

УДК 62-523.2

## ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНЦИИ ИСПЫТАНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**А. А. Бересан, С. Н. Радимов**

Одесский национальный политехнический университет  
просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина. E-mail: berik@i.ua

Выполнено сопоставление затрат энергии при проведении испытаний под нагрузкой генератора на существующих станциях с использованием нагрузочных резисторов и с возможностью рекуперации энергии в сеть за счет применения тиристорного преобразователя, работающего в режиме ведомого сетью инвертора, который подключен к выходу генератора через трехфазный мостовой выпрямитель. При регламентированной продолжительности испытаний генератора под нагрузкой для определения затрат энергии достаточно измерить либо оценить мощность, потребляемую станцией из сети, и ее составляющие в цепях потребления и возврата энергии в сеть. Измерения производились электронным счетчиком “Энергия-9”, погрешности которого учитывают работу в сетях с синусоидальными токами, а расчет этих же мощностей выполнен путем соответствующей обработки осциллограмм мгновенных значений токов и напряжения одноименной фазы. С учетом практической симметрии фазных напряжений можно принять как более достоверные расчеты мощности по данным осциллограмм. Оценка затрат энергии на проведение испытаний под нагрузкой показала, что на станции с частичным возвратом энергии нагрузки в сеть расход энергии не превышает 27 % от уровня расхода на существующих станциях.

**Ключевые слова:** энергоэффективность станции, измерения и расчет мощности.

## ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАНЦІЇ ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

**О. О. Бересан, С. М. Радімов**

Одеський національний політехнічний університет  
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна. E-mail: berik@i.ua

Виконано зіставлення витрат енергії при проведенні випробувань під навантаженням генератора на існуючих станціях із використанням навантажувальних резисторів і з можливістю рекуператії енергії в мережу за рахунок застосування тиристорного перетворювача, що працює в режимі відомого мережею інвертора, який підключений до виходу генератора через трифазний мостовий випрямляч. При регламентованій тривалості випробувань генератора під навантаженням для визначення витрат енергії достатньо виміряти або оцінити потужність, споживану станцією з мережі, та її складові в колах споживання й повернення енергії в мережу. Виміри зроблені електронним лічильником “Енергія-9”, похибки якого враховують роботу в мережах із синусоїдальними струмами, а розрахунок цих же потужностей виконано шляхом відповідної обробки осцилограм миттєвих значень струмів і напруги однойменної фази. З урахуванням практичної симетрії фазної напруги можна прийняти як більш достовірні розрахунки потужності за даними осцилограм. Оцінка витрат енергії на проведення випробувань під навантаженням свідчить, що на станції з частковим поверненням енергії навантаження в мережу витрати енергії не перевищують 27 % від рівня витрат на існуючих станціях.

**Ключові слова:** енергоефективність станції, виміри й розрахунок потужності.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Несмотря на необходимость рационального потребления электроэнергии, до настоящего времени на станциях испытания подвагонных синхронных генераторов (СГ), установленных в железнодорожных депо Украины, при испытаниях с приложением нагрузки используется подключение к СГ нагрузочных резисторов, рассеивающих в окружающее пространство выделяющуюся в них тепловую энергию.

Целью данной работы является сопоставление затрат энергии при проведении испытаний под нагрузкой генератора на существующих станциях с использованием нагрузочных резисторов и с возможностью рекуперации энергии в сеть за счет применения тиристорного преобразователя, работающего в режиме ведомого сетью инвертора, который подключен к выходу генератора через трехфазный мостовой выпрямитель.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Рассматриваемая станция испытания синхронных

генераторов индукторного типа [1, 2] состоит из электромеханических и электронных преобразователей энергии, установленных в силовой цепи потребления энергии (преобразователь частоты (ПЧ)) и в цепи возврата (рекуперации) энергии в сеть (тиристорный преобразователь (ТП)).

Функциональная схема станции представлена на рис. 1. Испытуемый синхронный генератор 1 стыкуется с асинхронным гонным двигателем (АД) 2 при помощи разъемного карданного вала (КВ) 3. Гонный двигатель получает питание от преобразователя частоты 4. Выходное переменное напряжение СГ при помощи трехфазного мостового выпрямителя (МВ) 5 преобразуется в постоянное напряжение, поступающее к цепи постоянного тока нереверсивного тиристорного преобразователя 6, работающего в инверторном режиме. Для согласования напряжения силовой цепи ТП с напряжением питающей сети предназначен согласующий трехфазный трансформатор (СТ) 7. Поддержание постоянного напряже-

ния СГ при изменении тока нагрузки и вращении его ротора с различными частотами осуществляется возбудителем (В) 8. Для изменения частоты вращения ротора СГ предназначен задатчик (ЗЧ) 9, изменяющий частоту выходного напряжения ПЧ. Задание тока нагрузки осуществляется задатчиком (ЗН) 10 на входе контура регулирования тока ТП. При снятии характеристики холостого хода в ручном режиме предусмотрен задатчик тока возбуждения (ЗТВ) 11 на входе возбудителя. Номинальные паспортные параметры подвагонного синхронного генератора: мощность  $S_{СГ} = 35$  кВА, линейное напряжение  $U_{ГН} = 116$  В, ток  $I_{ГН} = 174$  А, диапазон рабочих частот вращения вала СГ  $n_{ГН} = 750\text{--}3450$  об/мин, максимальная частота вращения  $n_{ГМАКС} = 3800$  об/мин. Процедуры испытаний генератора предусматривают снятие характеристики холостого хода, испытания при номинальной на-

грузке и при кратковременной 150 %-ной перегрузке по току [3, 4].

Проверка соответствия параметров генератора паспортным данным проводится при произвольной в пределах диапазона рабочих частот вращения и максимальной частоте вращения, при этом генератор должен развивать номинальную мощность при отклонениях напряжения от номинального не более, чем на  $\pm 5\%$ . Суммарная продолжительность испытаний, которые проводятся под номинальной нагрузкой на каждой произвольной и максимальной частоте в обоих направлениях вращения, составляет 40 мин.

Испытания с перегрузкой по току  $1,5 \cdot I_{ГН}$  производятся в течение 1 мин. при прогревом генератора, поэтому к ним переходят непосредственно после завершения испытаний в номинальном режиме. На этом этапе испытаний частота вращения СГ не регламентируется.

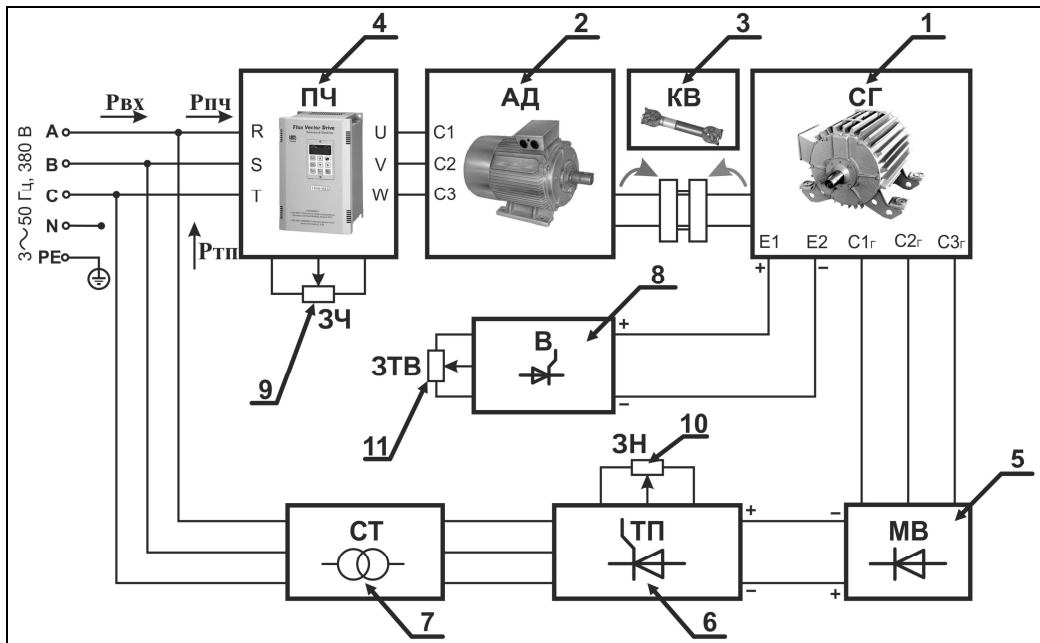


Рисунок 1 – Функциональная схема испытательной станции

Рассматриваемая станция, как следует из представленной на рис. 1 функциональной схемы, позволяет возвратить в питающую сеть часть энергии, потребленной при испытаниях генератора под нагрузкой, за вычетом потерь в электромеханических (АД, СГ), электрическом (СТ) и электронных (ПЧ, МВ и ТП) преобразователях.

Для учета энергетических потоков использованы измерения и оценки активной мощности: потребляемой преобразователем частоты  $P_{ПЧ}$ , инвертируемой в сеть тиристорным преобразователем  $P_{ТП}$ , и входной, потребляемой станцией из сети,  $P_{ВХ}$ .

При проведении предварительных испытаний нагрузка СГ была ограничена током  $I_{Г} = 150$  А, что соответствует  $0,86 \cdot I_{ГН}$ , поэтому для расчета указанных мощностей, соответствующих номинальной нагрузке и перегрузке в 1,5 раза, использованы дан-

ные измерения и вычислений при токах нагрузки генератора, равных 50, 100 и 150 А.

В соответствии с поставленной задачей проведен ряд экспериментов при заданных нагрузках испытываемого СГ с осциллографированием протекающих токов:  $I_{ПЧ}$  – на входе ПЧ,  $I_{ТП}$  – по сетевой обмотке трансформатора, согласующего с сетью напряжение ТП, работающего в инверторном режиме, и результирующего  $I_{ВХ}$ , потребляемого станцией из сети. Осциллографирование выполнялось с использованием датчиков тока [5] и напряжения [6] швейцарской фирмы “LEM” и аналого-цифрового преобразователя [7], обеспечивающего частоту преобразования 100 кГц по каждому из четырех каналов.

Осциллограммы токов  $I_{ВХ}$ ,  $I_{ПЧ}$  и  $I_{ТП}$ , протекающих в одноименной фазе, и напряжение питающей сети  $U_{a0}$  этой же фазы для токов нагрузки  $I_{Г}$  испы-

туемого генератора, равных 50, 100 и 150 А, представлены, соответственно, на рис. 2–4. Для наглядности изображений применено масштабирование

значений напряжения: на рис. 2 фактическое значение напряжения в четыре раза больше, на рис. 3 – в три раза, а на рис. 4 – в два раза больше.

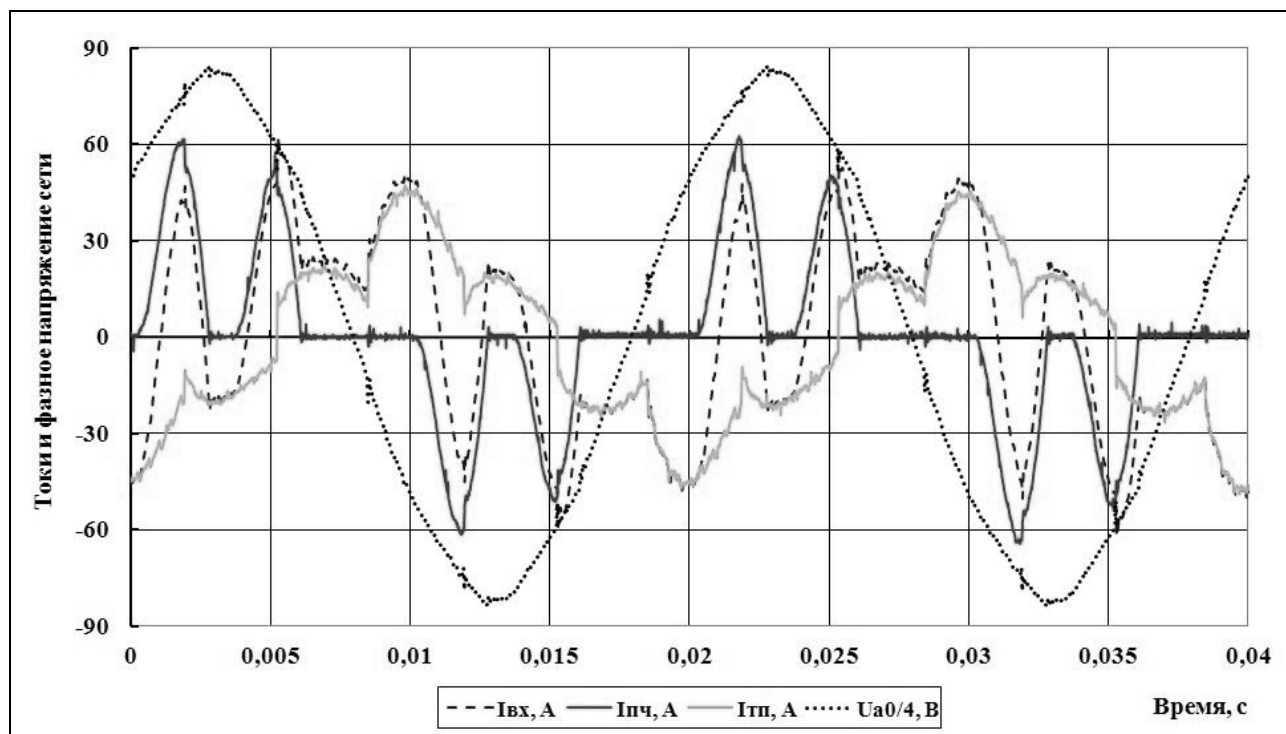


Рисунок 2 – Осциллограммы токов и напряжения при токе генератора  $I_{Г} = 50$  А

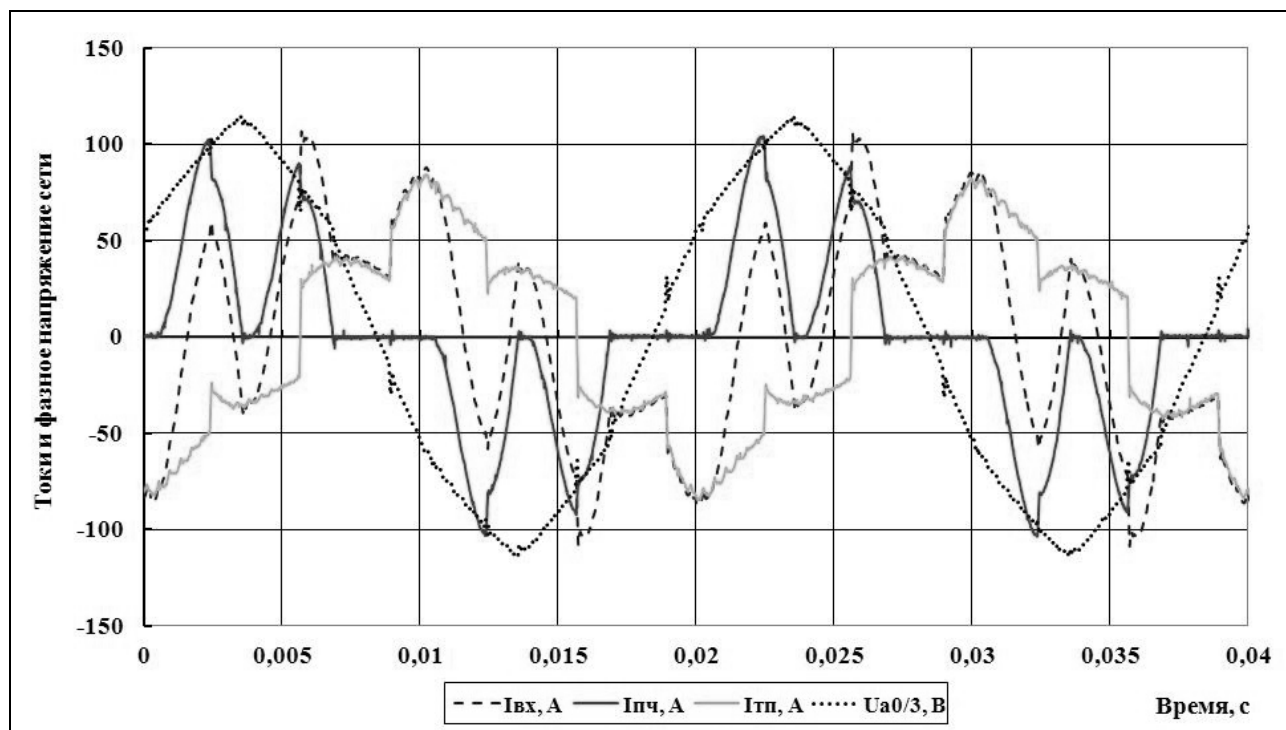


Рисунок 3 – Осциллограммы токов и напряжения при токе генератора  $I_{Г} = 100$  А

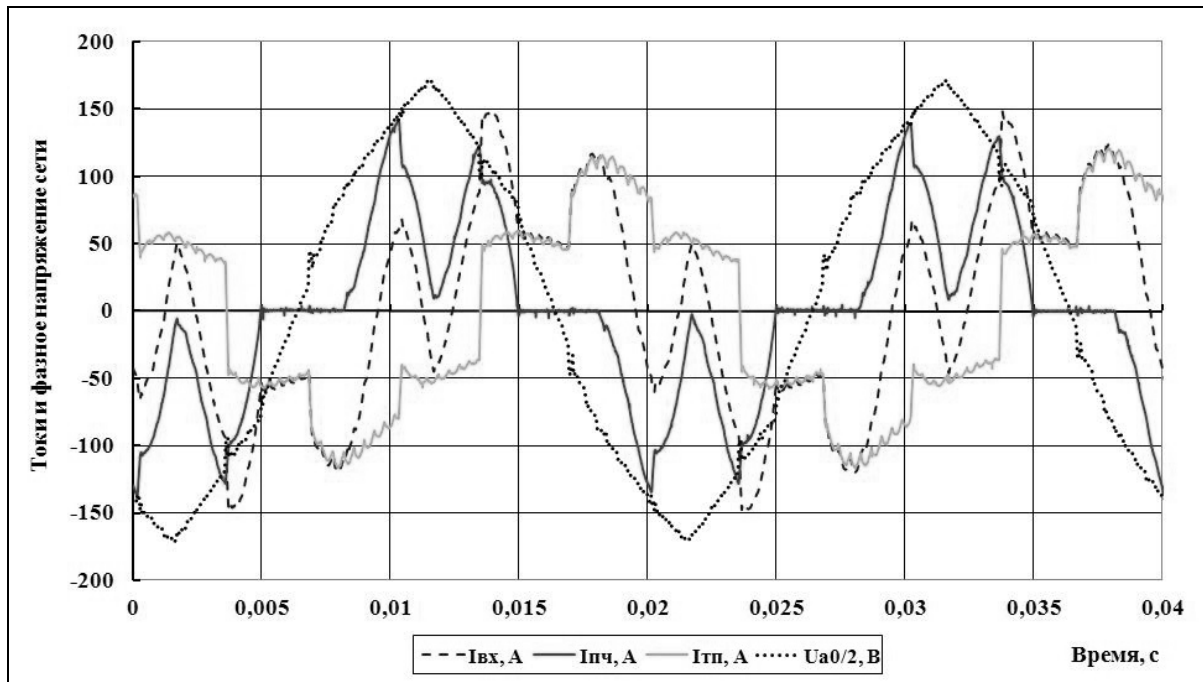


Рисунок 4 – Осциллограммы токов и напряжения при токе генератора  $I_{Г} = 150 \text{ А}$

Непосредственные измерения мощности производились счетчиком “Энергия–9” [8]. Результат измерения мощности счетчиком при токах СГ 50, 100 и 150 А представлен в табл. 1 и в графической форме (рис. 5). Аппроксимация графиков трендами позволила получить прогнозные оценки всех мощностей для режимов номинальной нагрузки и перегрузки в 1,5 раза.

При обработке полученных данных измерений и прогноза использован параметр  $\Delta P_{НБ}$ , учитывающий невязку (несоответствие) баланса мощностей. Приведенные в табл. 1 относительные значения невязки  $\delta p$  свидетельствуют о том, что величины мощностей, особенно при прогнозе для тока  $I_{Г} = 261 \text{ А}$ , не могут быть приняты в качестве достоверных.

Таблица 1 – Мощности, измеренные счетчиком

Ток генератора, А	Мощность, кВт			Невязка баланса мощностей	
	$P_{Пч}$	$P_{Тп}$	$P_{Вх}$	Абсолютная, кВт $\Delta P_{НБ} = P_{Пч} + P_{Тп} - P_{Вх}$	Относительная, % $\delta p = 100 \Delta P_{НБ} / P_{Вх}$
50	12,48	-8,40	4,32	-0,24	-5,56
100	24,36	-17,76	6,72	-0,12	-1,78
150	36,60	-25,76	10,56	0,28	2,65
Прогноз мощности					
174	42,33	-31,22	12,98	-1,87	-14,41
261	63,31	-47,20	28,30	-12,19	-43,07

Поэтому, благодаря наличию снятых осциллограмм тока и напряжения, оказалось возможным проверить показания счетчика. Целесообразность проверки обусловлена, с одной стороны, существенным отклонением формы токов во всех трех цепях от синусоидальной формы, влияние которой на показания счетчика, предназначенного для измерений в сети с синусоидальными токами, в его технических характеристиках не указано. С другой стороны, известно [9], что активная мощность определяется средним значением мгновенной мощности (произведением мгновенных значений тока и на-

пряжения) за целое число периодов тока или напряжения.

Значения мощностей при изменении нагрузки СГ, представленные в табл. 2, получены путем соответствующей обработки осциллограмм токов одной и той же фазы  $I_{Пч}$ ,  $I_{Тп}$ ,  $I_{Вх}$  и фазного напряжения. Результаты расчетов в графической форме приведены на рис. 6. Аппроксимация графиков трендами позволила получить прогнозные оценки мощностей для режимов номинальной нагрузки и перегрузки в 1,5 раза.

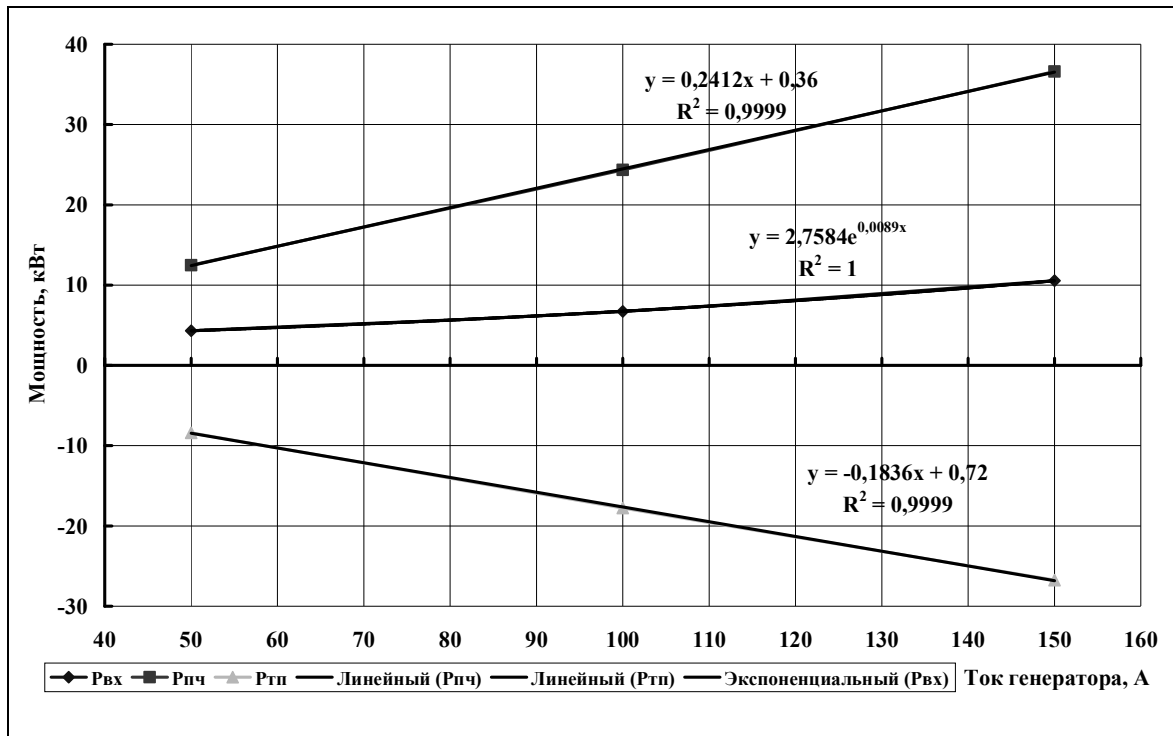


Рисунок 5 – Зависимости измеренных счетчиком мощностей от тока СГ

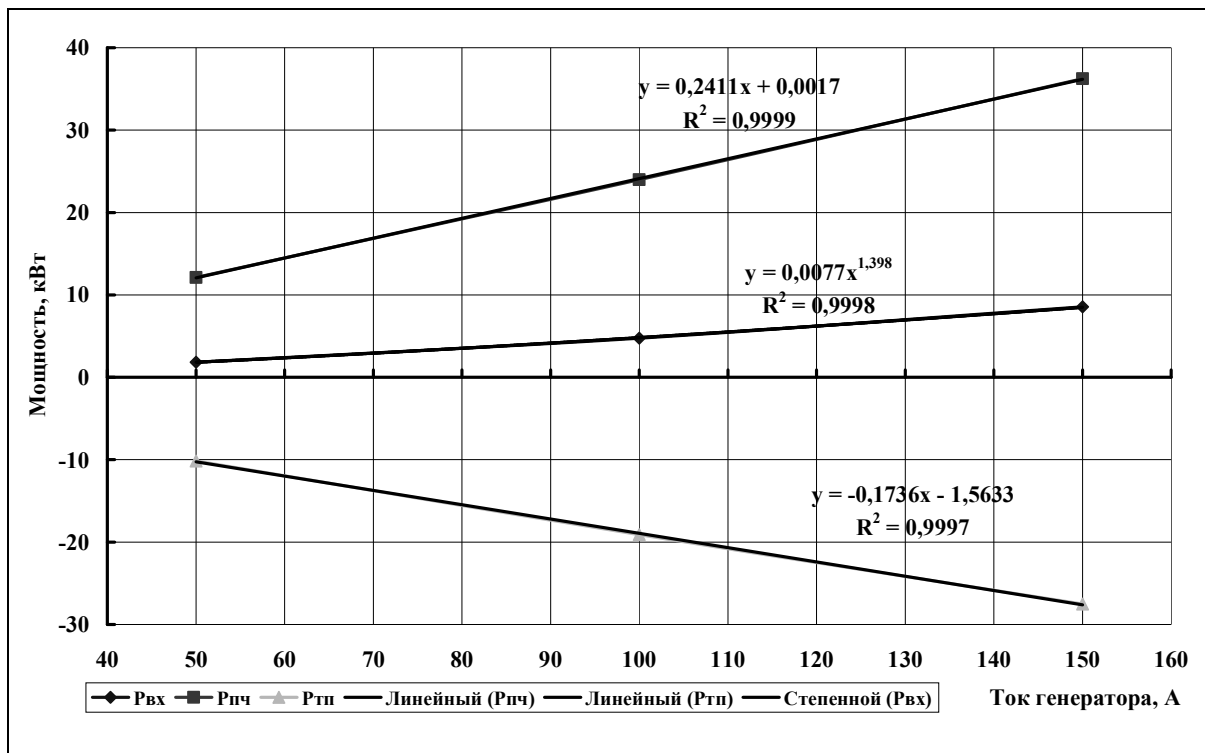


Рисунок 6 – Зависимости мощностей, рассчитанных по осциллограммам тока и напряжения, от тока СГ

Приведенные в табл. 2 результаты расчета иллюстрируют, что относительное значение невязки  $\delta p$  приемлемо при номинальном токе СГ и находится на границе допустимого значения при токе СГ, равном 261 А. Так как целью работы не является анализ метрологических характеристик различных уст-

ройств и способов измерения мощности в цепях с несинусоидальной формой тока, возьмем за основу оценки энергетической эффективности станции результаты расчета и прогноза мощностей, полученные путем обработки осциллограмм токов и напряжения.

Таблица 2 – Мощности, рассчитанные по осциллограммам тока и напряжения

Ток генератора, А	Мощность, кВт			Невязка баланса мощностей	
	$P_{ПЧ}$	$P_{ТП}$	$P_{ВХ}$	Абсолютная, кВт $\Delta P_{НБ} = P_{ПЧ} + P_{ТП} - P_{ВХ}$	Относительная, % $\delta p = 100 \Delta P_{НБ} / P_{ВХ}$
50	12,12	-10,16	1,84	0,12	6,52
100	23,98	-19,10	4,76	0,12	2,52
150	36,23	-27,52	8,56	0,15	1,75
Прогноз мощности					
174	41,95	-31,77	10,44	-0,26	-2,49
261	62,93	-46,87	18,41	-2,35	-12,76

Как следует из прогнозных оценок мощностей, приведенных в табл. 2, мощность  $P_{ПЧ}$ , потребляемая преобразователем частоты при работе СГ с номинальной нагрузкой, равна 41,95 кВт. Мощность  $P_{ТП}$ , возвращаемая в сеть, равна 31,77 кВт, а суммарная входная мощность, потребляемая испытательной станцией  $P_{ВХ}$ , составляет 10,44 кВт. При испытаниях СГ с перегрузкой в 1,5 раза оценки этих же мощностей составляют:  $P_{ПЧП} = 62,93$  кВт,  $P_{ТПП} = 46,87$  кВт и  $P_{ВХП} = 18,41$  кВт.

Далее, при расчетах потребления энергии, будут использованы округленные до целых чисел значения мощностей.

При испытании СГ на станции с номинальной нагрузкой без устройства рекуперации в течение 40 мин. из сети потребляется энергия:

$$W_{ПЧН} = \frac{P_{ПЧН} \cdot 40}{60}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ПЧН} = \frac{42 \cdot 40}{60} = 28 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При работе СГ с перегрузкой в течение 1 мин. из сети потребляется энергия:

$$W_{ПЧП} = \frac{P_{ПЧП} \cdot 1}{60}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ПЧП} = \frac{63 \cdot 1}{60} = 1,05 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарное потребление энергии при испытании с нагрузкой одного СГ составляет:

$$W_{ПЧС} = W_{ПЧН} + W_{ПЧП}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ПЧС} = 28 + 1,05 = 29,05 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

С подключением устройства рекуперации при испытании с номинальной нагрузкой и перегрузкой в 1,5 раза из сети потребляется, соответственно:

$$W_{ВХН} = \frac{P_{ВХН} \cdot 40}{60}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ВХН} = \frac{11 \cdot 40}{60} = 7,33 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ВХП} = \frac{P_{ВХП} \cdot 1}{60}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ВХП} = \frac{19 \cdot 1}{60} = 0,32 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарное потребление энергии при проведении испытаний с нагрузкой одного СГ и включенном устройством рекуперации составляет:

$$W_{ВХС} = W_{ВХН} + W_{ВХП}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{ВХС} = 7,33 + 0,32 = 7,65 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, на испытательной станции за счет устройства рекуперации энергии в сеть при испытании одного генератора снижается потребление энергии:

$$W_{Э} = W_{ПЧС} - W_{ВХС}, \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$W_{Э} = 29,05 - 7,65 = 21,40 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

**ВЫВОДЫ.** Проведенные исследования подтвердили энергетическую эффективность станции испытания СГ.

Расчет потребления энергии показал, что при испытании одного генератора на станции за счет устройства рекуперации энергии в сеть снижается потребление энергии с 29 до 7,7 кВт·ч.

Благодаря использованию полупроводниковых преобразователей энергии, оснащенных современными микропроцессорными системами управления и защиты, устранены нагрузочные резисторы, в которых выделяется тепловая энергия мощностью до 52,5 кВт, что позволило повысить энергетическую эффективность и безопасность при проведении испытаний. Помимо безусловных энергетических преимуществ, станция обладает возможностью определения потерь мощности в отдельных устройствах силового тракта и, что особенно важно, в испытуемом генераторе. Указанные возможности рассматриваемой станции полностью подтверждены её успешной трехлетней эксплуатацией в одном из ведущих железнодорожных депо Украины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бересан А.А., Бойко А.А., Радимов С.Н. Идентификация параметров синхронного генератора, работающего с переменной частотой вращения // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 569–571.

2. Бересан О.О., Бойко А.О., Радімов С.М. Особливості побудови випробувальної станції синхронних генераторів, що працюють зі змінною частотою обертання // Електротехнічні та комп'ютерні системи: науково-технічний журнал. – К.: Техніка, 2012. – Вип. 7 (83) – С. 42–46.

3. ГОСТ 11826–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.

4. ГОСТ 2582–81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

5. Технические характеристики датчиков тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.fek.by/doc/components/L\\_O/Lem/lf306-s.pdf](http://www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/lf306-s.pdf).

6. Технические характеристики датчиков напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[http://www.fek.by/doc/components/L\\_O/Lem/lv25-p-sp3.pdf](http://www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/lv25-p-sp3.pdf).

7. Микросистема сбора данных m-DAQ14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://holit.ua/ru/products/481/483/4477.html?mft=1>.

8. Трёхфазные электронные счетчики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://telecard.odessa.ua/production/energy/electric\\_counters/89/](http://telecard.odessa.ua/production/energy/electric_counters/89/).

9. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. В 3-х т. – Т. 1. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.

### ESTIMATION OF POWER EFFICIENCY OF THE PROOF-OF-COMPLIANCE TESTSTATION FOR SYNCHRONOUS GENERATORS

**A. Beresan, S. Radimov**

Odessa National Polytechnic University

ul. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044. Ukraine. E-mail: [berik@i.ua](mailto:berik@i.ua)

Comparison of expenses of energy is executed during carrying out tests of the generator under work. Tests were carried out at existing stations with use of load resistors and at station with possibility of return energy to the mains. Return energy happened due to use of the thyristor converter working in a mode of the inverter conducted by a mains. The thyristor converter is connected to a generator exit via the three-phase bridge rectifier. In case duration of tests of the generator under loading is limited, for definition of expenses of energy it is enough to receive: station's power consumption from mains; part of power in a consumption chain; part of power in a chain of return energy to the mains. A measurement of the specified powers was made by the electronic counter "Energy-9". Errors of this electronic counter consider work in mains with sinusoidal currents. Calculation of the specified capacities is executed by processing of oscillograms of instant values of currents and voltage of the phase of the same name. Considering practical symmetry of phase voltages, it is possible to accept more reliable power calculations according to oscillograms. The advantages of expenses of energy on carrying out tests under loading showed that at station with of return energy to the mains power consumption doesn't exceed 27 % of level of an expense at existing stations.

**Key words:** station's energy efficiency, measurement and calculating power.

#### REFERENCES

1. Beresan, A.A., Boyko, A.A. and Radimov, S.N. (2012), "Parameters identification of the synchronous generator, operating with variable speed", *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemy. Tematichnyy vipusk "Problemy avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika"*, Vol. 3, no. 19, pp. 569–571. (in Russian)

2. Beresan, O.O., Boyko, A.O. and Radimov, S.M. (2012), "Features of construction of the proof-of-compliance test station for variable speed synchronous generators" *Elektrotekhnichni ta kompyuterni sistemi*, Vol. 7, no. 83, pp. 42–46. (in Ukrainian)

3. GOST 11826–86. Rotating electrical machines. Common test methods. (in Russian)

4. GOST 2582–81. Rotating electrical machines traction. Specifications. (in Russian)

5. Specifications current sensors. Available at: [http://www.fek.by/doc/components/L\\_O/Lem/lf306-s.pdf](http://www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/lf306-s.pdf) (accessed March 31, 2014).

6. Specifications voltage sensors. Available at: [http://www.fek.by/doc/components/L\\_O/Lem/lv25-p-sp3.pdf](http://www.fek.by/doc/components/L_O/Lem/lv25-p-sp3.pdf) (accessed March 31, 2014)

7. Microsystem data collection m-DAQ14. Available at: <http://holit.ua/ru/products/481/483/4477.html?mft=1> (accessed March 31, 2012).

8. The electronic meters. Available at: [http://telecard.odessa.ua/en/production/energy/electric\\_counters/38/](http://telecard.odessa.ua/en/production/energy/electric_counters/38/) (accessed March 31, 2014).

9. Demirchan, K.S., Neiman, L.R., Korovkin, N.V. and Chechurin, V.L. (2003), *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering], Piter, Saint-Petersburg. (in Russian)

Стаття надійшла 18.04.2014.