

УДК 621.316.176: 62-83

Бересан А. А.,
Беляев В. Л., канд. техн. наук

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕТЕВОГО ТОКА СТАНЦИИ ИСПЫТАНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация. Определен гармонический состав тока и напряжения сети при работе испытательной станции синхронных генераторов с изменяющейся нагрузкой. Установлены интервалы времени, соответствующие возврату энергии в сеть. Методом определения спектральной плотности мощности сигналов детально рассчитаны спектры исследуемого тока и напряжения. Проверено соответствие уровней искажения синусоидальности токов и напряжения сети требованиям действующих стандартов.

Ключевые слова: испытательная станция, потребление и рекуперация энергии, искажение синусоидальности, гармонический состав токов и напряжения, спектральная плотность мощности.

Beresan A. A.,
Bilyayev V. L., PhD.

SPECTRAL ANALYSIS OF THE MAIN CURRENT OF THE PROOF-OF-COMPLIANCE TEST STATION FOR SYNCHRONOUS GENERATORS

Abstract. It is determined the harmonic composition of main supply currents and voltage of the test station for synchronous generators working with a varying load. The time intervals corresponding to the return energy to the main supply is set. Spectrum of the studied current and voltage calculated in detail with method of determining power spectral density of signals. It is checked the compliance of harmonic distortion levels of the current and voltage with requirements of the relevant standards.

Keywords: proof-of-compliance test station, energy consumption and recuperation, harmonic distortion, harmonic composition of currents and voltages, power spectral density.

Бересан О. О.,
Біляєв В. Л., канд. техн. наук

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕРЕЖЕВОГО СТРУМУ СТАНЦІ ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Анотація. Визначено гармонічний склад струму та напруги мережі під час роботи випробувальної станції синхронних генераторів зі змінним навантаженням. Встановлені інтервали часу в продовж яких енергія повертається в мережу. За методом визначення спектральної густини потужності сигналів детально розраховані спектри досліджуваних струму та напруги. Перевірено відповідність рівнів спотворення синусоїдності струмів та напруги мережі вимогам діючих стандартів.

Ключові слова: випробувальна станція, споживання та рекуперация енергії, спотворення синусоїдності, гармонічний склад струму та напруги, спектральна густина потужності.

Введение. Станция испытания синхронных генераторов (СГ) [1, 2] состоит из электромеханических и электронных преобразователей энергии, установленных в цепи потребления энергии из питающей сети (преобразователь частоты (ПЧ)), в цепи создания регулируемой нагрузки генератора и возврата (рекуперации) энергии нагрузки за вычетом потерь в питающую сеть (тиристорный преобразователь (ТП)).

На этапе предварительных испытаний станции, проведенных на предприятии – изготовителе станции, выполнены исследования по оценке энергетической эффективно-

сти [3] и электромагнитной совместимости станции с питающей сетью [4].

В процессе испытаний регистрировались токи: входной (результатирующий) ток $I_{ВХ}$, потребляемый станцией из сети, $I_{ПЧ}$ – на входе ПЧ, $I_{ТП}$ – протекающий по сетевой обмотке трансформатора, который согласует с сетью напряжение на выходе ТП, работающего в инверторном режиме. Все фиксируемые токи протекают в одной и той же фазе (условно, фазе А), дополнительно фиксировалось напряжение фазы А на входе станции $U_{а0}$. Испытания проводились при токах нагрузки $I_{Г}$ испытуемого СГ, равных 50, 100 и 150 А.

Осциллографирование выполнялось с использованием датчиков тока и напряжения

знаку напряжения сети, что свидетельствует о рекуперации энергии в сеть. Далее происходит рост тока ПЧ и значение суммарного входного тока $I_{вх}$ уменьшается до нуля при 8 мс, затем становится положительным, совпадающим по знаку с напряжением на интервалах 8-10 и 11-15 мс, что соответствует потреблению энергии из сети на данных участках. Таким образом, на приведенной осциллограмме четко видны участки потребления и рекуперации энергии.

Неравенство максимумов тока ПЧ в течение одного полупериода фазного напряжения питающей сети свидетельствует об асимметрии напряжения между фазами сети.

Материалы исследования. Процессы преобразования энергии в рассматриваемой испытательной станции естественно рассматривать как некоторый случайный процесс (СП) $X(t)$, представленный в общем случае ансамблем реализаций $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)\}$. Совокупность этих значений образует одномерное сечение случайного процесса $X(t_1)$. В виде СП $X(t)$ может быть представлен любой из параметров режима станции испытания синхронных генераторов: входной ток, ток преобразователя частоты, ток тиристорного преобразователя, напряжение. При анализе спектральных характеристик случайных процессов рассматривается каждая отдельно взятая реализация, которая представляет собой уже детерминированную функцию и к ней можно применить преобразование Фурье. Совершенно естественно, что каждой реализации будет соответствовать свой спектр. Для определения статистически усредненных характеристик случайных процессов необходимо найти среднее значение спектральной плотности СП. С этой целью рассмотрим спектральную плотность мощности (СПМ) случайного процесса, так как мощность не зависит от соотношения фаз спектральных составляющих [5, 6].

Выделим некоторую реализацию центрированного СП $x(t)$ и ограничим пределами во времени $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$.

Используя для представления энергии E_T рассматриваемого отрезка реализации СП равенство Персиваля, применим для этой реализации преобразование Фурье и найдем спектральную плотность $\bar{X}_T(\omega)$,

$$E_T = \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \bar{X}_T(\omega) \right|^2 d\omega. \quad (1)$$

Среднюю мощность реализации P_T на интервале $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ получим, разделив энергию E_T на время T :

$$P_T = \frac{E_T}{T} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left| \bar{X}_T(\omega) \right|^2}{T} d\omega. \quad (2)$$

Если увеличивать длительность промежутка времени T , энергия отрезка реализации неограниченно возрастает, но средняя мощность стремится к некоторому пределу. В пределе, при $T \rightarrow \infty$, получаем

$$P_T = \frac{E_T}{T} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left| \bar{X}_T(\omega) \right|^2}{T} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) d\omega, \quad (3)$$

где функция

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left| \bar{X}_T(\omega) \right|^2}{T}. \quad (4)$$

представляет собой спектральную плотность мощности, которая является средней мощностью, приходящейся на 1 Гц, при заданной угловой частоте ω и имеет размерность энергии.

Поскольку на практике при анализе режимов работы испытательной станции реализации СП представлены в виде дискретных отсчетов, полученных с помощью цифровых измерительных приборов, то для определения спектральных характеристик дискретного СП усредним спектр мощности, используя полученное выражение для СПМ:

$$W(\omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n+1} \left| \sum_{k=-n}^n x(k) e^{-j\omega k T} \right|^2, \quad (5)$$

где черта сверху обозначает усреднение по ансамблю реализации, n – количество дискретных отсчетов. Так как непосредственно по приведенной формуле вычисления производить неудобно, ее можно раскрыть и преобразовать к следующему виду:

$$W(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_x(k) e^{-j\omega k T}, \quad (6)$$

где R_x – корреляционная функция СП. Полученное выражение представляет собой дискретный аналог теоремы Винера – Хинчина: спектр СП является преобразованием Фурье от его корреляционной функции.

С целью получения оценки СПМ был использован один из непараметрических методов – метод Уэлча, позволяющий выполнить процедуру оценки только по информации, содержащейся в N отсчетах одной реализации СП с помощью усредненных модифицированных периодограмм. Вычисления по методу Уэлча проводятся по следующему алгоритму.

1. Вектор отсчетов сигнала делится на перекрывающиеся сегменты (как правило, на 50 %).

2. Каждый сегмент умножается на весовую функцию (окно) с коэффициентами $w(k)$ для уменьшения растекания спектра.

3. Для взвешенных сегментов вычисляются модифицированные периодограммы по выражению:

$$W(\omega) = \frac{1}{f_D} \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) w(k) e^{-j\omega k T} \right|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |w(k)|^2}, \quad (7)$$

где f_D – частота дискретизации, Гц.

4. Периодограммы всех сегментов усредняются.

Представленный алгоритм расчёта реализован в функции *pwelch* программного пакета MATLAB [7]. Выходным аргументом функции *pwelch*, в котором содержатся оценки СПМ, является вектор действительных неотрицательных чисел. Размерностью элементов выходного вектора является квадрат размерности элементов входного (исследуемого) вектора, отнесенный к единице ча-

стоты. Таким образом, условно принимая сопротивление резистора, в котором действует сигнал равным 1 Ом , размерность элементов вектора оценки СПМ будет $\frac{Bm}{\Gamma\text{ц}}$

поскольку для напряжения $\frac{B^2}{1\text{Ом}} = Bm$, а для

тока $A^2 \cdot 1\text{Ом} = Bm$. Однако визуализацию выходного вектора оценки СПМ нагляднее выполнять в логарифмической шкале по оси ординат, поэтому на графиках представлена размерность в $\frac{\text{дБ}}{\Gamma\text{ц}}$.

Для сопоставления возможностей спектрального анализа в виде спектральной мощности сигналов, отнесенных к частоте, и гармонического состава этих же сигналов, на рис. 2 (а, б, в) изображены графики для каждого из токов $I_{\text{ВХ}}$, $I_{\text{ПЧ}}$ и $I_{\text{ТП}}$, а на рис. 3 – для напряжения сети $U_{\text{а0}}$. Все графики соответствуют току нагрузки СГ, равному 200 А. По оси абсцисс отложены номера гармоник от 1 до 49, что соответствует диапазону гармоник, предусмотренному стандартами [8, 9].

Представленные графики и расчеты свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на искажение формы тока оказывает ПЧ, причем степень искажения уменьшается с ростом входного тока ПЧ [10, 11], увеличивающегося с ростом тока нагрузки СГ. В [1, 2] приведены параметры СГ, основные этапы испытаний и характеристика силовых цепей станции. Исходя из диапазона 750-3450 об/мин частот вращения испытуемого СГ, его мощности, равной 35 кВт, и необходимости испытания СГ на повышенной частоте вращения до 4140 об/мин, на станции в качестве гонного двигателя (ГД) выбран двухполюсный асинхронный двигатель мощностью 75 кВт. ГД получает питание от ПЧ такой же мощности с входящим в его комплектацию сетевым дросселем. С целью ограничения перегрузки ГД и выходного инвертора ПЧ при испытаниях СГ под нагрузкой, с Заказчиком станции договорились, что эти испытания будут проводиться при частотах вращения СГ не ниже 1500 об/мин.

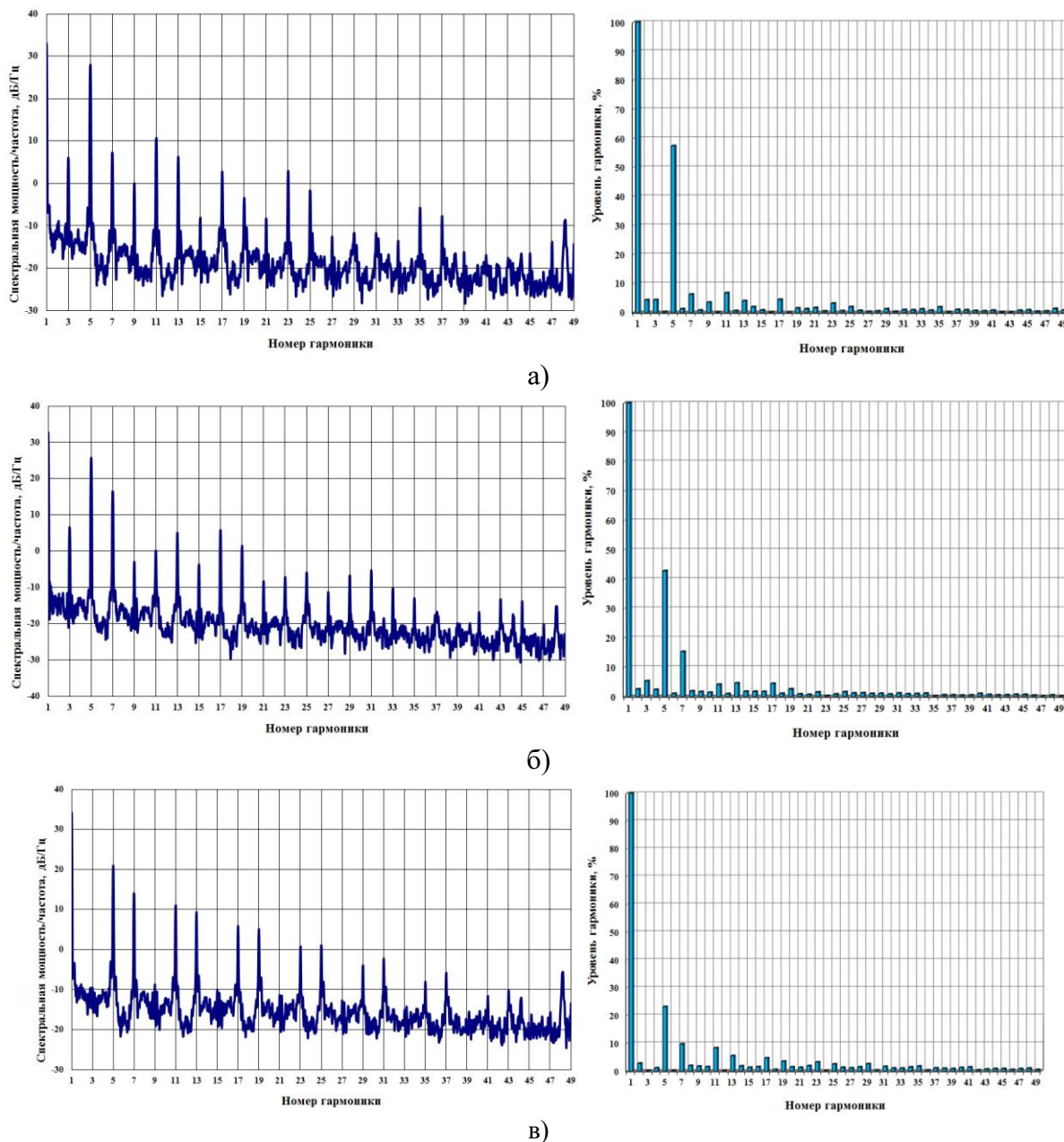


Рисунок 2 – Спектральная мощность/частота и гармонический состав токов I_{VX} (а); $I_{ПЧ}$ (б); $I_{ТП}$ (в)

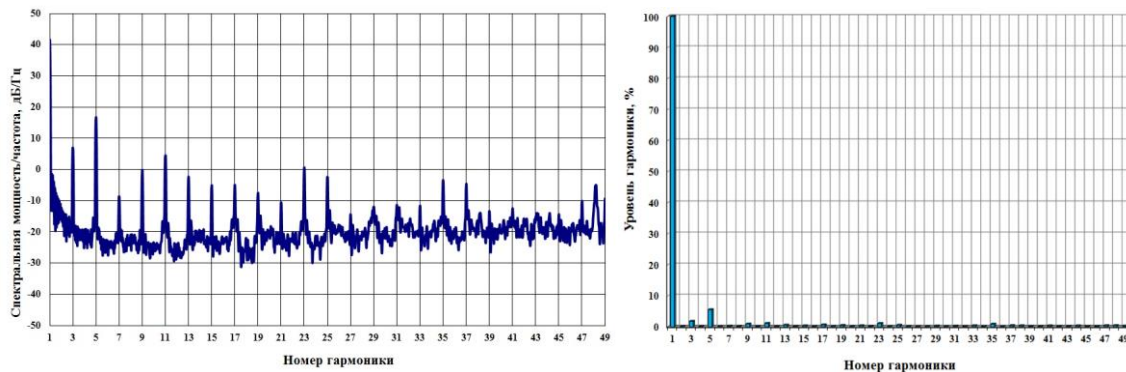


Рисунок 3 – Спектральная мощность/частота и гармонический состав напряжения сети U_{a0}

При номинальном токе генератора, равном 174 А, входные цепи ПЧ (сетевой дроссель и выпрямитель) будут загружены на 47 %, а при перегрузке в 1,5 раза – на 70 % номинальной мощности. При токах нагрузки СГ, равных 50, 100 и 150 А, загрузка входных цепей ПЧ составляет, соответственно, 13,5, 27,0 и 40,5 %, причем это соотношение от частоты вращения СГ не зависит. Зависимости искажения синусоидальности токов и напряжения сети от нагрузки СГ, рассчитанные при обработке осциллограмм токов и напряжения, представлены в табл.1.

Таблица 1 – Зависимости искажения синусоидальности токов и напряжения сети от нагрузки СГ

Ток СГ $I_{г}$, А	Искажение синусоидальности токов $THDi$,% и фазного напряжения сети $THDu$,% с изменением нагрузки СГ			
	$I_{вх}$	$I_{пч}$	$I_{тп}$	$U_{а0}$
0	132,6	143,5	40,2	2,7
50	93,2	94,1	30,1	3,7
100	76,7	75,5	28,4	5,1
150	65,2	60,4	28,3	6,1
200	57,5	48,5	28,2	7,2

Степень искажения синусоидальности входного (суммарного) тока $I_{вх}$, как следует из приведенных в табл.1 данных, определяется током преобразователя частоты $I_{пч}$, тогда как влияние тока $I_{тп}$ сказывается незначительно. Характер изменения тока $I_{тп}$ и его гармонический состав (см. рис.2, в и табл.1) практически не связаны с изменением нагрузки генератора, т.к. угол управления α тиристорного преобразователя, работающего в инверторном режиме, равен 135 градусам с отклонениями от этого значения в пределах нескольких десятых градуса при изменениях нагрузки СГ. Фактическое постоянство угла управления ТП сказывается на том, что в составе гармоник тока ТП превалирует 5-я гармоника с низким уровнем, не превышающим 23% основной гармоники тока ТП, в то время как уровни 5-х гармоник токов $I_{вх}$ и

$I_{пч}$, соответственно, равны 57 и 42 % при токе нагрузки СГ 200 А.

Повышенные значения $THDi$,% у тока $I_{пч}$, потребляемого ПЧ из сети, объясняются тем, что преобразователь мощностью 75 кВт работает с нагрузками, значительно меньшими номинальных значений. В номинальном режиме работы ПЧ сетевой ток $I_{пчн}$ составляет 134 А. Если рассматривать зависимость $THDi$,% от относительного значения сетевого тока ПЧ, то ее можно описать степенной функцией [10]:

$$THDi, \% = 44,88 \cdot \left(I_{пч} / I_{пчн} \right)^{-0,4} . \quad (8)$$

Отметим следующее: в соответствии с этим выражением при номинальной нагрузке ПЧ показатель $THDi$ снизится до 44,88 %, что удовлетворяет требованиям стандартов Международной Электротехнической Комиссии (IEC) [8, 9], ограничивающих максимальное значение $THDi$ на уровне 48 % при номинальной нагрузке ПЧ.

Рассмотрим изменение показателя искажения синусоидальности напряжения сети ($THDu$,%) в точке подключения испытательной станции при различной нагрузке испытуемого генератора.

Исходный уровень искажения синусоидальности напряжения $THDu$, равный 2,7 %, зафиксирован при работе генератора в режиме холостого хода. При проведении испытаний с номинальной нагрузкой генератора, продолжительность которых по регламенту составляет 40 минут, уровень $THDu$ повышается до значения 6,7 %. Только в режимах испытания с кратковременной перегрузкой до 150 % номинальной мощности генератора продолжительностью 1 минута, уровень $THDu$ достигает значения 8,63 %. Так как продолжительность испытаний со 150 % перегрузкой составляет не более 2,5 % суммарного времени испытаний под нагрузкой, то такое кратковременное превышение показателем $THDu$ уровня 8 % не противоречит требованиям норм Стандарта [11], допускающего кратковременное превышение показателем $THDu$ уровня 8 %, если продолжительность превышения этого уровня не выходит за пределы 5 % суммарного времени испытаний.

Выводы. Осциллограммы токов и напряжения в точке подключения станции к сети (рис.1) позволяют четко определить временные интервалы потребления и возврата энергии в сеть, а также совместно с данными, представленными в табл.1, оценить основные факторы, влияющие на искажение синусоидальности сетевого тока. Приведенные результаты экспериментальных исследований, представленные в графической форме на рис.2 и рис.3, свидетельствуют о том, что применение метода спектральной плотности мощности дает более наглядное представление о спектре гармоник анализируемого сигнала по сравнению с алгоритмом дискретного преобразования Фурье, поскольку показывает не только гармоники канонических частот, но также гармоники промежуточных частот (интергармоники) и гармоники с частотой меньшей, чем основная (субгармоники). Как и следовало ожидать, по каноническим частотам результаты исследований методами спектральной плотности мощности и дискретного преобразования Фурье дают практически одинаковые результаты как по величинам конкретных гармоник, так и по соотношениям их амплитуд.

Список использованной литературы

1. Бересан А.А. Идентификация параметров синхронного генератора, работающего с переменной частотой вращения / Бересан А.А., Бойко А.А., Радимов С.Н. // *Электромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика” наукового-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). С. 569 – 571.*
2. Бересан О.О. Особливості побудови випробувальної станції синхронних генераторів, що працюють зі змінною частотою обертання / Бересан О.О., Бойко А.О., Радимов С.М. // *Електротехнічні та комп’ютерні системи. Науково-технічний журнал. – К.: «Техніка», 2012. – Вип. 07(83) – С.42 – 46.*
3. Бересан А.А. Оценка энергетической эффективности станции испытания синхронных генераторов / Бересан А.А., Радимов С.Н. // *Електромеханічні і енергоз-*

берігаючі системи. – Кременчук, 2014. – Вип. 2/2014 (26). – С. 63–69.

4. Бересан А.А. Исследование электромагнитной совместимости станции испытания синхронных генераторов с питающей сетью / Бересан А.А., Радимов С.Н. // *Электротехнические и компьютерные системы, 15(91), Киев, Техника -2014. – С.360 – 363.*

5. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник – М: ООО «Бином-Пресс», 2007 г. – 512 с: ил.

6. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере для профессионалов (2-е издание). – СПб., 2003. – 688с.

7. Беляев В.Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией / Беляев В.Л., Радимов С.Н. // *Електротехнічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика” № 3/2012(19), Кременчук – 2012. – С. 469 – 471.*

8. Electromagnetic Compability (EMC) of technical equipment, IEC 61000-3-12 International Standard, 2004.

9. Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A Per Phase, IEC 61000-3-4 International Standard, 1995.

10. Радимов С.Н. Экспериментальное исследование степени искажения сетевого тока частотного электропривода / Радимов С.Н., Беляев В.Л., Бесараб А.Н. и др. // *Электромашинобуд. та електрообладн. Вип. 75. – 2010, С. 52 – 56.*

11. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Получено 12.05.2016

References

1. Beresan A.A., Boiko A. A., Radimov S.N. Identifikaciia parametrov sinkhronnogo generatora rabotauschego s peremennoi chas-totoi vraschenia. [Parameters identification of the synchronous generator, operating with variable speed] (2012) *Elektromekhanichni ta energozberigay. “Problemy avtomatyzovanogo el-*

ektropryvoda. Teoriya i praktyka”, Kremen-chuk, Issue. 19, pp. 569 – 571. (in Russian).

2. Beresan A.A., Boiko A. A., Radimov S.N. Osoblyvosti pobudovy vyprobuvalnoi stancii synkhronnykh generatoriv scho pracuut zi zminnou chastotou obertannia [Features of construction of the proof-of-compliance test station for variable speed synchronous generators]; *Elektrotekhnichni ta komputerni sistemy*. Kyiv, Tekhnika, Issue 07 (83). - 2012, p. 42 – 46. (in Ukrainian).

3. Beresan A.A., Radimov S.N. Ocenka energeticheskoi effektivnosti stancii ispytania synkhronnykh generatorov. [Estimation of power efficiency of the proof-of-compliance test station for synchronous generators]; *Elektromekhanichni ta energozberigay*. Kremen-chuk, 2014 Issue. 2 (24), pp. 63 – 69. (in Russian).

4. Beresan A.A., Radimov S.N. Issledovanie elektromagnitnoi sovместимости stancii ispytania synkhronnykh generatorov s pitauschei setiu [Research of electromagnetic compatibility of the proof-of-compliance test station for synchronous generators with mains]; *Elektrotekhnicheskie i komputernye sistemy*. Kyiv, Tekhnika, Issue 15 (91). - 2014, p. 360 – 363. (in Russian).

5. A.A. Khalafian STATISTICA 6. Data statistic analysis. 3-d issue. Textbook–M: “Binom-Press”, 2007. – 512 p.

6. Borovikov V.P. STATISTICA. Art of data analysis with PC for professionals (2-nd issue). – SPb., 2003. –688p.

7. Biliaiev V.L., Radimov S.N. Garmonicheskii sostav setevogo toka chastotnykh elektroprivodov s shirotno – impulsnoy modulyaciey [Harmonic composition of the current consumed from mains with load of the AC adjustable speed drive using pulse width modulation], (2012) *Elektromekhanichni ta energozberigay*. “Problemy avtomatyzovanogo elektropryvoda. Teoriya i praktyka”, Kremen-chuk, Issue. 19, pp. 469 – 471. (in Russian).

8. Electromagnetic Compability (EMC) of technical equipment, IEC 61000-3-12 International Standard, 2004.

9. Limitation of emission of harmonic currents in low voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A Per Phase, IEC 61000-3-4 International Standard, 1995.

10. Radimov S.N., Biliaiev V.L., Besarab A. N. and other. Eksperimentalnoe issledovanie stepeni iskazhenia setevogo toka chastotnogo elektroprivoda. [Experimental research of distortion degree of network current of AC adjustable speed drive]; *Elektromashinobud. ta elektroblad*. Issue 75. - 2010, p. 52 – 56. (in Russian).

11. GOST 13109-97 Elektricheskaya energiya. Sovместимost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. [Electric power quality standart specifications in electric power supply systems of common purpose], Kyiv, Gosstandart Ukrainy, 1999 (in Russian).



Бересан Александр Александрович, начальник отдела автоматизированного электропривода ПКФ «Внешторг-Микрон» ООО, ул. Николая Боровского, 37 г.Одесса, 65031, Украина. Тел.: +38(097)145-145-0 E-mail: berik@i.ua



Беляев Владимир Леонидович, канд. техн. наук, доц, каф. энергоснабжения и энергоменеджмента Одесского нац. технического ун-та, просп. Шевченка, 1, г.Одесса, 65044, Украина. Тел.: +38(067)488-61-29 E-mail: vlbel@ukr.net