

В.В. КУЗЬМИН, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
В.И. НОСКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
В.С. ШПАТЕНКО, інженер, НТУ "ХПІ",
Г.В. ГЕЙКО, ст. преп., НТУ "ХПІ"

АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Проанализированы проблемы, связанные с модернизацией синхронных генераторов крупных электростанций. Разработан метод, позволяющий определить гармонический состав напряжения модернизированного генератора. Приведены результаты расчётов, по которым можно выполнить оценку правильности выбора оптимальной конструкции генератора. Ил.: 4. Табл.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: модернизация; синхронный генератор; гармонический состав; оптимальная конструкция генератора.

Постановка проблемы и анализ литературы. В современной энергетике актуальной является задача повышения эффективности работы крупных электростанций, которая решается модернизацией (реабилитацией) турбогенераторов (ТГ) на электростанциях или заводе-изготовителе [1 – 3]. На практике проблема улучшения формы напряжения решается двумя методами: для гидрогенераторов – за счёт изменения воздушного зазора в районе полюсного наконечника, для турбогенераторов – за счёт сокращения шага обмотки статора. Использование научно-технических инноваций [4] позволяет отказаться от устаревших методик проектирования и модернизации ТГ и обоснованно улучшить массо-габаритные показатели и качество напряжения синхронных ТГ с неявнополюсными и многофазными роторами. Для выбора и подтверждения наиболее приемлемой конструкции ТГ с использованием современных решений необходимо выполнить гармонический анализ его напряжения.

Гармонический состав и определение первой гармоники напряжения ТГ, по которой оценивается его работа, можно получить различными методами [5, 6]. Одним из основных методов гармонического анализа функций, удовлетворяющих условиям Дирихле, является метод, основанный на преобразовании Фурье. Однако, он хорошо работает при обработке информации относительно большой длительности и мало меняющихся параметрах. Поэтому для ТГ электростанций, работающих в широком диапазоне нагрузок, этот метод гармонического анализа напряжения неприемлем. В этой связи, потребовалась разработка метода определения гармонического состава

напряжения ТГ, который бы отличался необходимой точностью и требуемым быстродействием.

Целью статьи является разработка метода определения гармонического состава напряжения ТГ на этапе выполнения проектных работ и выполнения с его помощью оценки правильности выбора оптимальной конструкции ТГ.

При модернизации или создании новых ТГ появилась возможность обоснованного улучшения их конструкции за счёт изменения схемы его обмоток и числа пазов [1]. Подтверждением выбранного решения является исследование состава выходного напряжения ТГ. Правильно выполненная оценка состава высших гармоник позволяет выбрать оптимальную конструкцию ТГ. В частности, изменение формы, числа и распределения пазов позволит убрать из выходного напряжения гармоники до 7 порядка.

Пример использования метода. Отклонения формы напряжения от идеальной синусоиды регламентирует ГОСТ. В частности, для ТГ действующими стандартами предусмотрено, что значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения не должно превышать 5% и определяется по формуле

$$K_u = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения 1-ой гармоники (основной частоты), U_2, U_3, \dots, U_k – действующие значения фазного напряжения высших гармоник, кратных по частоте основной гармонике.

Для решения этой задачи предлагается использовать метод, основанный на применении формул Бесселя [6]. Как известно, периодическая функция может быть представлена тригонометрическим полиномом вида

$$y = \sum_{k=0}^n (A_k \cos kx + B_k \sin kx). \quad (2)$$

При этом, гармоники k -го порядка тригонометрического полинома определяются по выражению:

$$y_k = r_k \sin(kx + \varphi_k) = (r_k \sin \varphi_k) \cos kx + (r_k \cos \varphi_k) \sin kx, \quad (3)$$

где r_k и φ_k – соответственно амплитуда и фаза k -й гармоники ($k = \overline{1, n}$).

Введя обозначения:

$$A_k = r_k \sin \varphi_k; B_k = r_k \cos \varphi_k, \quad (4)$$

получаем

$$y_k = A_k \cos kx + B_k \sin kx. \quad (5)$$

Из (5) следует, что амплитуда k -ой гармоники может быть получена следующим образом

$$r_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}. \quad (6)$$

При этом, коэффициенты A_k и B_k могут быть определены по формулам:

$$A_0 = \frac{1}{v} \sum_{\lambda=1}^{2v} y_\lambda, \quad A_k = \frac{1}{v} \sum_{\lambda=1}^{2v} y_\lambda \cos k\lambda \frac{\pi}{v}, \quad (7)$$

$$B_k = \frac{1}{v} \sum_{\lambda=1}^{2v} y_\lambda \sin k\lambda \frac{\pi}{v}, \quad (k = \overline{1, v-1}),$$

где A_0 – постоянная составляющая, k – номер гармоники, v – количество интервалов, на которые разбивается период, y_λ – значение ординаты соответствующей функции [6].

Разбивая период функции на равные интервалы, по выражениям (6), (7) можно вычислить коэффициенты, которые будут определять амплитуды гармоник.

Анализ кривой изменения магнитодвижущей силы (МДС) в ТГ предлагается выполнять следующим образом: расчётная ступенчатая кривая МДС раскладывается на гармонические составляющие.

На рис. 1 показан полупериод зависимости магнитодвижущей силы Φ , возникающей в обмотке катушечного типа. Результаты расчёта для такой формы МДС приведены в табл. 1.

Расчёт коэффициентов поглощения гармоник напряжения в обмотке статора производится по формуле:

$$C_n = \cos(n(1 - t_w)90^0), \quad (8)$$

где n – порядковый номер гармоники, t_w – шаг обмотки (для диаметрального $t_w = 1$, для сокращённого $t_w = 0,8$).

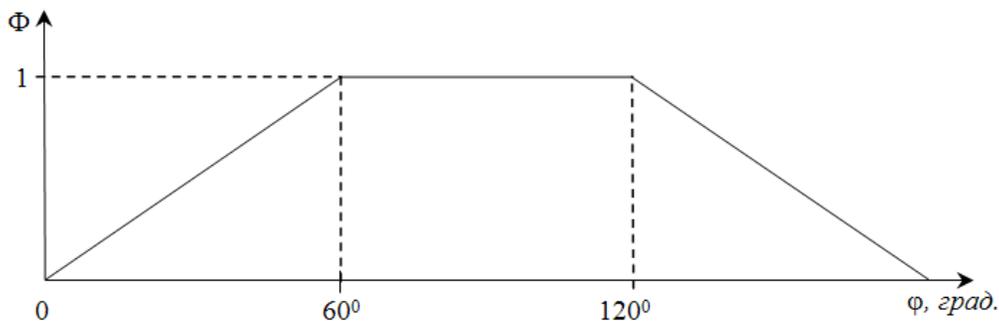


Рис. 1. Форма МДС

Таблица 1

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,7442	0,7078
	A_2	0	0
	A_3	0,0018	0,0010
	A_4	0	0
	A_5	0,0320	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0151	0,0089
	A_8	0	0
	A_9	0,0006	0,0006
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0071	0,0068
		$K_u = 4,8550$	$K_u = 1,5906$

Традиционно, для снижения высших гармонических укорачивают шаг обмотки. Однако, такое решение приводит к ухудшению массо-габаритных показателей ТГ.

Во-первых, так как в большинстве пазов статора находятся стержни разных фаз, то при сокращении шага обмотки это создает значительные динамические усилия на пазовые клинья.

Для уменьшения тока в стержнях обмоток крупных ТГ выполняются обмотки статора с двумя параллельными ветвями, что ведёт к росту числа пазов в два раза, увеличению диаметра и длины сердечника статора, а также массы ТГ.

Во-вторых, укорочение шага обмотки несущественно влияет на амплитуду высших гармоник магнитного поля, которые продолжают создавать добавочные потери и динамические усилия в сердечнике

статора, а также электромагнитные и акустические излучения во внешнюю среду.

Используемый в настоящее время метод не приемлем для использования в ТГ с двухфазной обмоткой возбуждения.

Из-за существенного ограничения зоны расположения фазной обмотки ухудшается гармонический состав напряжения и коэффициент K_u становится больше 5% (рис. 2 и табл. 2).

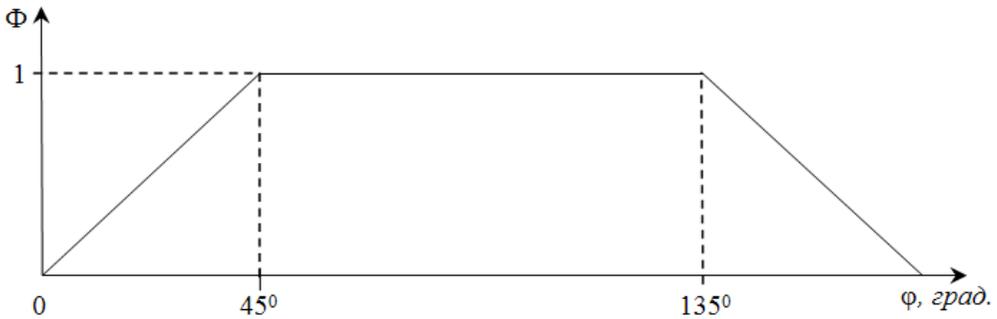


Рис. 2. Форма МДС

Таблица 2

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,8092	0,7696
	A_2	0	0
	A_3	0,0873	0,0513
	A_4	0	0
	A_5	0,0342	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0168	0,0099
	A_8	0	0
	A_9	0,0099	0,0094
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0060	0,0057
		$K_u = 11,8555$	$K_u = 6,9377$

В [7, 8] предложены новые методы решения этой проблемы за счёт модернизации обмоток ротора, а не статора. Эффективность использования вариантов новой конструкции однофазной обмотки возбуждения подтверждается результатами проведённого исследования гармонического состава МДС (рис. 3 и табл. 3).

Отношение МДС в зоне А и в зоне В составляет

$$\frac{\Phi_A}{\Phi_B} = \frac{\Phi(36^\circ)}{1 - \Phi(36^\circ)} = \frac{2}{1}. \quad (9)$$

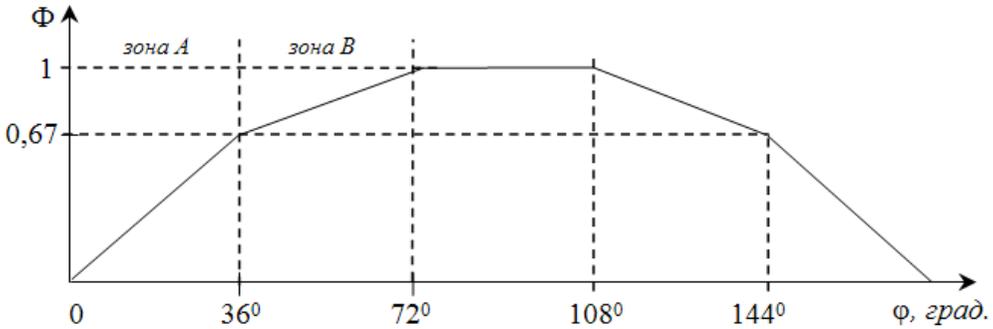


Рис. 3. Форма МДС

Таблица 3

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A ₁	0,7359	0,6999
	A ₂	0	0
	A ₃	0,0186	0,0109
	A ₄	0	0
	A ₅	0,0023	0
	A ₆	0	0
	A ₇	0,0038	0,0022
	A ₈	0	0
	A ₉	0,0091	0,0087
	A ₁₀	0	0
	A ₁₁	0,0055	0,0053
		$K_u = 2,9714$	$K_u = 2,1524$

Этот новый вариант обмотки предназначен для использования в ТГ с водяным охлаждением обмотки статора.

В [7] предложено использовать вариант модернизации гидрогенераторов путём замены явнополюсного ротора на неявнополюсный.

Данные для исследования гармонического состава приемлемой конструкции двухфазной обмотки "корзиночного" типа приведены на рис. 4.

Отношение МДС:

$$\frac{\Phi_A}{\Phi_B} = \frac{\Phi(15^\circ)}{1 - \Phi(15^\circ)} = \frac{1}{2}. \quad (10)$$

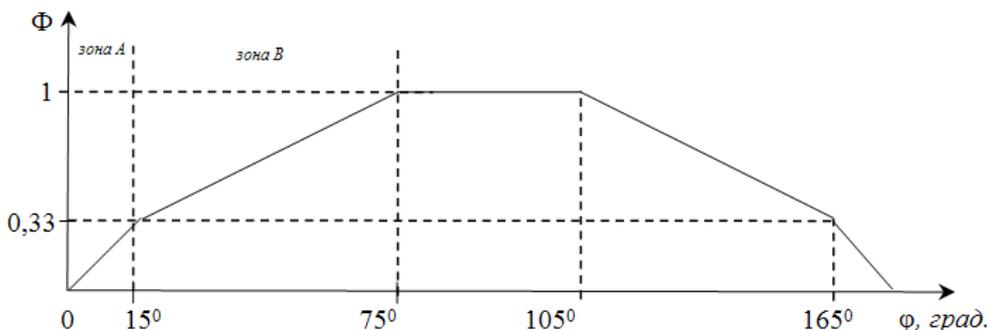


Рис. 4. Форма МДС

Таблица 4

Гармонический состав напряжения при различном исполнении обмотки статора

		Диаметральный шаг обмотки ($t_w = 1$)	Сокращённый шаг обмотки ($t_w = 0,8$)
Амплитуда гармоник	A_1	0,7013	0,6670
	A_2	0	0
	A_3	0,0030	0,0018
	A_4	0	0
	A_5	0,0255	0
	A_6	0	0
	A_7	0,0141	0,0083
	A_8	0	0
	A_9	0,0007	0,0007
	A_{10}	0	0
	A_{11}	0,0049	0,0046
		$K_u = 4,2354$	$K_u = 1,4521$

Этот вариант обмотки предназначен для использования в генераторах-двигателях с частотным регулированием оборотов (± 2 Гц).

В [8] показано, что использование новых конструкций обмоток ротора и статора позволяет значительно улучшить массо-габаритные параметры синхронного генератора (см. табл. 5).

При этом результаты анализа гармонического состава, приведённые в настоящей статье, показали, что отклонение формы напряжения от идеальной синусоиды не превышает допустимых значений.

Параметры современных серийных ТГВ и новой (ТАВ) конструкций турбогенераторов (320 МВт, 50 Гц, с водяным охлаждением обмотки статора)

Параметр	Значение параметра	
	ТГВ	ТАВ
Длина статора, м	5,0	2,8
Внутренний диаметр статора, м	1,28	0,96
Шаг обмотки статора, о.е.	0,8	1
Плотность тока в обмотке, А/мм ²	6	12
Диаметр ротора, м	1,12	0,84
График МДС	рис. 1	рис. 3
Охлаждающий газ	водород	воздух
Масса генератора, т	340	110

Выводы. Разработан метод определения гармонического состава напряжения ТГ, который в отличие от существующих методов анализа, построенных на преобразовании Фурье, работает в широком диапазоне нагрузок и позволяет на этапе выполнения проектных работ и в процессе эксплуатации исследовать кривые МДС. Метод построен на использовании формул Бесселя, и в отличие от существующих методов анализа, построенных на преобразовании Фурье, работает в широком диапазоне нагрузок. Приведен пример расчёта, который подтверждает правильность выбранных решений при модернизации ТГ.

Список литературы. 1. Шевченко В.В. Пути повышения мощности турбогенераторов при проведении работ по их реабилитации / В.В. Шевченко // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харьков: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – 2012. – №7 (105). – С. 152-155. **2.** Mohanta Rati Kanta Sources of vibration and their treatment in hydro power stations – A review / Rati Kanta Mohanta, Thanga Raj Chelliah, Srikanth Allamsetty, Aparna Akula, Ripul Ghosh // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2017. – Vol. 20. – P. 637-648. **3.** Selak Luka Condition monitoring and fault diagnostics for hydropower plants / Luka Selak, Peter Butala, Alojz Sluga // Computers in Industry. – 2014. – Vol. 65. – Iss. 6. – P. 924-936. **4.** Кузьмин В.В. Малозатратные и энергосберегающие технологии реабилитации турбогенераторов – основа технического перевооружения энергетики Украины / В.В. Кузьмин, А.Л. Лившиц, В.С. Шпаченко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах // Наука, освіта і практика. – 2011. – № 1. – С. 216-217. **5.** Носков В.И. Метод определения гармонического состава фазного тока статора асинхронного двигателя в системах регулируемых приводов / В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, М.В. Липчанский // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2015. – № 7 (132). – С. 59-61. **6.** Серебренников М.Г. Гармонический анализ / М.Г. Серебренников. – М.: ОГИЗ, ГОСТЕХИЗДАТ. – 1948. – 504 с. **7.** Новые концепции совершенствования электрооборудования ГЭС и ГАЭС. Рекомендации по модернизации генераторов и трансформаторов / В.В. Кузьмин, Т.В. Шпаченко, В.С. Шпаченко, Ю.Н. Бондаренко // Свідोцтво про реєстрацію авторського права на

твір № 65220. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 06.05.2016.
8. Режимы возбуждения и устойчивость работы синхронных генераторов. Системный подход к повышению эффективности генерирования и передачи мощности в больших энергосистемах / В.В. Кузьмин, Т.В. Шпатенко, В.С. Шпатенко // Свідोцтво про реєстрацію авторського права на твір № 64346. – Зареєстр. в Держ. службі інтелектуальної власності України 03.03.2016.

References:

1. Shevchenko, V.V. (2012), "Ways to increase the power of turbogenerators during rehabilitation works", *Information processing systems: research papers*, Kharkiv, Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, No. 7 (105), P. 152-155.
2. Mohanta Rati Kanta, Thanga Raj Chelliah, Srikanth Allamsetty, Aparna Akula, Ripul Ghosh (2017), "Sources of vibration and their treatment in hydro power stations – A review", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 20, pp. 637-648.
3. Luka Selak, Peter Butala, Alojzij Sluga (2014), "Condition monitoring and fault diagnostics for hydropower plants", *Computers in Industry*, Vol. 65, Iss. 6, pp. 924-936.
4. Kuzmin, V.V., Livshits, A.L., Shpatenko, V.S. (2011), "Low-cost and energy-saving technologies for the rehabilitation of turbogenerators - the basis for the technical re-equipment of the Ukrainian energy sector", *Problems of energy saving in electrical systems. Science, Education and Practice*, No. 1, pp. 216-217.
5. Noskov, V.I., Mezentsev, N.V., Gejko, G.V., Lipchanskij M.V. (2015), "The method for determination harmonic content of induction motors stator phase current in the systems of variable speed drives", *Information processing systems: research papers*, Kharkiv, Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, No. 7 (132), pp. 59-61.
6. Serebrennikov, M.G. (1948), *Harmonic analysis*, Moscow, OGI, GOSTEHIZDAT, 504 p.
7. Kuzmin, V.V., Shpatenko, T.V., Shpatenko, V.S., Bondarenko, Yu.N. (2016), *New concepts for improving the electrical equipment of HPS and HNPS. Recommendations for the modernization of generators and transformers*, Certificate of registration of copyright № 65220.
8. Kuzmin, V.V., Shpatenko, T.V., Shpatenko, V.S. (2016), *Excitation modes and stability of synchronous generators. A systematic approach to increasing the efficiency of generation and transmission of power in large power systems*, Certificate of registration of copyright № 64346.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Болюх В.Ф.

Поступила (received) 10.04.2017

Kuzmin Victor, Dr.Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Курпучова str., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (050) 323-55-60, e-mail: tiger3ttt@rambler.ru
ORCID ID: 0000-0001-5632-7473

Noskov Valentin, Dr.Tech.Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Курпучова str., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: val1942@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-7879-0706

Shpatenko Victor, engineer
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Курпучова str., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel.: +38 (050) 323-55-60, e-mail: tiger3ttt@rambler.ru

ORCID ID: 0000-0003-3902-4854

Gejko Gennadij, senior lecturer

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute "

Курпучова str., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: gennady1752@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-6958-8306

УДК 681.5.015

Аналіз гармонійного складу напруги синхронних генераторів / Кузьмін В.В., Носков В.І., Шпатенко В.С., Гейко Г.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 81 – 91.

Проаналізовано проблеми, які пов'язані з модернізацією синхронних генераторів великих електростанцій. Розроблено метод, що дозволяє визначити гармонійний склад напруги модернізованого генератора. Наведено результати розрахунків, по яких можна виконати оцінку правильності вибору оптимальної конструкції генератора. Ил.: 4. Табл.: 4. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: модернізація; синхронний генератор; гармонійний склад; оптимальна конструкція генератора.

УДК 681.5.015

Анализ гармонического состава напряжения синхронных генераторов / Кузьмин В.В., Носков В.И., Шпатенко В.С., Гейко Г.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 81 – 91.

Проанализированы проблемы, связанные с модернизацией синхронных генераторов крупных электростанций. Разработан метод, позволяющий определить гармонический состав напряжения модернизированного генератора. Приведены результаты расчётов, по которым можно выполнить оценку правильности выбора оптимальной конструкции генератора. Ил.: 4. Табл.: 4. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: модернизация; синхронный генератор; гармонический состав; оптимальная конструкция генератора.

UDC 681.5.015

The harmonic composition of the voltage synchronous generators analysis / Kuzmin V.V., Noskov V.I., Shpatenko V.S., Gejko G.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 81 – 91.

The problems connected with the modernization of large power plants synchronous generators are analyzed. A method that makes it possible to determine the harmonic composition of the modernized generator voltage has been developed. The results of calculations on which it is possible to evaluate the correctness of the choice of generator optimal design are presented. Figs.: 4. Tabl.: 4. Refs.: 8 titles.

Keywords: modernization; synchronous generator; harmonic composition; generator optimal design.