

УДК 62-523.2

**А. А. Бересан,**  
**С. Н. Радимов,** д-р техн. наук

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СТАНЦИИ ИСПЫТАНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

**Аннотация.** Представлены результаты обработки экспериментально полученной информации о характере и форме токов, протекающих в цепях замкнутого силового контура станции испытания синхронных генераторов. Проведено исследование совместного воздействия частотного привода и привода постоянного тока на искажение синусоидальности тока, потребляемого станцией из сети, и напряжения сети.

**Ключевые слова:** станция, синхронный генератор, испытания, нагрузка, нелинейные потребители, преобразователь частоты, тиристорный преобразователь, электромагнитная совместимость, искажение синусоидальности, сетевой ток, напряжение сети

**A. A. Beresan,**  
**S. N. Radimov,** ScD.

## RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE PROOF-OF-COMPLIANCE TEST STATION FOR SYNCHRONOUS GENERATORS WITH MAINS

**Abstract.** There are given the results of experimentally received data processing of the currents character and waveform. The currents flow in the closed power circuit of the proof-of-compliance test station for synchronous generators. The research of frequency drive and DC drive joint influence on the current total harmonic distortion and the voltage consumed by the test station from the mains was performed.

**Keywords:** test station, synchronous generator, load, nonlinear consumers, frequency converter, thyristor converter, electromagnetic compatibility, total harmonic distortion, lines current, mains voltage.

**О. О. Бересан,**  
**С. М. Радимов,** д-р техн. наук

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СТАНЦІЇ ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ З МЕРЕЖЕЮ ЖИВЛЕННЯ

**Анотація.** Представлені результати обробки експериментально отриманої інформації про характер і форму струмів, що протікають в колах замкнутого силового контуру станції випробування синхронних генераторів. Проведено дослідження спільного впливу частотного приводу і приводу постійного струму на спотворення синусоїдальності струму, споживаного станцією з мережі, і напруги мережі.

**Ключові слова:** станція, синхронний генератор, випробування, навантаження, нелінійні споживачі, перетворювач частоти, тиристорний перетворювач, електромагнітна сумісність, спотворення синусоїдальності, струм мережі, напруга мережі

**Актуальность работы.** Учитывая неуклонную тенденцию перехода от нерегулированного электропривода технологических механизмов и агрегатов к регулируемому, а также то обстоятельство, что управляемые преобразователи регулируемых приводов (тиристорные преобразователи напряжения приводов переменного ТПН-АД и постоянного тока ТП-ДПТ, непосредственные преобразователи частоты НПЧ и преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока ПЧ являются генераторами высших гармоник в сеть электроснабжения, актуальными являются исследования их электромагнитной совместимости с питающей сетью.

Следует отметить, что в известных работах [1 – 5] рассмотрено влияние на сеть отдельных типов нелинейных потребителей: ТПН-АД, ТП-ДПТ, НПЧ и ПЧ как с амплитудной, так и с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.

В линии, питающей станцию испытания синхронных генераторов (СГ) с замкнутым силовым контуром [6], накладываются потоки потребления энергии из сети и рекуперации энергии в сеть. Потребителем энергии является частотный привод вращения испытуемого СГ, а возврат энергии в сеть осуществляется при испытании СГ под нагрузкой при помощи тиристорного преобразователя (ТП) привода постоянного тока, работающего в инверторном режиме.

Совместное влияние на искажение синусоидальности сетевого тока от сочетания на станции испытания синхронных генераторов привода с ПЧ и ТП для привода ТП-ДПТ не нашло отражение в опубликованных работах.

**Целью данной работы** является исследование совместного воздействия частотного привода и привода постоянного тока на искажения синусоидальности тока, потребляемого станцией из сети, и напряжения сети в точке подключения станции. Одновременно проверяется удовлетворение требований стандартов [7, 8, 9] по электромагнитной совместимости нелинейных потребителей с сетью.

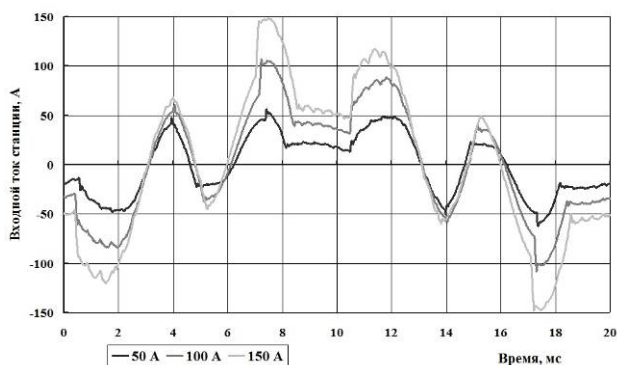


Рис. 1. Осциллограммы тока  $I_{BX}$  при токах  $I_G$ , равных 50, 100 и 150 А

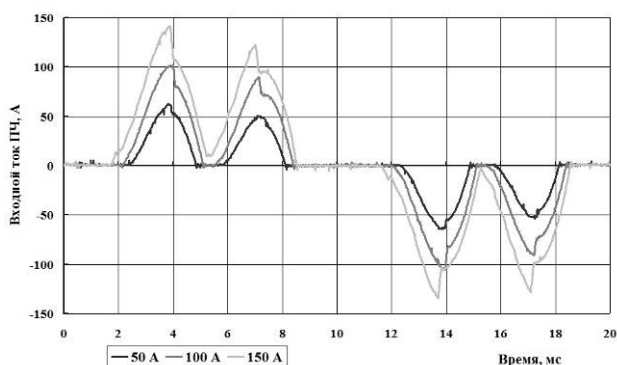


Рис. 2. Осциллограммы тока  $I_{PC}$  при токах  $I_G$ , равных 50, 100 и 150 А

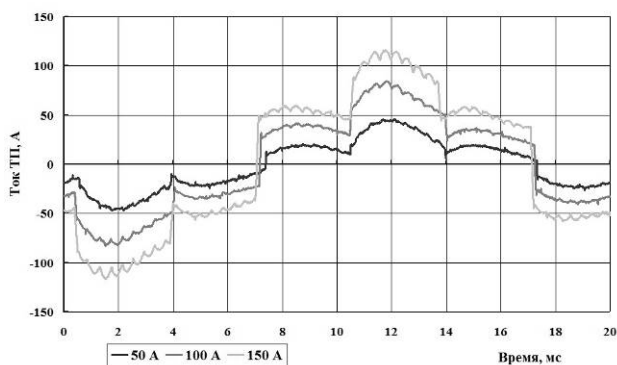


Рис. 3. Осциллограммы тока  $I_{TP}$  при токах  $I_G$ , равных 50, 100 и 150 А

В соответствии с поставленной задачей проведен ряд экспериментов при токах нагрузки  $I_G$  испытуемого СГ, равных 50, 100 и 150 А, с регистрацией протекающих токов: результирующего тока  $I_{BX}$ , потребляемого станцией из сети,  $I_{PC}$  – на входе ПЧ,  $I_{TP}$  – по сетевой обмотке трансформатора, согласующего с сетью напряжение ТП, работающего в инверторном режиме. Осциллографирование выполнялось с использованием датчиков тока и напряжения Швейцарской фирмы “LEM” и аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающего частоту преобразования 100 кГц по каждому из 4-х каналов [10].

На рисунках 1, 2 и 3 приведены совмещенные осциллограммы изменения токов  $I_{BX}$ ,  $I_{PC}$  и  $I_{TP}$ , соответствующие токам нагрузки генератора, равным 50, 100 и 150 А. Осциллограммы указанных токов и напряжения одноименной фазы сети для тока нагрузки испытуемого СГ  $I_G$ , равного 150 А, представлены на рис. 4.

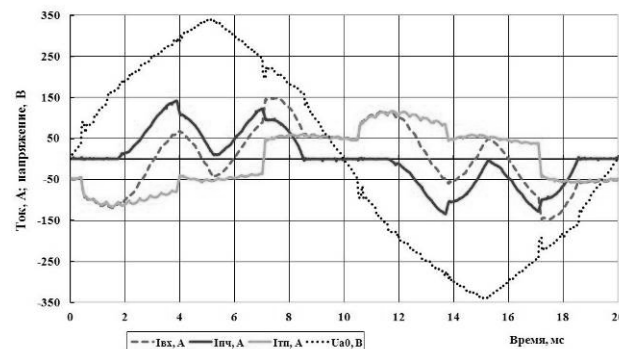


Рис. 4. Осциллограммы токов  $I_{BX}$ ,  $I_{PC}$ ,  $I_{TP}$  и напряжения  $U_{a0}$  при токе  $I_G$ , равном 150 А

Как следует из приведенных на рис. 1 – рис. 3 осциллограмм токов, их форма зависит от тока нагрузки СГ. Определение степени искажения синусоидальности токов  $I_{BX}$ ,  $I_{PC}$ ,  $I_{TP}$  и напряжения  $U_{a0}$  в зависимости от тока нагрузки генератора выполнено с использованием гармонического анализа токов и фазного напряжения, на основании которого рассчитаны параметры  $THDi$ , % (Total Harmonic Distortion) по известному соотношению

$$THDi, \% = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{49} I_v^2}}{I_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $I_1$  – действующее значение первой гармоники тока,  $v$  – номер гармоники,  $I_v$  – действующее значение  $v$ -ой гармоники тока.

Расчет  $THDu$ , % производится по аналогичному соотношению. Результаты расчета сведены в табл.1.

1. Зависимости искажения синусоидальности токов и напряжения сети от нагрузки СГ

| Ток СГ $I_G$ , А | Искажение синусоидальности токов $THDi$ , % и фазного напряжения сети $THDu$ , % |          |          |          |
|------------------|--|----------|----------|----------|
|                  | $I_{BX}$   | $I_{PC}$ | $I_{TP}$ | $U_{a0}$ |
| 50               | 96,36  | 94,80    | 30,48    | 2,37     |
| 100              | 77,31  | 75,67    | 27,91    | 3,73     |
| 150              | 67,95  | 59,50    | 28,56    | 4,84     |

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, увеличивающегося с ростом тока нагрузки СГ. Такая закономерность отмечена в работах [4, 5, 11], а в [4] предложено соотношение, определяющее зависимость  $THDi$  от величины загрузки ПЧ, измеряемой относи-

тельным значением первой гармоники сетевого тока  $I_1^*$ , в виде степенного полинома

$$THDi, \% = A \cdot I_1^\alpha, \quad (2)$$

в котором коэффициент  $A = 41,15$ , показатель степени  $\alpha = -0,4$ .

Проверим удовлетворение требований стандартов [7, 8, 9] по электромагнитной совместимости станции испытания с сетью. В [10] приведены параметры СГ, основные этапы испытаний и характеристика силовых цепей станции. Исходя из диапазона 750 – 3450 об/мин номинальных 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. При номинальном токе СГ, 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, нагрузка входных цепей ПЧ составляет, соответственно, 13,5, 27,0 и 40,5 %, причем это соотношение от частоты вращения СГ не зависит.

Степень искажения синусоидальности сетевого тока ПЧ регламентируется стандартами Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) [7, 8], которыми ограничивается величина  $THDi, \%$  уровнем не более 48% при работе ПЧ с номинальной нагрузкой. Рассчитанные по соотношению (1) и вычисленные (в скобках) при гармоническом анализе осциллограмм входных (сетевых) токов ПЧ значения  $THDi, \%$  при относительной нагрузке ПЧ, равной 0,135, 0,27 и 0,405, составляют, %: 91,7 (94,8); 69,5 (75,7); 59,1 (59,5). Различие результатов расчета и эксперимента не превышает 9 %. С увеличением нагрузки ПЧ растет значение тока, потребляемого из сети, но падает степень искажения его синусоидальности. Как следует из (1), при номинальной нагрузке ПЧ  $THDi, \%$  снизится до уровня 41,15 %. Искажение синусоидальности формы тока вызывает соответствующее изменение синусоидальности напряжения сети. Стандартом [9] ограничивается уровень искажения синусоидальности формы напряжения величиной  $THDu, \% = 8$  %. Обработка осциллограмм фазного напряжения сети, питающей испытательную станцию, показала следующие значения  $THDu$ , соответствующие указанным выше нагрузкам ПЧ, % : 2,30; 3,73; 4,85. Аппроксимация этих данных позволила оценить величины  $THDu, \%$  при нагрузке ПЧ, равной, 47 и 70 %. Их значения ожидаются на уровне 5,39 и 7,50 %, что не противоречит требованиям этого стандарта.

**Выводы.** Степень искажения синусоидальности токов, протекающих в линии, питающей испытательную станцию, и напряжения в точке подключения станции не превышает значений, предусмотренных соответствующими стандартами.

Наибольшее влияние на искажение формы токов в линии, питающей испытательную станцию, оказывает ПЧ, а токи на выходе согласующего трансформатора ТП, работающего в инверторном режиме с практически неизменным углом управления тиристоров, незначительно сказываются на величине  $THDi$  результирующего тока.

Исходя из фактической загрузки входных цепей ПЧ, не превышающих 55 кВт, считаем целесообразным, устанавливая на его входе сетевой дроссель, входящий в комплект ПЧ мощностью 55 кВт. Такой дроссель будет обладать большей индуктивностью и позволит несколько снизить  $THDi$  сетевых токов при неполной нагрузке ПЧ.

#### Список использованной литературы

1. Радимов С. Н. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости кранового электропривода ТПН-АД с сетью / С. Н. Радимов, В. Л. Беляев, А. Н. Бесараб, К. А. Аниченко, Я. А. Соколов // *Электротехнические и компьютерные системы*. – Одесса : Техника – 2013. – № 10 (86). – С. 16 – 21.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. / И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
3. Жежеленко И. В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
4. Радимов С. Н., Экспериментальное исследование степени искажения сетевого тока частотного электропривода [Радимов С. Н., Беляев В. Л., Бесараб А. Н. и др.]; *Электромашинобудовання та електрообладнання*. – Одеса : Техніка. – 2010. – № 75. – С. 52 – 56.
5. Беляев В. Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // *Електротехнічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика”*. – Кременчук : – 2012. – № 3/2012(19). – С. 469 – 471.
6. Бересан О. О. Особливості побудови випробувальної станції синхронних генераторів, що працюють зі змінною частотою обертання / О. О. Бересан, А. О. Бойко, С. М. Радімов // *Електротехнічні та комп’ютерні системи. Науково-технічний журнал*. – К. : Техніка. – 2012. – № 07(83) – С. 42 – 46.
7. 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.
8. Electromagnetic Compability (EMC) of Technical Equipment, IEC 61000-3-12 International Standard, 2004.
9. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
10. Бересан А. А. Оценка энергетической эффективности станции испытания синхронных генераторов / А. А. Бересан, С. Н. Радимов // *Електромеханічні і енер-*

гозберігаючі системи. – Кременчук : – 2014. – Вип. 2/2014 (26). – С. 63 – 69.

11. Fuchs Leo, (2011), Mistakes at THDi Measement with Partial Load, *Schneider Electric Power Drives*, Vienna – 2011, pp. 1 – 7.

Получено 08.07.2014

#### References

1. Radimov S.N., Bilyayev V.L., Besarab A.N. and others. Jeksperimental'nye issledovanija jelektromagnitnoj sovmestivosti kranovogo jelektroprivoda TPN-AD s set'ju [Experimental Research of Electromagnetic Compatibility of Gantry Crane Thyristor Voltage Converter Electric Drive and Supply Mains], (2013), *Scientific and Technical Journal "Electrotechnic and Computer Systems"*, Kiev, Ukraine, No. 10(86), pp. 16 – 21 (In Russian).

2. Gegelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemah jelektrosnabzhenija prompredpriyatij [Ultraharmonics in the Systems of Power Supply of Enterprises], (2000), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 331 p. (In Russian).

3. Gegelenko I.V. Izbrannye voprosy nesinusoidal'nyh rezhimov v jelektricheskikh setjah predpriyatij. [Selected Questions of non-sinusoidal Modes in Power Networks of the Enterprises], (2007), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 296 p. (In Russian).

4. Radimov S.N., Bilyayev V.L., Besarab A.N. and others. Jeksperimental'noe issledovanie stepeni iskazhenija setevogo toka chastotnogo jelektroprivoda [Experimental Research of Distortion Degree of Network Current of AC Ajustable Speed Drive], (2010), *Electrical Machinery and Electrical Equipment*, Odessa. *Technical*, No. 75, pp. 52 – 56 (In Russian).

5. Bilyayev V.L., and Radimov S.N. Garmonicheskij sostav setevogo toka chastotnyh jelektroprivodov s shirotno-impul'snoj moduljaciej [Harmonic composition of network current of electric drive with power width modulation], (2012), *Electromechanical and Energy Saving Systems*, Kremenchuk, Ukraine, *KrNU*, No. 3/2012 (19), pp. 469 – 471 (in Russian).

6. Beresan A.A. Boyko A.O., and Radimov S.M. Osoblivosti pobudovi viprobuval'noї stancii sinhronnih generatoriv, shho pracjujut' zi zminnoju chastotoju ober-tannja, [Features of Construction of the proof-of-Compliance test Station for Variable Speed Synchronous Generators], (2012), *Scientific and Technical Journal "Electrotechnic and Computer Systems"*, Kiev, Ukraine, *Technical*, No. 07 (83), pp. 42 – 46 (In Ukrainian).

7. 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 (In English).

8. Electromagnetic Compability (EMC) of Technical Equipment, IEC 61000-3-12 International Standard, 2004 (In English).

9. GOST 13109-97 Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija [GOST

13109-97 Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in Public Electrical Systems] (In Russian).

10. Beresan A., and Radimov S. Ocenka jenergeticheskoi jeffektivnosti stancii ispytaniya sinhronnyh generatorov [Estimation of Power Efficiency of the Proof-of-Compliance test Station for Synchronous Generators], (2014), *Electromechanical and Energy Saving Systems*, Kremenchug, Ukraine, *KrNU*, No. 2/2014 (26), pp. 63 – 69 (In Russian).

11. Fuchs Leo, (2011), Mistakes at THDi Measement with Partial Load, *Schneider Electric Power Drives*, Vienna, pp. 1 – 7 (In English).



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



Радимов

Сергей Николаевич,  
д-р техн. наук, проф. каф. энергоснабжения и энергомеджмента Одесского нац. политехнического ун-та,  
просп. Шевченка, 1.  
г. Одесса, 65044, Украина.  
Тел.: +38(095)28963-86.  
E-mail: radimov7@rambler.ru