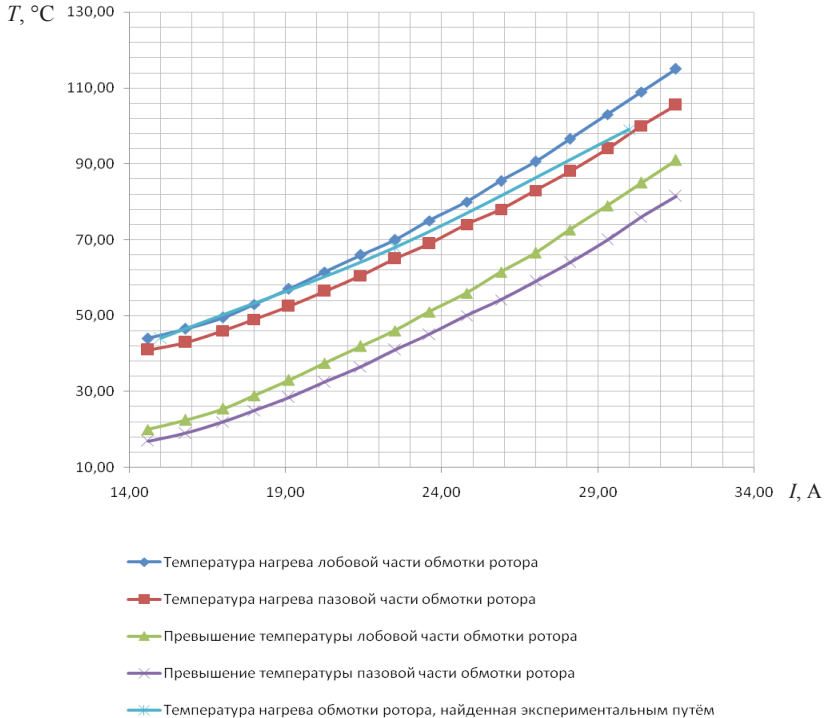


Рисунок 7 – Расчетные и экспериментальные зависимости температуры обмотки ротора (и ее частей) от тока

По тепловой схеме замещения электрической машины рассчитываются значения температуры лобовой и пазовой частей обмотки ротора. На рисунке 7 изображены зависимости температуры лобовой и пазовой частей обмотки ротора, полученные расчетным путем, а также превышение температуры лобовой и пазовой частей этой обмотки. Программа и пример расчета представлены в диссертации (приложение 3).

Среднее значение температуры между расчетными значениями температуры пазовой и лобовой частей обмотки отличается от опытных значений температуры обмотки не более чем на 5%. Это подтверждает возможность получения зависимости температуры обмотки ротора расчетным путем по методике, разработанной в третьей главе диссертации. При этом нет необходимости в проведении испытаний под нагрузкой.

Полученные зависимости (рисунок 7) позволяют определить мощность генератора. По допустимой температуре класса нагревостойкости изоляции, примененной для изоляции обмотки ротора, и полученным кривым нагрева определяют допустимый ток ротора, т.е. ток возбуждения.

По регулировочной характеристике генератора и допустимому току ротора (току возбуждения) определяют ток статора генератора и мощность генератора:

$$S = m \cdot U_{\phi} \cdot I \cdot 10^{-3}, \text{ кВА.} \quad (26)$$

Для исследуемой на лабораторной установке машины АК 51-4 мощностью 2,8 кВт с классом изоляции А (с доп. прев.  $t = 60^{\circ}\text{C}$ )  $I_{\text{в}} = 25,3 \text{ А}$ , по регулировочной характеристике  $I = 4,6 \text{ А}$ . Отсюда мощность генератора:

$$S = 3 \cdot 220 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3} = 3,0 \text{ кВА.}$$

В двигательном режиме полная потребляемая мощность составляет

$$S = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{2,8}{0,78 \cdot 0,82} = 4,3 \text{ кВА.}$$

В режиме генератора отдается 3,0 кВА, что составляет  $(3,0/4,3) \times 100\%$ , или 69% от потребляемой мощности в режиме двигателя.

Для оценки времени подключения устройства возбуждения и запуска синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором проводился эксперимент в лаборатории кафедры ЭМЭЭСХ ЧГАА. Подключение устройства производилось разными исполнителями. При этом фиксировалось время ввода генератора в работу. Было проведено 30 опытов, в результате которых установ-

лены среднее время восстановления  $\tau_B = 1,03$  ч и среднеквадратическое отклонение времени восстановления  $\sigma = 12,0$  мин. Использование синхронного генератора на обкаточном стенде почти на порядок позволяет сократить время восстановления электроснабжения.

В пятой главе «Эффективность результатов исследования» проведено сравнение технико-экономических показателей стандартной резервной электростанции мощностью 100 кВт и соизмеримого по мощности предлагаемого генератора на базе обкаточно-тормозного стенда марки КИ-5274 ГОСНИТИ, на котором установлена электрическая машина с фазным ротором мощностью 160 кВт. Расчетный годовой экономический эффект от использования одной установки составляет 80,2 тыс. руб.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ электроснабжения сельскохозяйственных районов и имеющихся отключений электроэнергии показывает необходимость использования резервных источников электропитания, в качестве которых могут применяться стандартные электростанции, а также имеющееся на предприятиях электрооборудование.

Использование асинхронных двигателей с фазным ротором, установленных на обкаточных стендах, в режиме синхронных генераторов позволит более эффективно использовать обкаточные стенды и сэкономить средства на приобретение резервных электростанций. Применение асинхронных двигателей в качестве синхронных генераторов недостаточно исследовано.

2. Известные аналитические связи между параметрами синхронного генератора не позволяют определить напряжение у потребителя. На основе установленной аналитической зависимости между ЭДС генератора и током возбуждения разработана методика расчета внешних характеристик генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором.

3. Установленные аналитические зависимости температуры нагрева обмотки возбуждения протекающим током позволяют определить максимальное значение тока для соответствующего класса нагревостойкости изоляции обмотки ротора.

4. Установлено, что применение метода расчетов по тепловым схемам замещения позволяет определить мощность синхронного генератора следующим образом: по допустимой температуре класса нагревостойкости изоляции определяется максимальное значение тока обмотки ротора и по регулировочной характеристике – соответствующее значение тока обмотки статора, затем через напряжение рассчитывается мощность синхронного генератора. Исследования показали, что мощность синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором составляет 60...70% от номинальной (паспортной) мощности электродвигателя.

5. На основе сравнения расчетных и экспериментальных внешних характеристик генератора установлена их адекватность, что подтверждает возможность использования предложенной методики расчета без проведения натурных испытаний. Расхождение расчетных и экспериментальных характеристик находится в пределах 5%.

6. В результате экспериментов по тепловым испытаниям установлено, что полученные значения температуры нагрева обмотки ротора практически не отличаются от расчетных; это подтверждает правильность разработанного метода определения мощности синхронного генератора.

7. Использование резервного источника электропитания на базе обкаточного стенда обеспечивает коэффициент готовности  $K = 0,99964$  электроснабжения рассматриваемого объекта, что существенно (на 0,0004 ед.) превышает его базовое значение.

8. Техничко-экономический расчет показал целесообразность использования асинхронных машин обкаточных стендов в качестве синхронных генераторов. При этом нет необходимости приобретения стандартных резервных электростанций, что позволяет экономить средства на капитальные вложения. Использование обкаточного стенда КИ-5274 с электрической машиной мощностью 160 кВт для электроснабжения котельной позволит получить годовую экономию 80,2 тыс. руб.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ**

1. Голубцова, И. В. Электродвигатель обкаточного стенда как резервный источник электропитания [Текст] / В. А. Буторин,

В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 10. – С. 23.

2. Голубцова, И. В. Обкаточный стенд для резервирования электропитания сельскохозяйственных потребителей [Текст] / И. В. Голубцова // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 1. – С. 70–74.

3. Голубцова, И. В. Резервная электростанция с использованием асинхронной машины с фазным ротором [Текст] / И. В. Голубцова // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 6. – С. 62–65.

### **Публикации в других изданиях**

4. Буторин, В. А. Электроснабжение сельскохозяйственных районов Челябинской области [Текст] / В. А. Буторин, В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Вестник ЧГАУ. – 2006. – Т. 48. – С. 26–27.

5. Буторин, В. А. Резервные источники электроэнергии в системе энергетики сельского хозяйства [Текст] / В. А. Буторин, И. В. Голубцова // Вестник ЧГАУ. – 2007. – Т. 50. – С. 12–14.

6. Буторин, В. А. Состояние электроснабжения сельскохозяйственных предприятий Челябинской области [Текст] / В. А. Буторин, В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Материалы XLVI междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск, 2007. – Ч. 2. – С. 184–187.

7. Емец, В. Ф. Анализ вариантов питания обмотки возбуждения синхронного генератора на базе асинхронной машины [Текст] / В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Вестник ЧГАУ. – 2008. – Т. 52. – С. 45–47.

8. Голубцова, И. В. Расчет характеристик источника электропитания на базе асинхронной машины с фазным ротором [Текст] / И. В. Голубцова // Материалы LVIII междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск, 2009. – Ч. 4. – С. 39–44.

9. Емец В. Ф. Расчет температуры нагрева обмотки ротора синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором [Текст] / В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Вестник ЧГАУ. – 2009. – Т. 55. – С. 61–64.

10. Буторин, В. А. Использование трехфазной асинхронной машины с фазным ротором в источнике резервного электропитания

[Текст] / В. А. Буторин, В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Актуальные проблемы энергетики АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конференции / СГАУ. – 2010. – С. 115–119.

11. Голубцова, И. В. Выбор схемы питания обмотки возбуждения синхронного генератора на базе асинхронной машины [Текст] / И. В. Голубцова // Вестник Курганского государственного университета. – Сер. : Технические науки. – 2010. – Вып. 5. – № 1(17). – С. 86–87.

12. Буторин, В. А. Использование трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором в источниках резервного электропитания [Текст] / В. А. Буторин, В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Агроөнеркәсіп кешенінің индустриалды-инновациялық дамуы: қазіргі жағдайды және келешегі : қазақ ұлттық аграрлық университетінің 80 жылдығына арналған Халықаралық ғылыми – практикалық конференция материалдары / Қазақ Ұлттық аграрлық университеті. – Алматы : ҚазҰАУ, 2010. – 3-бөлім. – С. 15–16.

13. Голубцова, И. В. Экономическая оценка использования обкаточных стендов в качестве резервных источников электропитания [Текст] / И. В. Голубцова // Вестник ЧГАА. – 2012. – Т. 60. – С. 91–93.

14. Емец, В. Ф. Методика определения мощности синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором [Текст] / В. Ф. Емец, И. В. Голубцова // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск, 2013. – С. 142–145.

15. Голубцова, И. В. Синхронный генератор на базе асинхронной машины с фазным ротором в источнике резервного электропитания [Текст] / И. В. Голубцова // Вестник Курганского государственного университета. – Сер. : Технические науки. – 2013. – Вып. 5. – № 1. – С. 56–58.

16. Емец, В. Ф. Исследование несимметричного режима асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / В. Ф. Емец, Р. В. Банин, И. В. Голубцова // Материалы ЛШ междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск : ЧГАА, 2014. – Ч. III. – С. 258–265.

17. Голубцова, И. В. Расчет характеристик синхронного генератора на базе асинхронной машины с фазным ротором [Текст] / И. В. Голубцова // Актуальные проблемы междунар. науч.-практ. конференции. СГАУ, 2014. – С. 79–83.

---

Подписано в печать 30.03.2015. Формат 60×84/16  
Гарнитура Times. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 34.

---

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВПО ЧГАА  
454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 83