

УДК 621.31.03

UDC 621.31.03

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ШЕСТЬЮ ФАЗНЫМИ ЗОНАМИ

THE METHODS AND THE RESULTS OF THE TESTING OF AN ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH SIX PHASE ZONES

Богатырев Николай Иванович
к.т.н., профессор, SPIN-код: 4601-9136
Кубанский государственный аграрный университет, г.Краснодар, Россия

Bogatyryov Nikolai Ivanovich
Cand.Tech.Sci., professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Баракин Николай Сергеевич
к.т.н., ассистент, SPIN-код: 2129-5026
Кубанский государственный аграрный университет, г.Краснодар, Россия

Barakin Nikolai Sergeevich
Cand.Tech.Sci., assistant
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье рассмотрены особенности испытания асинхронного генератора с шестизонной обмоткой на базе асинхронного двигателя серии 4A100S4 и проведен анализ полученных характеристик. Схемные параметры статорной обмотки существенно влияют на характеристики асинхронного генератора. Для сравнения испытывался асинхронный генератор с обмоткой статора соединенной звездой, автотрансформаторной и шестизонной обмоткой. Использование шестизонных обмоток открывают возможность применения различных схем подключения конденсаторов и нагрузки к асинхронным генераторам, которые в свою очередь влияют на КПД и стабилизирующие свойства электрической машины. Целью испытания асинхронных генераторов с шестизонной обмоткой является подтверждение теоретических расчетов по определению наиболее оптимальной схемы подключения конденсаторов и нагрузки, проверки работоспособности обмотки статора. Объем испытаний для асинхронных генераторов ГОСТом не определен, поэтому нами предложена методика испытания с учетом особенности конструкции статорной обмотки. Испытания проводились на специализированном стенде, с применением анализатора качества электроэнергии. Получены характеристики холостого хода, короткого замыкания и другие. Рассмотрен тепловой режим. На основе полученных результатов определены параметры схемы замещения, КПД и коэффициент мощности асинхронного генератора

The article contain the peculiarities of testing asynchronous generator with sixzone winding on the basis of the asynchronous motor series 4A100S4 and analysis of obtained characteristics. Circuit parameters of the stator winding can significantly affect the characteristics of the asynchronous generator. Asynchronous generator was tested with a stator winding connected star, autotransformer and sectional winding. Use chas-tising windings opens the possibility of applying various circuits of capacitors and the load to asynchronous generators, which in turn affect the efficiency and stabilizing properties of the electric machine. Asynchronous generators to test with sectional winding by confirmation of theoretical calculations for determine the most optimal scheme under connect capacitors and load, testing the stator winding. The volume of testing for asynchronous generators standard is not defined, so we proposed testing method, taking into account the design features of the stator winding. Asynchronous generators were tested with the help of special equipment with the use of analyzer of energy power quality. Article contains characteristics of idling, short circuit and others, considered the heat mode. On the basis of the results we have determined the parameters of the circuit, the efficiency and power factor of induction generator

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, СТАТОРНАЯ ОБМОТКА, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ШЕСТИЗОННАЯ ОБМОТКА, ИСПЫТАНИЯ

Keywords: ASYNCHRONOUS GENERATOR, STATOR WINDING, CHARACTERISTICS, SIX-ZONE WINDING

Анализ литературных источников [1, 2, 4 - 8, 10] показал, что в области методики испытания асинхронных машин (АМ) в режиме асинхронного генератора (АГ) имеются существенные пробелы. Это связано, на

наш взгляд, с тем, что долгие годы АГ не уделялось должного внимания и при исследовании не учитывались особенности их статорных обмоток. В АГ, как в любой АМ, обмотка статора является наиболее сложной, ответственной и технологически трудоёмкой в изготовлении частью электрической машины. Обмотка статора определяет своими электромагнитными свойствами, технологичностью и стоимостью все основные показатели АГ. В этой связи выбор наиболее рациональных схем обмоток АГ и оптимизация их электромагнитных параметров – важнейший этап разработки и создания АГ небольшой мощности для автономных источников питания.

Современные приёмы формирования обмоток статора позволяют методами усовершенствования их схем расширить поиск рационального использования габарита АГ. В основу метода положено представление чередования фазных зон статора, а также элементов отображающих трёхфазную сеть, матрицами [6]. Используя этот метод, нами совместно с учёными ФГБНУ СКНИИМЭСХ (г. Зерноград) разработано и запатентовано более 30 обмоток статора для асинхронных генераторов, в том числе [12 – 23].

Определённый интерес представляют обмотки статора АГ с шириной фазной зоны 120° [25], с шестью фазными зонами условно названными «кольцевыми» [3].

Нами изготовлены несколько АГ с новыми обмотками на базе асинхронных двигателей серии АИР и 4А. В настоящее время отсутствуют ГОСТы по методам испытания асинхронных генераторов.

В этой связи нами предлагается методика исследования и испытания АГ на стадии опытных образцов. Поскольку большинство АГ проектируются и изготавливаются на базе серийных АД, то некоторые параметры для расчета АГ получены при испытаниях его в двигательном режиме.

По существующим в России стандартам имеются следующие основные методы испытаний для асинхронных машин [15].

Обычно испытания проводятся на электрической машине при установившейся температуре. Тепловые потери вида I^2R должны быть приведены соответствующим пересчетом к расчетной рабочей температуре.

При проведении опытов холостого хода, короткого замыкания, при определении рабочих характеристик и испытаниях на нагревание измеряются линейные напряжения, линейные токи, частота тока и мощность [5].

Исследования проводились на специализированном стенде (рисунок 1 и 2) [10, 11]. Приводной двигатель 2ПН132МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные: $P_H=10,5$ кВт; $U_H=220$ В; $n_H=3000$ мин⁻¹; $n_{max}=4000$ мин⁻¹; $\eta_H=84$ %; $R_{\text{я}}=0,14$ Ом; $R_{\text{доб}}=0,044$ Ом; $R_{\text{г}}=111$ Ом (после опытов в нагретом состоянии $R_{\text{я}}=0,24$ Ом; $R_{\text{г}}=162$ Ом).



Рисунок 1 – Оборудование для испытания асинхронных генераторов

Асинхронный генератор возбуждается от батареи конденсаторов, емкость которых предварительно рассчитывается. Имитация активной нагрузки создавалась угольным или жидкостным реостатом R_H , в зависимости от величины напряжения на АГ, индуктивная нагрузка – индукционным регулятором.

Для регулирования и стабилизации частоты вращения ротора асинхронного генератора, используется схема автоматического управления

ДПТ (рисунок 2) [10, 11]. Схема содержит управляемый выпрямитель *VS1 - VS6*,

VS6, блок управления *БУ*, регулятор скорости *R1*, тахогенератор *G ω* , пере-

ключатель режима работы *SB1*.

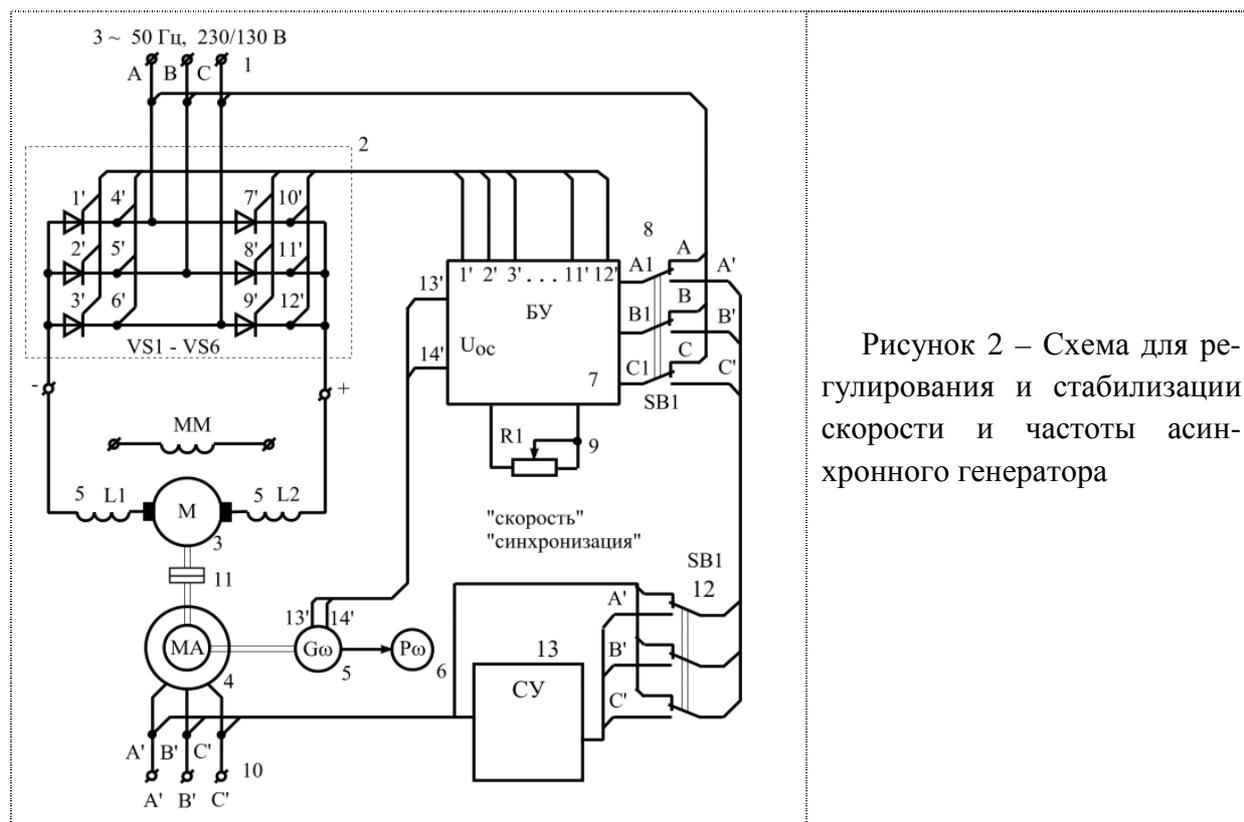


Рисунок 2 – Схема для регулирования и стабилизации скорости и частоты асинхронного генератора

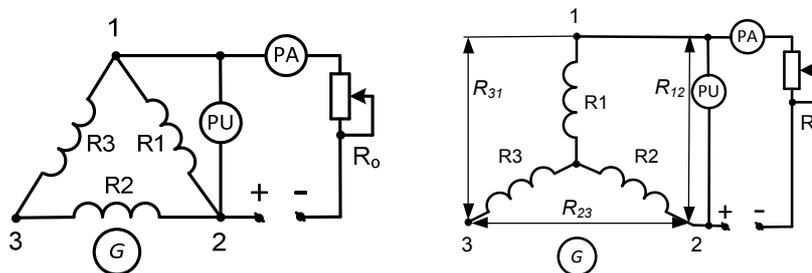


Рисунок 3 – Схема измерений сопротивлений обмоток методом вольтметра и амперметра при соединении обмоток Δ и Y

Схема запитана от разделительного трансформатора с линейным напряжением 230 В. На выходе управляемого выпрямителя *VS1 - VS6* дейст-

вующее напряжение регулируется от 0 до 300 В, что позволяет регулировать частоту вращения АГ с диапазоном $D = 750$.

Измерение сопротивления обмоток постоянному току производится с помощью омметра или моста постоянного тока, предназначенных для измерения малых сопротивлений, а при их отсутствии – методом амперметра – вольтметра (рисунок 3).

При соединении фаз в звезду без вывода нулевого провода сопротивление фаз R_1, R_2, R_3 , определяется по формулам:

$$R_1 = \frac{R_{31} + R_{12} - R_{23}}{2}; R_2 = \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2}; R_3 = \frac{R_{23} + R_{31} - R_{12}}{2}, \quad (1)$$

где R_{31}, R_{12} и R_{23} – сопротивления, измеренные соответственно между выводами 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1, Ом.

Для повышения энергетических показателей и формирования различных внешних характеристик разработаны специальные обмотки асинхронных генераторов [14,15,16]. Эти обмотки имеют сложные схемы соединения: $\Delta/Y, \Delta-Y, \Delta-\Delta, Y-Y$ и другие. При соединении фаз в треугольник эти сопротивления определяются по аналогичным формулам с круговой перестановкой соответствующих индексов:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{2 \cdot R_{23} \cdot R_{31}}{R_{23} + R_{31} - R_{12}} - \frac{R_{23} + R_{31} - R_{12}}{2}, \\ R_2 &= \frac{2 \cdot R_{31} \cdot R_{12}}{R_{31} + R_{12} - R_{23}} - \frac{R_{31} + R_{12} - R_{23}}{2}, \\ R_3 &= \frac{2 \cdot R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для АГ с такими обмотками не приемлемы известные методики измерения активной составляющей сопротивления. Рассмотрим схему АГ с четырехполюсной двухслойной обмоткой (рисунок 4) с шириной фазной зоны 120° и диаметральной шаг ($\kappa_{об} = 0,637$) на базе асинхронного двигателя **4A100S4** с длиной статора $l=110$ мм. Расчетное соотношение ЭДС на выводах возбуждения и нагрузки $E_\phi/E_n = 220/220$ В.

По исходной схеме расположения выводов (рисунок 4) измерялась активная составляющая сопротивления частей фазной обмотки при разомкнутых частях обмотки и температуре 20 °С. Между выводами 1Н - Н1, 3Н - Н2, 5Н - Н3 (расчетное значения $R_1 = 2,27$ Ом) и между выводами Н1 - 2К, Н2 - 4К, Н3 - 6К (расчетное значение $R_2 = 1,32$ Ом). При испытаниях точки соединения выводов В1, В2, В3 – разомкнуты. Измерение сопротивления выполнено прибором ИС-10 с трехкратной повторностью.

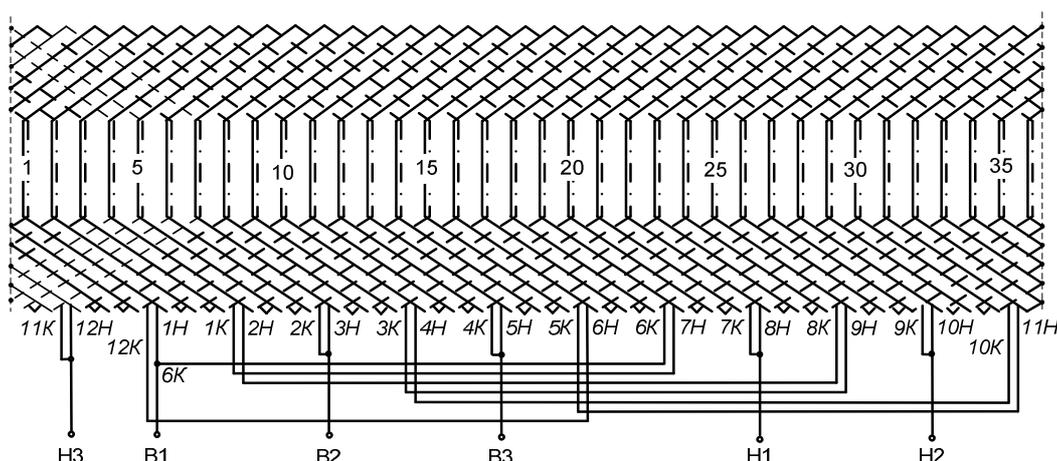


Рисунок 4 – Базовая схема новой обмотки АГ с возможностью выполнять коммутацию катушечных групп в выведенных на клеммную колодку точках

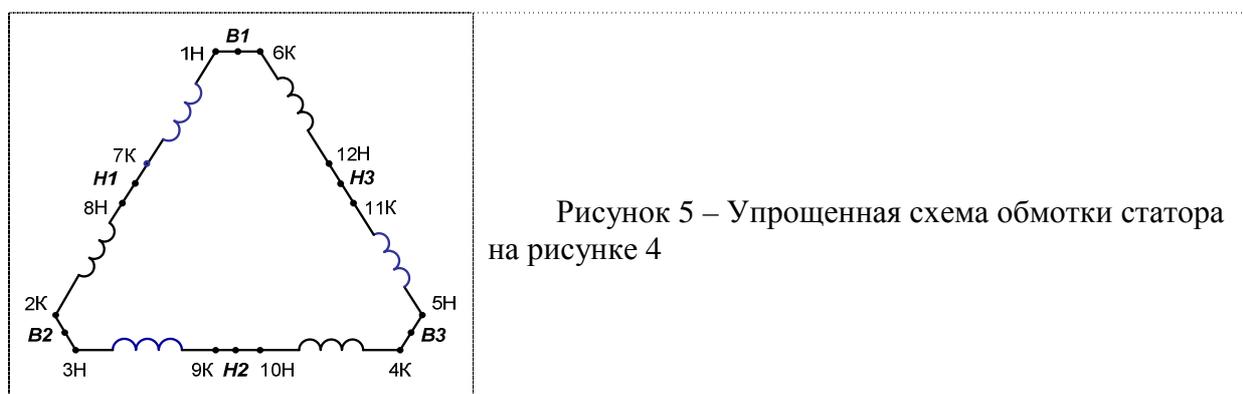


Рисунок 5 – Упрощенная схема обмотки статора на рисунке 4

Приведенное сопротивление частей обмотки Н1 - 2К, Н2 - 4К, Н3 - 6К к рабочей температуре дает следующие результаты

$$R_{1(90^{\circ}C)} = R_{1(20^{\circ}C)} \frac{235 + 90}{235 + 20} = 1,04 \frac{325}{255} = 1,33 \text{ Ом},$$

что совпадает с расчетным значением - 1,32 Ом.

Приведенное сопротивление частей обмотки 1Н - Н1, 3Н - Н2, 5Н - Н3 к рабочей температуре дает следующие результаты

$$R_{2(90^{\circ}C)} = R_{2(20^{\circ}C)} \frac{235 + 95}{235 + 20} = 1,8 \frac{325}{255} = 2,29 \text{ Ом},$$

что совпадает с расчетным значением - 2,27 Ом.

Таблица 1 – Результаты замеров сопротивлений частей фазной обмотки

Выводы обмотки	<i>1Н-Н1</i>	<i>3Н-Н2</i>	<i>5Н-Н3</i>	<i>Н1-2К</i>	<i>Н2-4К</i>	<i>Н3-6К</i>
Сопротивление, Ом	1,8	1,81	1,81	1,06	1,04	1,04
	1,8	1,78	1,8	1,06	1,04	1,04
	1,81	1,78	1,81	1,06	1,05	1,04
Среднее значение, Ом	1,80	1,79	1,81	1,06	1,04	1,04

Исследован тепловой режим опытного образца при трехфазной нагрузке 2,6 кВт и получена кривая нагрева. Термограмма снята после часа работы генератора на данную нагрузку. Точкой обозначена максимальная температура 54,8 °С, постоянная времени нагрева составляет 22 минут (рисунок б). Сопротивления на выводах *Н1 - 2К*, *Н2 - 4К*, *Н3 - 6К* при данной температуре составляет 1,17 Ом и на выводах *1Н - Н1*, *3Н - Н2*, *5Н - Н3* составляет 2,1 Ом, что также совпадает с расчетными значениями.

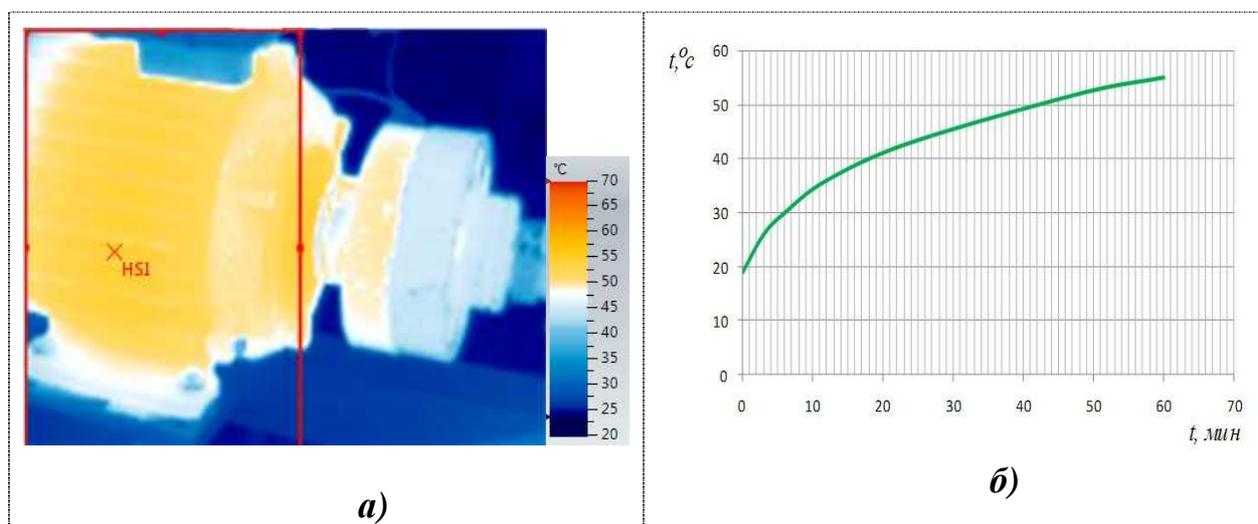


Рисунок 6 – Термограмма, *а)* и кривая нагрева, *б)* асинхронного генератора с кольцевой обмоткой

Под коэффициентом полезного действия (КПД) электрической машины понимается отношение отдаваемой активной мощности P_2 к подво-

димой активной мощности, P_1 выражаемое обычно в процентах, т.е. изменение мощности, подводимой к асинхронному генератору и отдаваемой им

$$\eta = 100 \frac{P_2}{P_1}. \quad (3)$$

Опытным путем КПД возможно определить, как отношение отдаваемой электрической мощности, к подведенной механической мощности. Для асинхронного генератора мощностью P_2 - является отдаваемая им электрическая мощность, а мощностью P_1 - подводимая к нему механическая мощность от двигателя постоянного тока. Для приводного двигателя отдаваемая механическая мощность $P_{2ДПТ}$ определяется, как потребляемая мощность из сети $P_{1эл}$ за исключением потерь $\Sigma P_{ДПТ}$

$$P_{2ДПТ} = P_{1эл} - \Sigma P_{ДПТ} = P_{1эл} \eta_{ДПТ}. \quad (4)$$

Из эксперимента при трехфазной нагрузке 2,5 кВт, потребляемая мощность приводного двигателя составляет 3,54 кВт, $P_{2ДПТ} = 3,54 \cdot 0,84 = 2,97$ кВт, тогда КПД генератора

$$\eta_{АГ} = 100 \frac{2,5}{2,97} = 0,841.$$

С другой стороны можно рассчитать КПД исходя из отношения [5]

$$\eta_{АГ} = 100 \frac{P_{1э} - \Sigma P_1}{P_{1э}}. \quad (5)$$

Испытания по определению потерь и КПД проводятся при температуре окружающей среды от 10 до 30°C.

Определение тока и потерь холостого хода проводится в режиме ненагруженного двигателя при установившемся тепловом состоянии частей испытуемого двигателя (в частности, подшипниковых узлов) [5].

Опыт холостого хода выполняется постепенным понижением приложенного к статору напряжения, начиная с наибольшего значения, равно-

го 130 % от номинального, и заканчивая возможно более низким, при котором еще не наблюдается возрастание тока статора.

Непосредственно после опыта холостого хода измеряется сопротивление обмотки статора между двумя линейными выводами. По данным опыта определяется коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{л0} \cdot I_{л0}} = \frac{324}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 3,9} = 0,218, \quad (6)$$

где $U_{л0}$ - линейное напряжение холостого хода, В;

$I_{л0}$ - линейный ток холостого хода, А;

P_0 - потери холостого хода, кВт.

Испытание АГ в режиме АД производилось с целью проверки разработанной обмотки, определения потерь холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) выполнено по схеме (рисунок 7) путем подключения питания к выводам $B1$, $B2$, $B3$ и к выводам $H1$, $H2$, $H3$. Снижение напряжения осуществляется по двум вариантам: быстро (соизмеримо со временем самоторможения АД) и медленно по точкам с выдержкой времени.

Включение машины в режиме АД в сеть 220 В осуществлялось через автотрансформатор АТМН-32 с пределом регулирования вторичного напряжения 0 - 240 В. Измерение электрических параметров питания производилось анализатором качества электроэнергии Ресурс-UF2М-3Т52-5-100-1000. Характеристики ХХ приведены на рисунке 8.

Ток холостого хода составляет 5,36 А и активная мощность холостого хода машины – 136 Вт в режиме двигателя (расчетное значение линейного тока холостого хода 5,3 А при номинальном линейном напряжении сети 220 В). Напряжение между выводами $B1$ и $H1$ составляет 133,2 В. Напряжение расчетное равно $224/1,73 \text{ В} = 129,47 \text{ В}$ [3].

Характеристики короткого замыкания представлены на рисунке 9. Опыт короткого замыкания выполнялся при заторможенном роторе. К об-

мотке статора двигателя подводили симметричное напряжение номинальной частоты. В процессе опыта одновременно измеряли линейные напряжения, линейные токи, подводимую мощность. Непосредственно после отключения измеряли сопротивление частей обмотки статора.

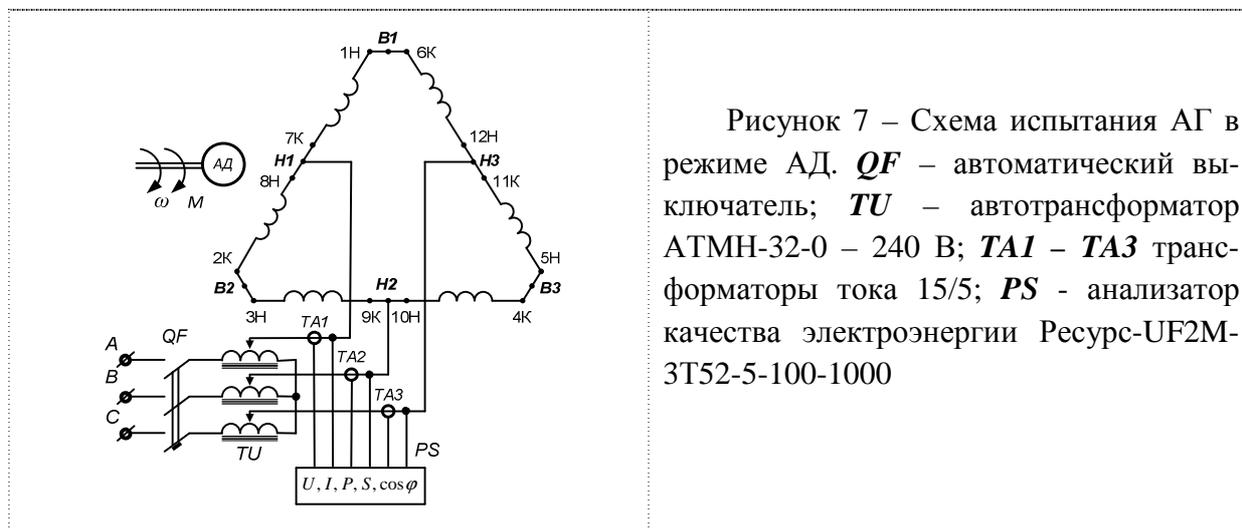


Рисунок 7 – Схема испытания АГ в режиме АД. *QF* – автоматический выключатель; *TU* – автотрансформатор АТМН-32-0 – 240 В; *TA1* – *TA3* трансформаторы тока 15/5; *PS* – анализатор качества электроэнергии Ресурс-UF2М-3Т52-5-100-1000

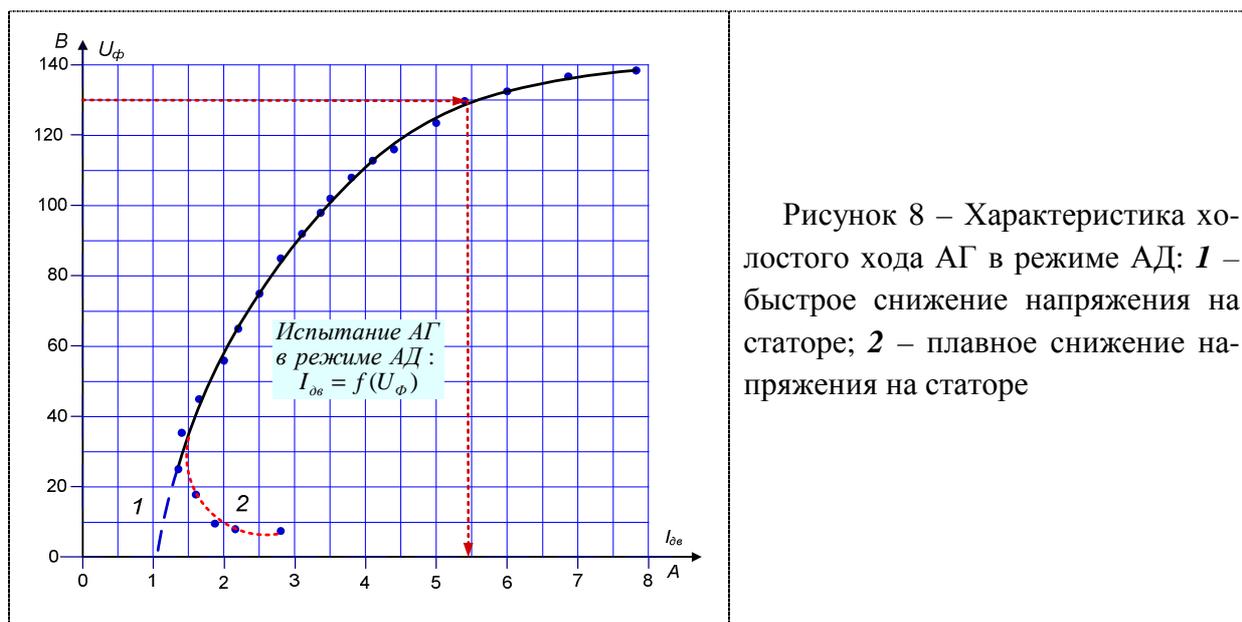


Рисунок 8 – Характеристика холостого хода АГ в режиме АД: *1* – быстрое снижение напряжения на статоре; *2* – плавное снижение напряжения на статоре

Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_k I_k}, \quad (7)$$

где U_k – линейное напряжение короткого замыкания, В;

I_k – линейный ток короткого замыкания, А;

P_k – подводимая мощность короткого замыкания, кВт.

Результаты опыта представлены в виде зависимостей тока I_k , потерь P_k и коэффициента мощности $\cos \varphi_k$ от напряжения U_k (рисунок 9).

Потери в обмотке статора $P_{\text{эл1кз}}$ в кВт, при опыте короткого замыкания определяют по формуле

$$P_{\text{эл1кз}} = 1,5 I_{\text{л0}}^2 R_{1\text{oc}} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

где $R_{1\text{oc}}$ – сопротивление обмотки статора, Ом, при постоянном токе, измеренное между линейными выводами непосредственно после снятия точки короткого замыкания при наибольшем токе.

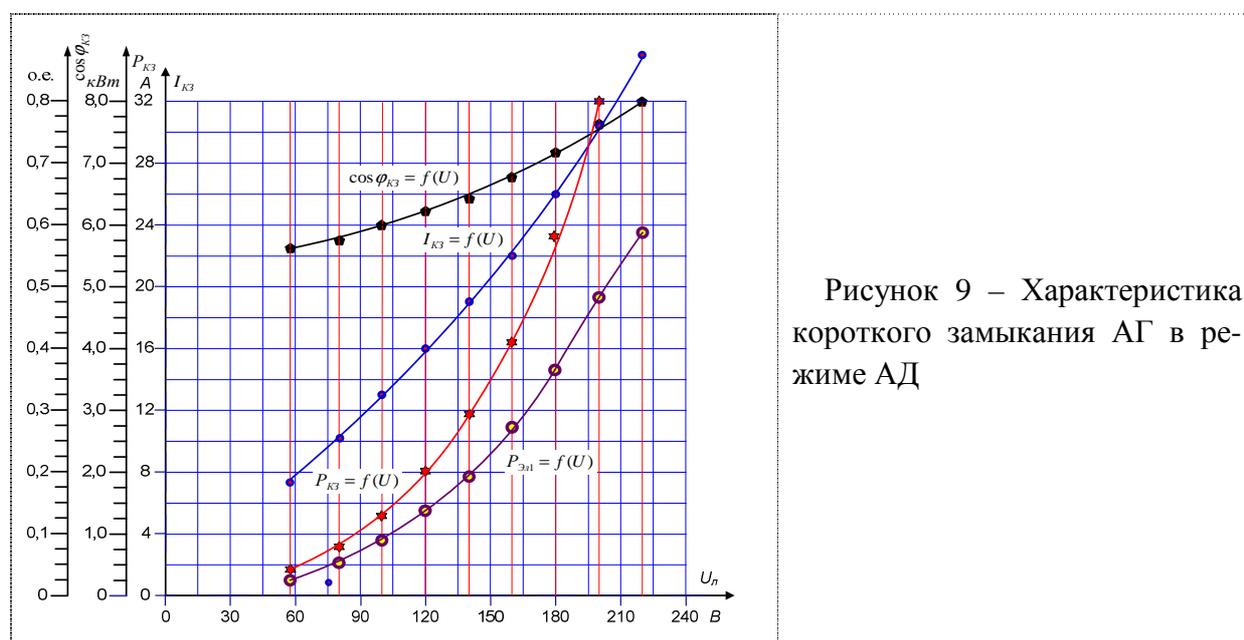


Рисунок 9 – Характеристика короткого замыкания АГ в режиме АД

Потери холостого хода необходимо разделить на потери в обмотке статора $P_{\text{эл1}}$, сумму потерь в стали P_c и механических P_m . Потери в обмотке статора $P_{\text{эл1}}$ в кВт определяют по формуле

$$P_{\text{эл1}} = 1,5 I_{\text{л0}}^2 R_{1\text{oc}} \cdot 10^{-3},$$

где $R_{1\text{oc}}$ - сопротивление обмотки статора, Ом, между двумя линейными выводами, измеренное в конце опыта.

При соединении обмоток статора в звезду $P_{\text{эл1}} = 3 I_{\text{ф0}}^2 R_{\text{ф}} \cdot 10^{-3}, \quad (9)$

где $I_{\text{ф0}}, R_{\text{ф}}$ - ток фазы холостого хода и сопротивление обмотки фазы.

Разделение суммы потерь в стали и механических на отдельные составляющие производят по зависимости этой суммы от квадрата приложенного напряжения. Величину механических потерь определяют путем экстраполяции нижней части характеристики ХХ на нулевое значение напряжения.

Ток намагничивания I_μ из тока холостого хода определяется как

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0. \quad (10)$$

Учитываются следующие потери: механические потери P_m – потери на трение всех видов во вращающейся машине; потери в стали P_c – потери на гистерезис и вихревые токи при перемагничивании сердечника и $P_{доб}$ – добавочные потери холостого хода будут практически такие же, как в серийном двигателе **4A100S4**, взятый за базовый. Механические потери P_m и P_c определяются из опыта холостого хода. Из графика на рисунке 10 они равны соответственно 16 Вт и 117 Вт. Добавочные потери принимают $P_{доб} = 0,005 \cdot P_1 = 15,8$ Вт.

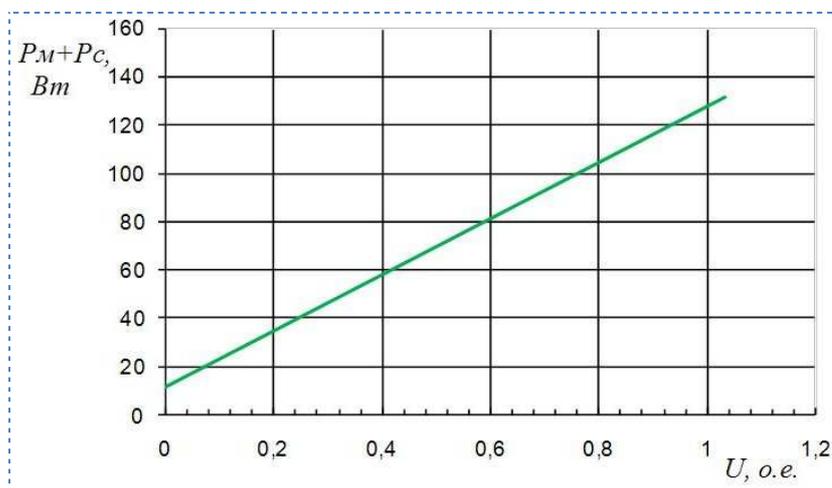


Рисунок 10 – Определение механических потерь и потерь в стали

Основные потери в цепях обмоток статора $P_{эл1}$ – потери I^2R . Эти потери вычисляются по току и сопротивлению обмоток, измеренному при постоянном токе и приведенному к расчетной рабочей температуре и спе-

циальными методами в обмотке короткозамкнутого ротора асинхронного генератора по методике [9] и составляют в номинальном режиме 316 Вт.

Потери в роторной обмотке определяются из формулы

$$P_{\text{э.р.2}} = (P_1 - P_{\text{э.р.1}} - P_c) s = (3000 - 316 - 117) \cdot 0,04 = 103 \text{ Вт.} \quad (11)$$

Если требуется вычислить дополнительные потери при режимах работы, отличных от номинального, то при отсутствии других указаний они должны быть пересчитаны пропорционально квадрату тока нагрузки [5,9].

Исследование асинхронного генератора в режиме конденсаторного возбуждения проводится при постоянной и переменной частоте вращения. Схема испытания приведена на рисунке 11.

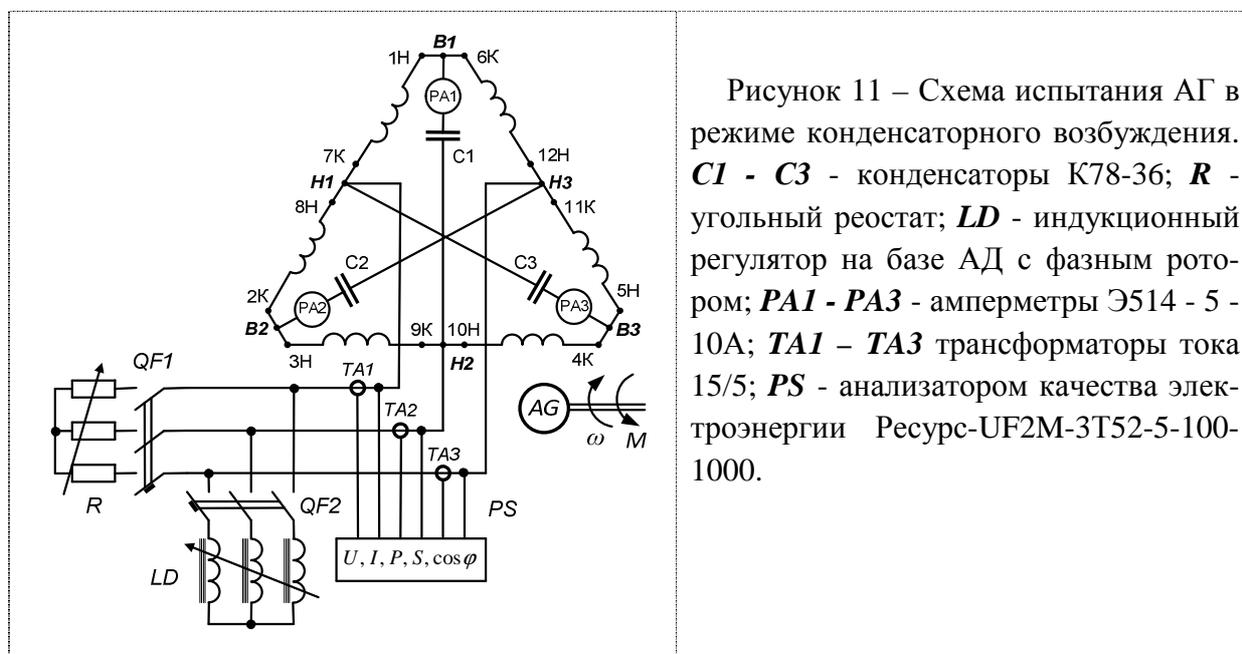


Рисунок 11 – Схема испытания АГ в режиме конденсаторного возбуждения. **C1 - C3** - конденсаторы К78-36; **R** - угольный реостат; **LD** - индукционный регулятор на базе АД с фазным ротором; **PA1 - PA3** - амперметры Э514 - 5 - 10А; **TA1 - TA3** трансформаторы тока 15/5; **PS** - анализатором качества электроэнергии Ресурс-UF2М-3Т52-5-100-1000.

При перекрестном включении емкостей на выводы **B1-H2**, **B2-H3**, **H1-B3** АГ, после самовозбуждения, замерялось напряжение на выводах **H1**, **H2**, **H3** - 283,6 В при 60 мкФ, далее снижалась величина емкости. Токи в частях обмотки **B1-H2**, **B1-H3**, **B1-H1** и напряжение на выводах **H1**, **H2**, **H3** записывались анализатором качества электроэнергии Ресурс-UF2М-3Т52-5-100-1000. В режиме XX нагрузка **R** и **LD** отключена автоматическими выключателями **QF1** и **QF2**.

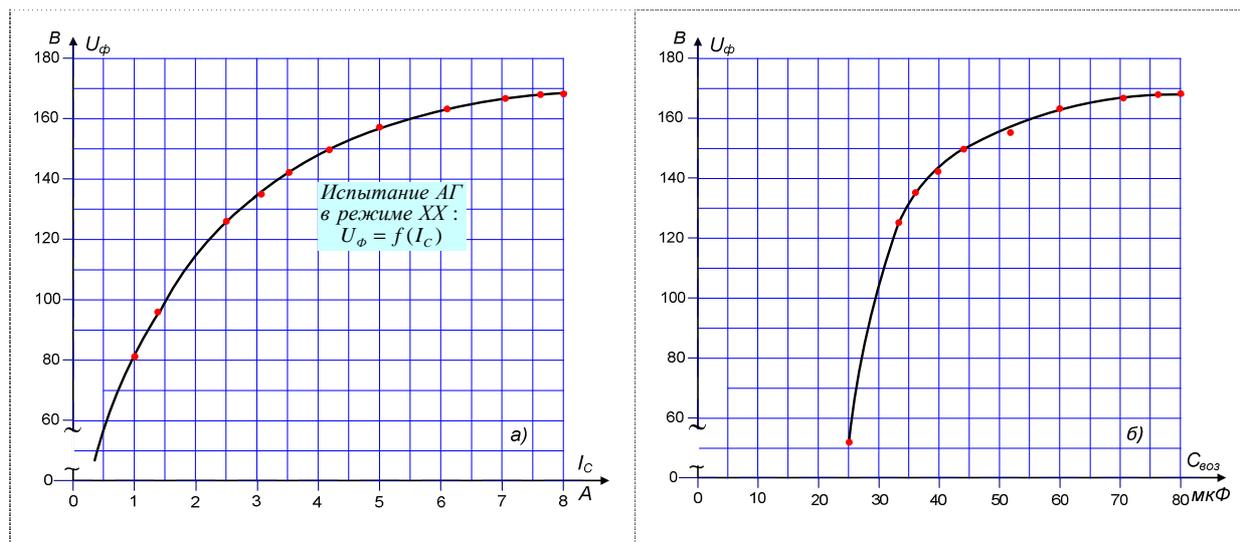


Рисунок 12 – Кривая намагничивания АГ при емкостном возбуждении: **а** - зависимость напряжения от тока конденсаторов; **б** - зависимость напряжения от емкости конденсаторов возбуждения

Характеристики намагничивания показывают, что асинхронный генератор работает в ненасыщенном режиме, необходимая емкость конденсаторов - 38 – 40 мкФ.

Проверена работоспособность АГ при переменной частоте вращения приводного двигателя от 1020 до 1610 мин⁻¹ и постоянной емкости возбуждения - 60 мкФ. Результаты (рисунок 13) показывают, что при изменении частоты тока в 1,6 раза от 54 до 33 Гц генератор устойчиво держит возбуждение.

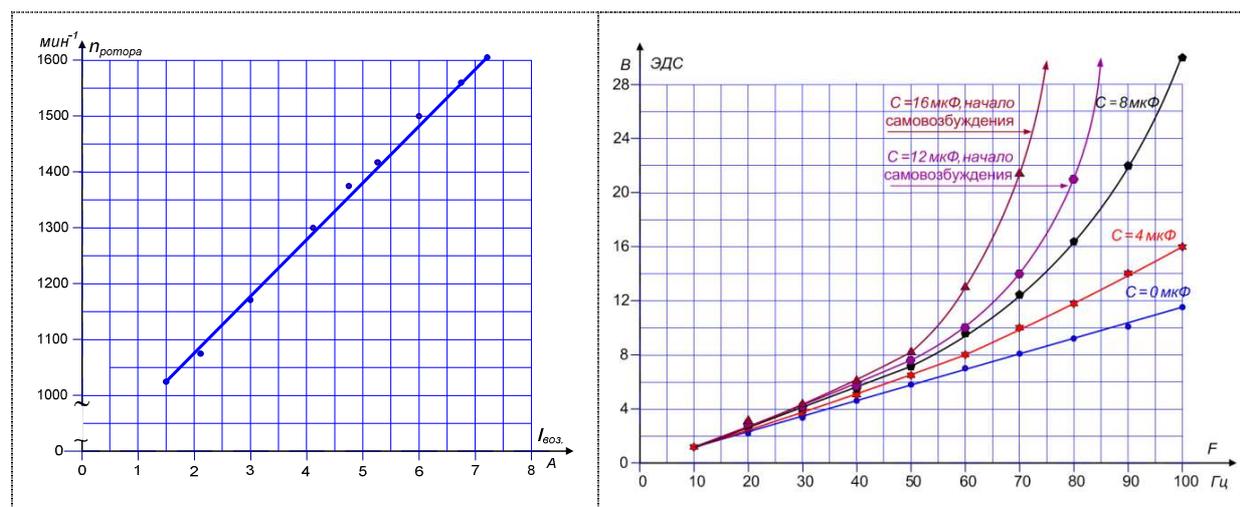


Рисунок 13 – Регулировочная характеристика АГ при изменении частоты вращения приводного двигателя и зависимость ЭДС обмотки статора от частоты тока

Исследование остаточной ЭДС показывает момент начала самовозбуждения при определенной емкости конденсаторов в зависимости от частоты тока.

Для исследования АГ при подключении нагрузки при перекрестном включении емкостей на выводы $B1-H2$, $B2-H3$, $H1-B3$ генератора, после возбуждения, на выводы $H1$, $H2$, $H3$ подключалась трехфазная регулируемая активная нагрузка - угольный реостат, и однофазная нагрузка – реостат. Токи в ветвях $B1-H2$, $B1-H3$, $B1-H1$ и напряжение на выводах $H1 - H2 - H3$ записывались прибором Ресурс-UF2М-3Т52-5-100-1000. На нагрузке - портативным анализатором качества электроэнергии CIRCUTOR AR-5 (класс точности по напряжению - 0,5% от показаний, току - 0,5% от показаний 2 цифры, активная мощность - 1,0% от показаний, реактивная мощность - 1,0% от показаний). По результатам исследования построены внешние и нагрузочные характеристики на рисунке 14.

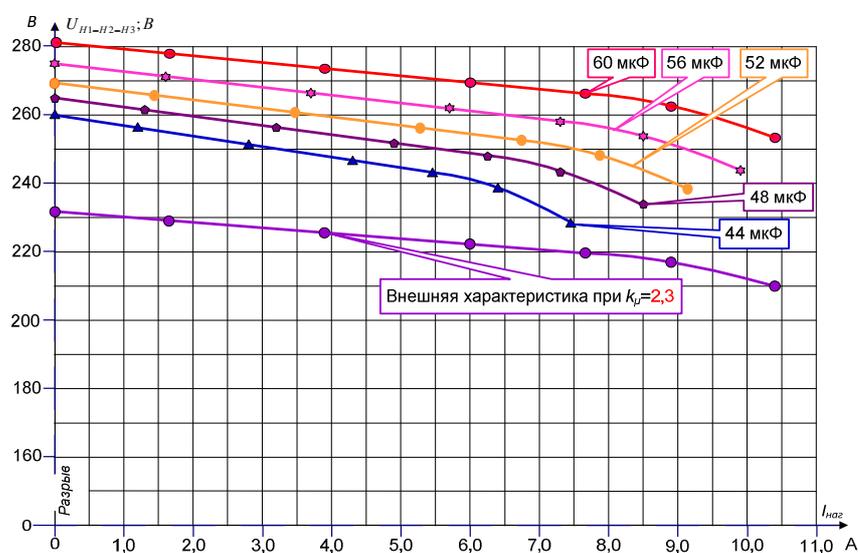


Рисунок 14 – Внешние характеристики АГ при фиксированных емкостях возбуждения

Внешние характеристики показывают, что при номинальной трехфазной нагрузке 6,8 А необходимая емкость возбуждения составляет 44 мкФ, что практически соответствует расчетному значению 45 мкФ.

Для определения выводов оптимального подключения однофазной нагрузки были проведены опыты включения нагрузки на выводы $B1-H1$, $B1-H3$,

B1-H2 при различных подключениях конденсаторов. Эксперименты показали, что подключение на выводы *B1-H3*, *B2-H1*, *B3-H2*, то есть на части обмоток с меньшим сопротивлением 1,06 Ом, является наиболее приемлемыми, так как в этом случае электрические потери будут меньше, и в этих частях обмотки будут протекать большие токи.

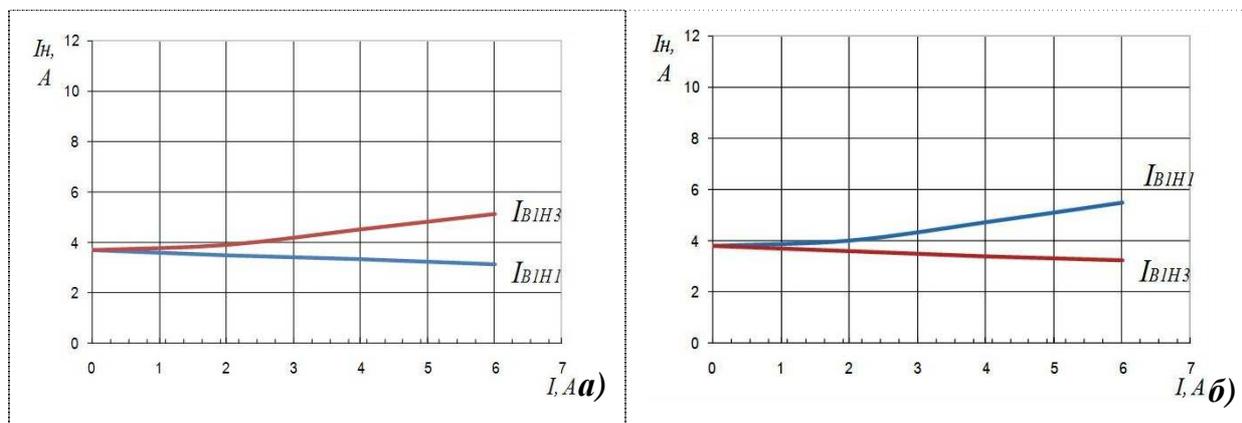


Рисунок 15 – Характер изменения токов в частях обмотки и цепи конденсаторов при включении трехфазной нагрузки на выводы *B1-B2-B3*, *a)* и *H1-H2-H3*, *б)*; емкость возбуждения 40 мкФ

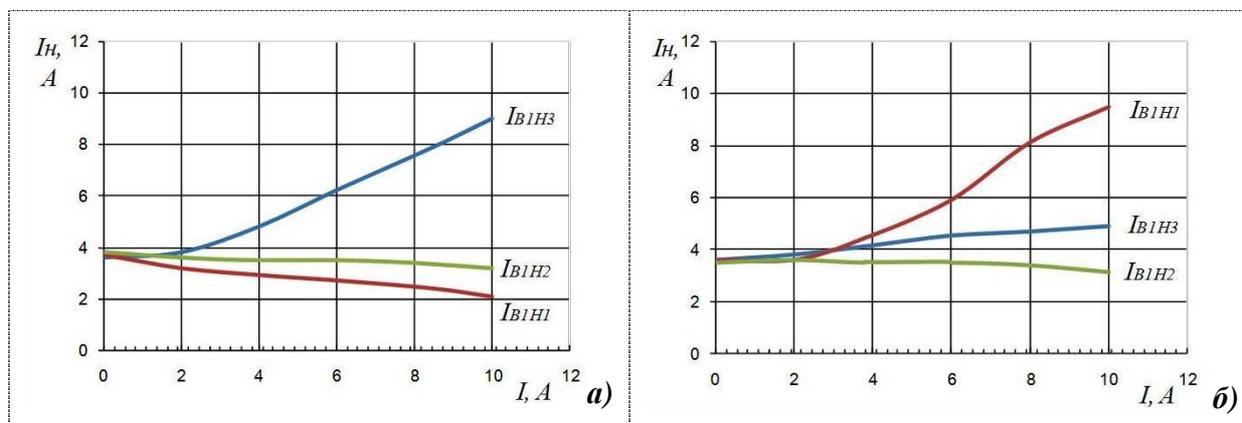


Рисунок 16 – Характер изменения токов в частях обмотки и цепи конденсаторов при включении нагрузки на выводы *B1-H3*, *a)* и *B1-H1*, *б)*, емкость возбуждения 40 мкФ

Мобильные электрические технологические установки и оборудование требуют качественную электроэнергию [4, 7]. Отклонение от предельно допустимых показателей качества электроэнергии (ПКЭ) может привести к аварийным режимам, снижению эксплуатационных характеристик оборудования. Поэтому АГ нами исследованы на ПКЭ.

Показатели качества электрической энергии записывались анализатором качества электроэнергии Ресурс-UF2М-3Т52-5-100-1000. Анализируются: коэффициент несинусоидальности, отклонение напряжения, отклонение частоты, коэффициент несимметрии напряжения, гармонический состав (рисунок 17 - 19).

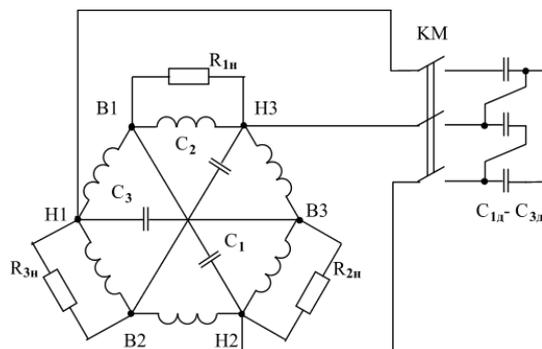


Рисунок 17 – Схема подключения нагрузки на выводы напряжением 220 В

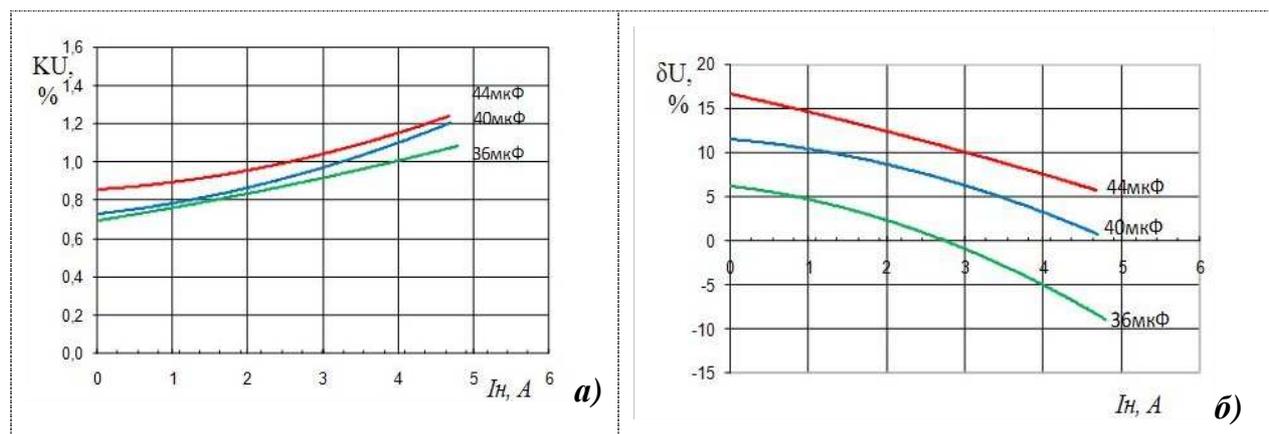


Рисунок 18 – Зависимость коэффициента несинусоидальности, *а)* и отклонения напряжения, *б)* от тока нагрузки на выводах *B1-B2-B3*, емкость возбуждения 36, 40 и 44 мкФ

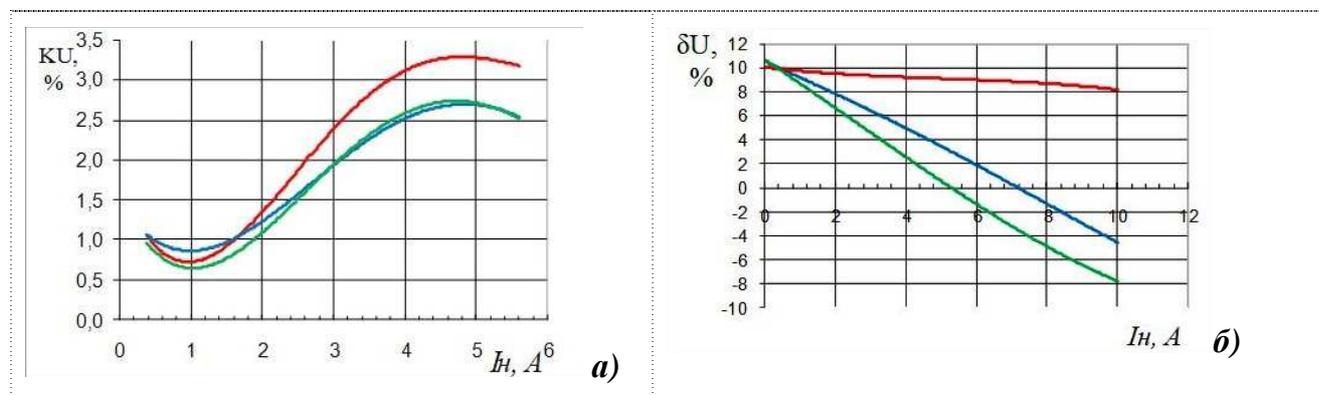


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента несинусоидальности, *а)* и отклонения напряжения, *б)* на выводах *B1-B2-B3* от тока нагрузки на выводах *B1-H3*, емкость возбуждения 36 мкФ

Для того чтобы оценить стабилизирующие свойства асинхронного генератора с шестью фазными зонами проведен сравнительный эксперимент. К АГ подключалась однофазная нагрузка со схемами серийной обмотки звездой, автотрансформаторной звездой и с «кольцевой» обмоткой. Эксперимент показал, что при подключении однофазной электроплиты - 1,1 кВт отклонение напряжение от номинального соответственно составило: -19,8 %, -10,8 % и -7,9 %. (рисунок 20) или стабилизация напряжения однофазной нагрузки асинхронного генератора с «кольцевой» обмоткой выше на 2,9 % чем с соединенной звездой автотрансформаторной обмоткой и на 11,9 % соединенной серийной обмотки.

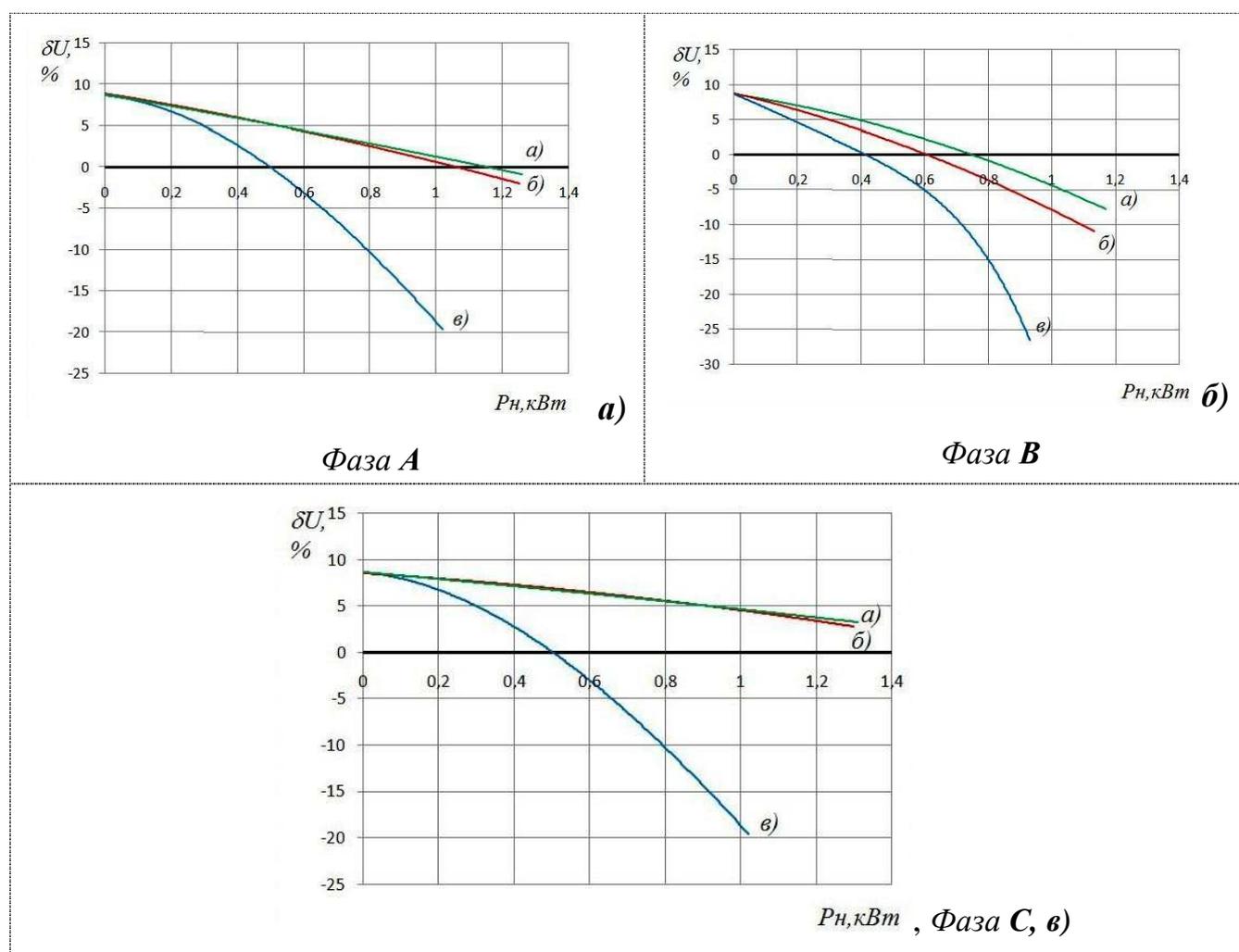


Рисунок 20 – Зависимость коэффициента отклонения напряжения от подключаемой однофазной нагрузки на фазе *B* с шестизонной обмоткой, *a*); соединением автотрансформаторной обмотки звездой, *б*); соединением серийной обмотки звездой, *в*); емкость возбуждения соответственно 38, 16 и 16 мкФ

Выводы. Таким образом, при проведении по данной методике испытания асинхронного генератора с шестью фазными зонами определяются основные характеристики для оценки стабилизирующих свойств, при подключении нагрузки и емкостей на различные выводы, КПД электрической машины, а также необходимые данные для дальнейшего расчета параметров Т-образной схемы замещения.

Список литературы

1. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер, П.П. Екименко П.П. // Научный журнал КубГАУ. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - №05(59). - Шифр Информрегистра: 04201000012/0095. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/05/26/p26.asp>.
2. Асинхронные генераторы для систем автономного электроснабжения. Часть 2. Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчета обмоток / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, А.С. Креймер, П.П. Екименко П.П. // Научный журнал КубГАУ. - Краснодар: КубГАУ, 2010. - №06(60). - Шифр Информрегистра: 04201000012/0116. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/31/p31.asp>.
3. Асинхронные генераторы с «кольцевыми» обмотками статора / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, Н.С. Баракин, А.О. Хицкова // Проблемы механизации и электрификации сельского хозяйства: Материалы Всерос. науч.- практ. конф. - Краснодар, КубГАУ, 2014. – С. 219 – 223.
4. Богатырев Н.И. Асинхронные генераторы для питания сварочной дуги / Н.И. Богатырев, А.С. Креймер, Н.С. Баракин // Научный журнал КубГАУ. - Краснодар: КубГАУ, 2011. - №73(09). - Шифр Информрегистра: 0421100012\0360. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/52./p28.asp>.
5. 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).
6. 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.
7. 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).
8. Богатырев Н.И. Электрические машины переменного тока: моногр. / Н.И. Богатырев, В.Н. Ванурин, К.А.-А. Джанибеков: – Краснодар, 2011. – 224 с.: ил.
9. Исследование асинхронного генератора / Ванурин В.Н., Богатырев Н.И., Баракин Н.С., Семернин Д.Ю. // Техника в сельском хозяйстве. М.: - 2012, - №5, – С. 29-31.

10. Патент 2136013, МПК G 01 R 31/34 Электрifiцированный стенд для исследования асинхронных и синхронных генераторов / Н.И. Богатырев, Е.А. Зайцев, О.В. Вронский и др. (РФ); заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 97105355/09; Заявл. 03.04.97; Оpubл. 27.08.99; Бюл. № 24 – 8 с.: ил.

11. Патент 2281524, МПК G01R 31/34. Электрifiцированный стенд для исследования электрических машин / Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Григораш О.В., Креймер А.С. и др.; заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет - № 2002123027; Заявл. 27.08.2002; Оpubл. 10.08.2006, Бюл. № 22. – 7 с.

12. Патент 2248082, МПК H 02 K 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Оськин С.В. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126793/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.03.05; Бюл. № 7. – 12 с.: ил.

13. Патент 2248083, МПК H 02 K 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Григораш О.В. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126833/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.03.05; Бюл. № 7. – 12 с.: ил.

14. Патент 2249289, МПК H 02 K 17/14 Статорная комбинированная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Вронский О.В. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126788/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 27.03.05; Бюл. № 9. – 6 с.: ил.

15. Патент 2249290, МПК H 02 K 17/14 Статорная комбинированная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Григораш О.В., Оськина Г.М. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126834/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 27.03.05; Бюл. № 9. – 6 с.: ил.

16. Патент 2249292, МПК H 02 K 17/14 Статорная комбинированная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Курзин Н.Н. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126836/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 27.03.05; Бюл. № 9. – 6 с.: ил.

17. Патент 2249900, МПК H 02 K 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Султанов Г.А. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126791/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 4 с.: ил.

18. Патент 2249901, МПК H 02 K 17/14 Статорная комбинированная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Вронский О.В., Креймер А.С., Оськина А.С. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126792/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 6 с.: ил.

19. Патент 2249902, МПК H 02 K 17/14 Статорная многофункциональная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Вронский О.В., Григораш О.В. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126794/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 5 с.: ил.

20. Патент 2249903, МПК H 02 K 17/14 Статорная обмотка двухчастотного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Темников В.Н. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2003126832/11; Заявл. 01.09.03; Оpubл. 10.04.05; Бюл. № 10. – 4 с.: ил.

21. Патент 2263386, МПК H 02 K 17/14 Однослойная статорная обмотка двухполюсного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Григораш С.О. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2004108757/09; Заявл. 24.03.04; Оpubл. 27.10.05; Бюл. № 30. – 4 с.: ил.

22. Патент 2316104, МПК H02K 17/14 Двухслойная статорная обмотка двухполюсной асинхронной машины / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Темников В.Н. и

др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2006124283/09 (026335); Заявл. 06.07.06; Оpubл. 27.01.08; Бюл. № 3. – 6 с.: ил.

23. Патент 2475927, МПК H02K 17/14 Двухполюсная статорная обмотка асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Ванурин В.Н., Баракин Н.С. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2010131644/07; Заявл. 27.07.10; Оpubл. 20.02.2013; Бюл. № 5. – 7 с.: ил.

24. Патент 2457612 МПК H02P9/46 Устройство для регулирования и стабилизации напряжения многофункционального автономного асинхронного генератора / Богатырев Н.И., Баракин Н.С., Попов А.Ю. и др. (РФ) заявитель и патентообладатель Кубанский госагроуниверситет. – № 2011110023/07; Заявл. 16.03.2011; Оpubл. 27.07.2012; Бюл. № 21. – 7 с.

25. Статорные обмотки с фазной зоной 120° асинхронных электрических машин: моногр. / В.Н. Ванурин, Н.И. Богатырев, К.А.-А. Джанибеков, К.Б. Пономаренко: – Зерноград, 2011. – 84 с.: ил.

References

1. Asinhronnye generatory dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Chast' 1. Obosnovanie parametrov asinhronnogo generatora / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, A.S. Krejmer, P.P. Ekimenko P.P. // Nauchnyj zhurnal KubGAU. - Krasnodar: Kub-GAU, 2010. - №05(59). - Shifr Informregistra: 04201000012/0095. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2010/05/26/p26.asp>.

2. Asinhronnye generatory dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Chast' 2. Bazo-vaja teorija formirovanija statornyh obmotok asinhronnyh generatorov i metody rascheta obmotok / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, A.S. Krejmer, P.P. Ekimenko P.P. // Nauchnyj zhurnal KubGAU. - Krasnodar: KubGAU, 2010. - №06(60). - Shifr Informregistra: 04201000012/0116. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2010/06/31/p31.asp>.

3. Asinhronnye generatory s «kol'cevymi» obmotkami statora / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, N.S. Barakin, A.O. Hickova // Problemy mehanizacii i jelektrifikacii sel'skogo hozjajstva: Materialy Vseros. nauch.- prakt. konf. - Krasnodar, KubGAU, 2014. – S. 219 – 223.

4. Bogatyrev N.I. Asinhronnye generatory dlja pitanija svarochnoj dugi / N.I. Bogatyrev, A.S. Krejmer, N.S. Barakin // Nauchnyj zhurnal KubGAU. - Krasnodar: KubGAU, 2011. - №73(09). - Shifr Informregistra: 0421100012\0360. - Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2011/09/pdf/52./p28.asp>.

5. Bogatyrev N.I. Metodika rascheta i rezul'taty laboratornyh ispytanij asinhronnogo generatora s modulirovannoj obmotkoj statora / N.I. Bogatyrev, O.V. Vronskij, N.S. Barakin i dr. – (Tr. / Kub. GAU; Vyp. № 3(24). – Krasnodar, 2010. – S. 164 – 168).

6. Bogatyrev N.I. Parametry i harakteristiki jelektricheskikh mashin peremennogo toka: monogr. / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, P.P. Ekimenko: - Krasnodar, 2011 - 256 s.: il.

7. Bogatyrev N.I. Strukturnyj analiz sel'skohozjajstvennyh jelektrotehnologicheskikh ustanovok i vybor istochnikov dlja ih avtonomnogo jelektropitanija. / N.I. Bogatyrev, N.S. Barakin, A.V. Vronskij i dr.– (Tr. / Kub. GAU; Vyp. № 6(21). – Krasnodar, 2009. – S. 225 – 232).

8. Bogatyrev N.I. Jelektricheskie mashiny peremennogo toka: monogr. / N.I. Bogatyrev, V.N. Vanurin, K.A.-A. Dzhanibekov: – Krasnodar, 2011. – 224 s.: il.

9. Issledovanie asinhronnogo generatora / Vanurin V.N., Bogatyrev N.I., Barakin N.S., Semernin D.Ju. // Tehnika v sel'skom hozjajstve. M.: - 2012, - №5, – S. 29-31.

10. Patent 2136013, MPK G 01 R 31/34 Jelektrificirovannyj stend dlja issledo-

vanija asinhronnyh i sinhronnyh generatorov / N.I. Bogatyrev, E.A. Zajcev, O.V. Vronskij i dr. (RF); zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniver-sitet. – № 97105355/09; Zajavl. 03.04.97; Opubl. 27.08.99; Bjul. № 24 – 8 c.: il.

11. Patent 2281524, MPK G01R 31/34. Jelektrificirovannyj stend dlja issledovanija jelektricheskikh mashin / Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Grigorash O.V., Krejmer A.S. i dr.; zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet - № 2002123027; Zajavl. 27.08.2002; Opubl. 10.08.2006, Bjul. № 22. – 7 s.

12. Patent 2248082, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Os'kin S.V. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126793/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.03.05; Bjul. № 7. – 12 c.: il.

13. Patent 2248083, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Grigorash O.V. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126833/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.03.05; Bjul. № 7. – 12 c.: il.

14. Patent 2249289, MPK H 02 K 17/14 Statornaja kombinirovannaja obmotka asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Vronskij O.V. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126788/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 27.03.05; Bjul. № 9. – 6 c.: il.

15. Patent 2249290, MPK H 02 K 17/14 Statornaja kombinirovannaja obmotka asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Grigorash O.V., Os'kina G.M. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126834/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 27.03.05; Bjul. № 9. – 6 c.: il.

16. Patent 2249292, MPK H 02 K 17/14 Statornaja kombinirovannaja obmotka asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Kurzin N.N. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126836/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 27.03.05; Bjul. № 9. – 6 c.: il.

17. Patent 2249900, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Sultanov G.A. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126791/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 4 c.: il.

18. Patent 2249901, MPK H 02 K 17/14 Statornaja kombinirovannaja obmotka asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Vronskij O.V., Krejmer A.S., Os'kina A.S. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniver-sitet. – № 2003126792/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 6 c.: il.

19. Patent 2249902, MPK H 02 K 17/14 Statornaja mnogofunkcional'naja obmotka asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Vronskij O.V., Grigorash O.V. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126794/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 5 c.: il.

20. Patent 2249903, MPK H 02 K 17/14 Statornaja obmotka dvuhchastotnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Temnikov V.N. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2003126832/11; Zajavl. 01.09.03; Opubl. 10.04.05; Bjul. № 10. – 4 c.: il.

21. Patent 2263386, MPK H 02 K 17/14 Odnoslojnaja statornaja obmotka dvuhpoljusnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Grigorash S.O. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2004108757/09; Zajavl. 24.03.04; Opubl. 27.10.05; Bjul. № 30. – 4 c.: il.

22. Patent 2316104, MPK N02K 17/14 Dvuhslajnaja statornaja obmotka dvuhpoljusnoj asinhronnoj mashiny / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Temnikov V.N. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2006124283/09 (026335);

Zajavl. 06.07.06; Opubl. 27.01.08; Bjul. № 3. – 6 с.: il.

23. Patent 2475927, MPK H02K 17/14 Dvuhpoljuskaja statornaja obmotka asinhron-nogo generatora / Bogatyrev N.I., Vanurin V.N., Barakin N.S. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2010131644/07; Zajavl. 27.07.10; Opubl. 20.02.2013; Bjul. № 5. – 7 с.: il.

24. Patent 2457612 MPK H02P9/46 Ustrojstvo dlja regulirovanija i stabilizacii naprjazhenija mnogofunkcional'nogo avtonomnogo asinhronnogo generatora / Bogatyrev N.I., Barakin N.S., Popov A.Ju. i dr. (RF) zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosagrouniversitet. – № 2011110023/07; Zajavl. 16.03.2011; Opubl. 27.07.2012; Bjul. № 21. – 7 с.

25. Statornye obmotki s faznoj zonoj 1200 asinhronnyh jelektricheskikh mashin: monogr. / V.N. Vanurin, N.I. Bogatyrev, K.A.-A. Džhanibekov, K.B. Ponomarenko: – Zernograd, 2011. – 84 s.: il.