

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В МОДЕЛИ ИЗОЛЯЦИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДЕФЕКТОМ

А.В. Коржов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В работе представлены экспериментальные результаты исследований влияния переменного магнитного поля на изменение параметров частичных разрядов в модели изоляции с распределенным дефектом. Исследования проведены на разработанной экспериментальной установке, модели изоляции и согласно авторской методике эксперимента. Практическим результатом исследований является подтверждение влияния магнитного поля на изменения амплитуды, количества импульсов и интенсивность частичных разрядов. Проведен анализ полученных рядов данных на достоверность различия с применением математических методов. По результатам анализа фазово-распределённых картин возникновения частичных разрядов установлено повторяющееся появление дополнительных разрядов в новых фазовых окнах при дополнительном воздействии переменного магнитного поля.

Ключевые слова: кабельные линии, изоляция, частичные разряды, магнитное поле.

Введение

В настоящее время в условиях эксплуатации широко применяется диагностика состояния изоляции по параметрам частичных разрядов (ЧР). Однако теория, описывающая влияние различных режимных параметров, климатических факторов, факторов, определяющих старение изоляции на изменение параметров частичных разрядов, в полном объеме не разработана [1–6].

К наименее исследованному фактору следует отнести магнитное поле (МП), обусловленное токовой нагрузкой в рабочем и аварийных режимах работы изоляции энергетического оборудования. Известны только несколько работ в данной области, например, [7–11]. Как правило, проведенные исследования ориентировались применительно к изоляции силового трансформатора и рассматри-

валось влияние постоянных магнитных полей, а также не рассматривалось изменение параметров ЧР в случае сложных распределенных дефектов.

1. Методика исследования

Для исследования влияния МП на изменение параметров частичных разрядов в воздушном включении в изоляции была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Установка включала: № 1 – модель воздушного включения с распределённым дефектом (на верхней поверхности воздушного промежутка был расположен один электрод, на нижней поверхности – пять, показаны точками на рис. 1); электроды в модели были изготовлены из латуни; № 2 – специально разработанную ячейку для создания внешнего переменного магнитного поля 50 Гц, в которую помещалась

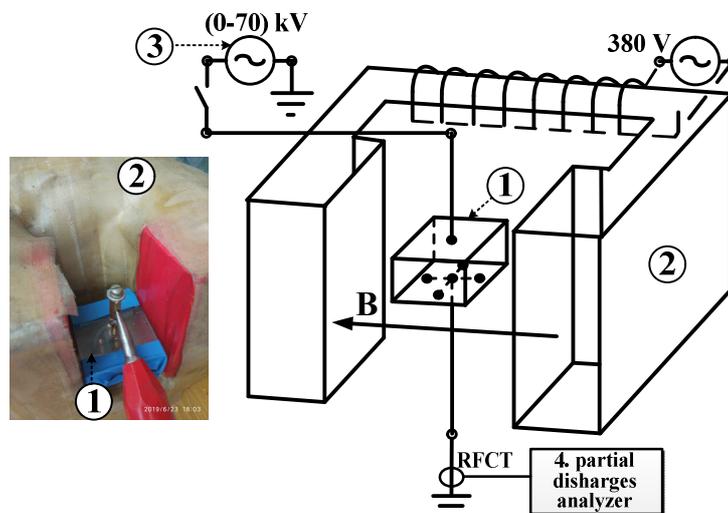


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и модели воздушного включения с распределенным дефектом

модель изоляции. Амплитудное значение индукции МП в области размещения модели составляло до 30 мТл. Силовые линии магнитного поля были направлены перпендикулярно по отношению к модели. Измерение распределения магнитного поля в области размещения модели изоляции проводилось с использованием прибора Narda; № 3 – регулируемый источник высокого напряжения до 70 кВ, 50 Гц; № 4 – регистратор ЧР R-400. Эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении и температуре в помещении 20–22 °С.

Регистрация параметров ЧР проводилась по ранее разработанной методике [11] в следующем порядке. Шаг № 1 – модель отключена от высоковольтной установки и нет воздействия переменного МП. Шаг № 2 – модель только под воздействием МП. Первые два шага использовались для оценки возможных помех. Переход к следующему шагу происходил в случае, если регистратор ЧР

показывал отсутствие ЧР. Шаг № 3 – подача на модель напряжения 4,5 кВ от регулируемого источника питания. Шаг № 4 – при неизменном напряжении, поданном на модель на этапе № 3, дополнительно включается ячейка для создания внешнего переменного магнитного поля. После проведения замера на шаге № 4 отключалась ячейка, создающая МП, и снова производится замер параметров ЧР только при воздействии ЭП, обусловленного поданным на шаге № 3 напряжением. Далее циклы опытов на шагах № 3 и 4 повторяются, что приводит к формированию экспериментальной выборки.

2. Результаты исследования и их анализ

На рис. 2 представлена экспериментальная выборка, включающая 100 замеров по изменению амплитуды импульсов ЧР, интенсивности и количества импульсов ЧР. На диаграммах параметр

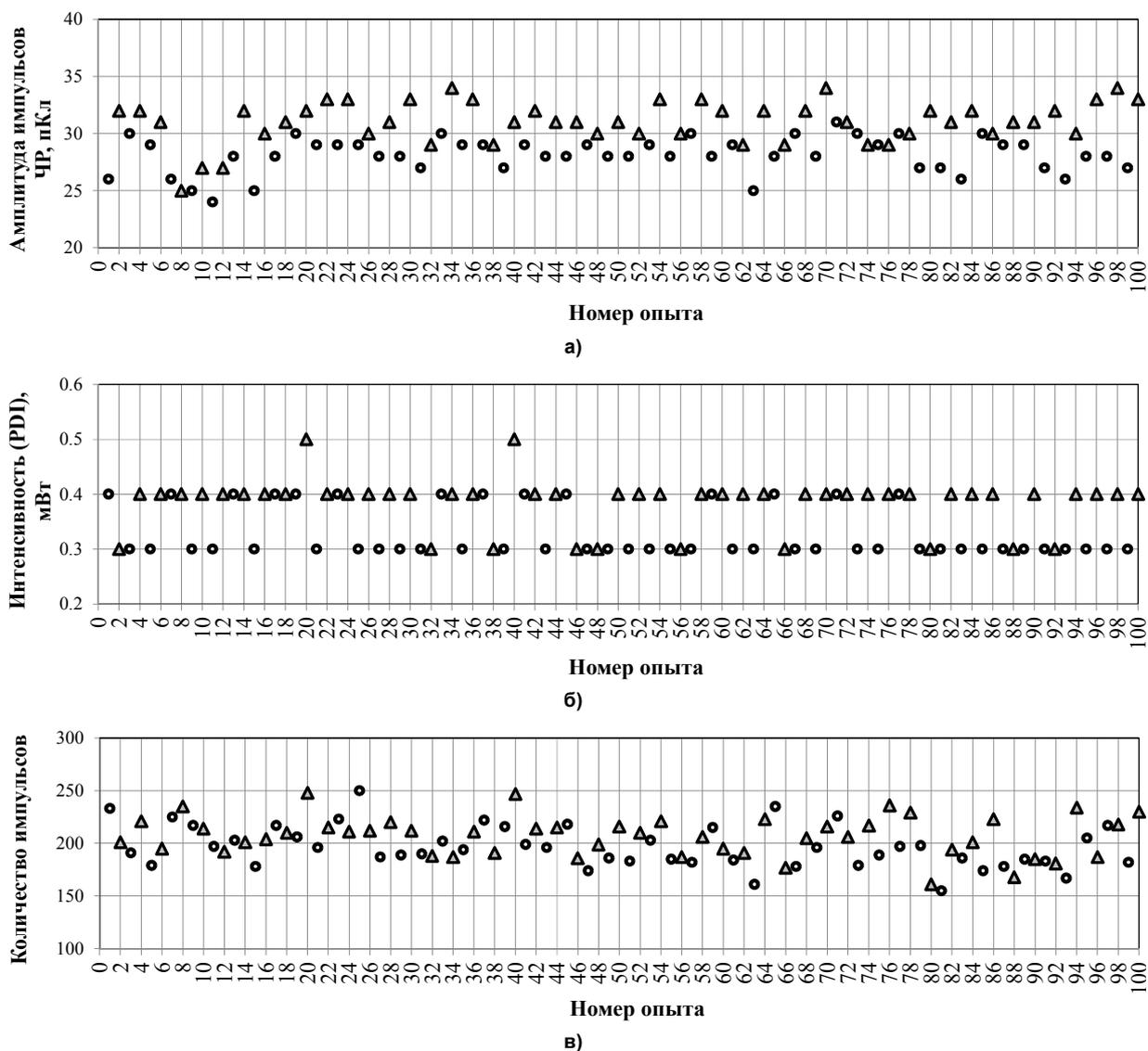


Рис. 2. Экспериментальные выборки по изменению параметров ЧР: а) амплитуды импульсов; б) интенсивности; в) количества импульсов

замера при воздействии ЭП обозначен маркером «круг», при дополнительном воздействии МП – маркером «треугольник». Для оценки достоверности различия установленных рядов данных была проведена математическая обработка с применением непараметрического критерия Колмогорова – Смирнова. Сравнение показало достоверное различие выборок на уровне значимости $p \leq 0,05$, что подтверждает влияние МП.

В анализируемой выборке при дополнительном воздействии МП количество импульсов ЧР увеличивалось в среднем до 5%; интенсивность импульсов – до 14%; амплитуда – до 10%.

Одним из механизмов влияния переменного МП на параметры ЧР в случае модели изоляции с распределенным дефектом (неоднородная изоля-

ция) является увеличение числа возможных путей для пробоя вследствие смещения линий тока лоренцевской силой [11].

Для получения диаграмм частичных разрядов с распределением по фазе и амплитуде регистратор ЧР был синхронизирован с питающей сетью. На рис. 3 показаны фазово-распределенные картины возникновения частичных разрядов в модели изоляции в двух следующих друг за другом парах опытов. В каждой паре первый замер только под воздействием напряжения (рис. 3а, в), второй – при дополнительном воздействии переменного МП (рис. 3б, г).

Характеристики ЧР в положительный и отрицательный полупериоды для замеров, которые представлены на рис. 3, представлены в таблице.

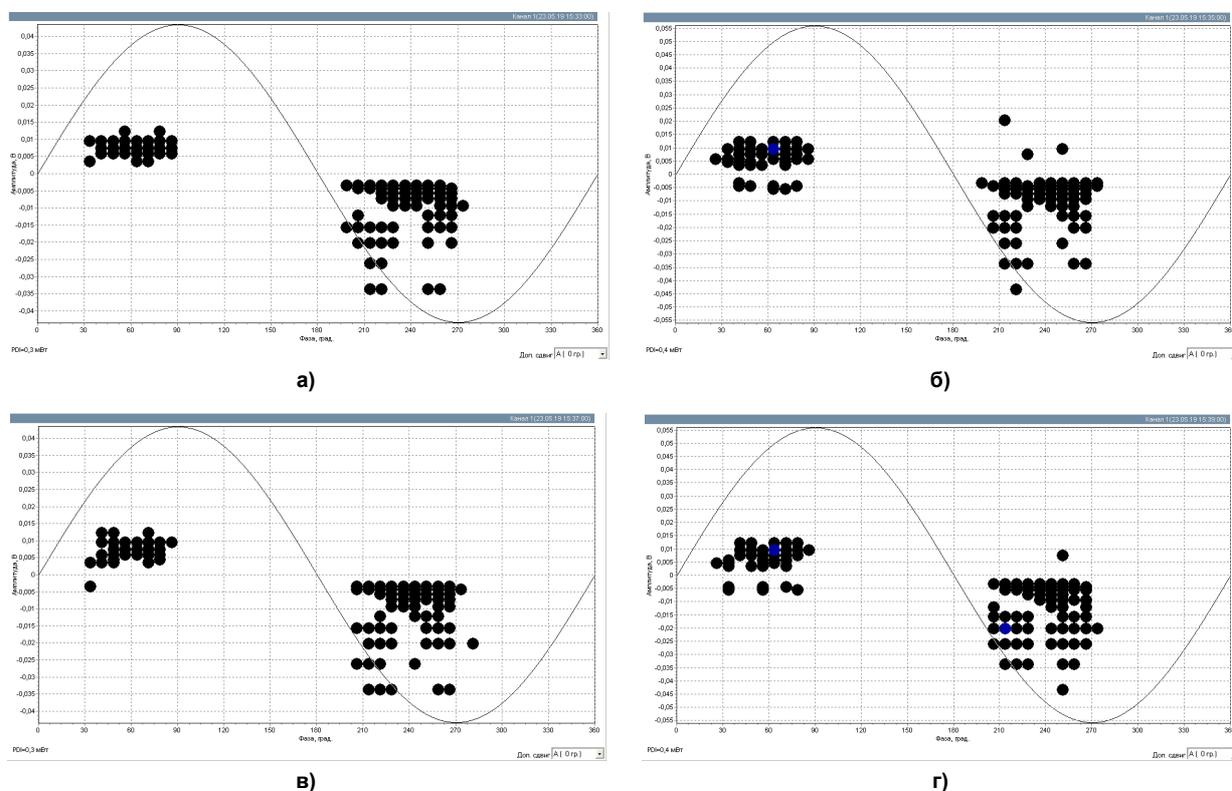


Рис. 3. Диаграмма распределения ЧР по фазе и амплитуде: а) модель под напряжением, без воздействия МП; б) модель под напряжением, с воздействием МП; в) модель под напряжением, без воздействия МП; г) модель под напряжением, с воздействием МП

Характеристики ЧР в модели изоляции с распределенным дефектом

Таблица

Характеристики ЧР в положительный и отрицательный полупериоды	[+]&[-]	[+]	[-]
Модель в режиме холостого хода, $U = 0$ кВ, $B = 0$ мТл			
Амплитуда (Q02), мВ	0	0	0
Интенсивность (PDI), мВт	0,0	0,0	0,0
Количество импульсов	0	0	0
Рис. 3а: Модель под напряжением переменного тока 4,5 кВ			
Амплитуда (Q02), мВ	28	10	28
Интенсивность (PDI), мВт	0,3	0,1	0,2
Количество импульсов	217	76	141

Окончание таблицы

Характеристики ЧР в положительный и отрицательный полупериоды	[+]&[-]	[+]	[-]
Рис. 3б: Модель под воздействием напряжения 4,5 кВ и под воздействием МП $B = 30$ мТл			
Амплитуда (Q02), мВ	34	11	34
Интенсивность (PDI), мВт	0,4	0,1	0,3
Количество импульсов	218	85	133
Рис. 3в: Модель под воздействием напряжения 4,5 кВ			
Амплитуда (Q02), мВ	27	10	27
Интенсивность (PDI), мВт	0,3	0,0	0,2
Количество импульсов	182	68	114
Рис. 3г: Модель под воздействием напряжения 4,5 кВ и под воздействием МП $B = 30$ мТл			
Амплитуда (Q02), мВ	33	11	33
Интенсивность (PDI), мВт	0,4	0,1	0,3
Количество импульсов	230	77	153

Как правило, частичные разряды возникают на фазе приложенного напряжения от 0 до 90° и от 180 до 270°, где dU/dt возрастает. Следует отметить, что в случае дополнительного воздействия магнитного поля наблюдались частичные разряды в новых фазовых окнах. Так, например, на рис. 3б активность частичных разрядов при дополнительном влиянии переменного МП можно было наблюдать в диапазонах фазового угла: 26,25–86,25° и 41,25–78,75° для положительного полупериода; 198,75–273,75° и 213,75–251,25° – для отрицательного полупериода приложенного напряжения. Далее при отключении воздействия магнитного поля ЧР в данных фазовых зонах не наблюдались (см. рис. 3в). Однако они снова возникали при последующем включении магнитного поля (см. рис. 3г).

Заключение

1. Полученные результаты исследований подтверждают предположения о дополнительном влиянии переменного магнитного поля на параметры частичных разрядов, что делает фазово-распределенные диаграммы частичных разрядов более сложными.

2. Возможные причины: под действием МП могут формироваться новые траектории частичных разрядов внутри группы взаимосвязанных дефектов вследствие смещения линий тока лоренцевской силой; могут появиться дополнительные продольные дендритные каналы; может быть затронуто распределение заряженных частиц.

3. Необходимо продолжить исследования влияния переменного магнитного поля на параметры частичных разрядов на различных моделях с распределенными дефектами, моделирующими реальные известные дефекты в изоляции электро-технических устройств.

Литература

1. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
2. Овсянников, А.Г. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов / А.Г. Овсянников, С.М. Коробейников, Д.В. Вагин // *Электричество*. – 2014. – № 8. – С. 37–43.
3. Куперитох, А.Л. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении / А.Л. Куперитох, С.П. Стамателатос, Д.П. Агорис // *Письма в ЖТФ*. – 2006. – Т. 32, вып. 15. – С. 74–75.
4. Похолков, Ю.П. Физика диэлектриков (область слабых и сильных полей): лабораторный практикум / Ю.П. Похолков, В.И. Меркулов, А.В. Петров. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 132 с.
5. Сканави, Г.И. Физика диэлектриков / Г.И. Сканави. – М., СПб.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1945. – 500 с.
6. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергия, 1973. – 328 с.
7. Magnetic field disturbance of partial discharge activity in a cone-plane gap / D.M. Hepburn, B.G. Stewart, L.A. Dissado, J.C. Fothergil // *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo. – Nashville, America, Oct. 22–24. – 2007. – P. 142–145. DOI: 10.1109/eic.2007.4562606*
8. Hepburn D.M. Magnetic field effect on partial discharge activity in oil / D.M. Hepburn, B.G. Stewart // *Intern. Electr. Insul. Conf., Birmingham, U.K. – 2009. – P. 56–61.*
9. Reid, A.J. The Influence of External Magnetic Fields on the Partial Discharge Characteristics of Voids / A.J. Reid, D.M. Hepburn, B.G. Stewart // *Electrical Insulation Conference (EIC). – June 2013. – P. 147–150. DOI: 10.1109/eic.2013.6554222*

10. Influence of leakage magnetic fields on partial discharge activity in power transformers / J.M.M. Tarifa, J.R. Conde, G. Robles, J.S. Feito // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* – 2010. – Vol. 17, no. 6. – P. 1724–1730. DOI: 10.1109/tdel.2010.5658222

11. Korzhov, A.V. Effect of magnetic field on partial discharge parameters in power cables and on the breakdown characteristics of impregnated paper insulation / A.V. Korzhov // *Journal of Electrostatics.* – 2018. – Vol. 96. – P. 169–176. DOI: 10.1016/j.elstat.2018.11.001

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; korzhovav@susu.ru.

Поступила в редакцию 5 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/power200407

IMPACT OF MAGNETIC FIELD ON VARIATION OF PARTIAL DISCHARGES PARAMETERS IN THE INSULATION MODEL WITH A DISTRIBUTED DEFECT

A.V. Korzhov, korzhovav@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents the experimental results of studies into the influence of an alternating magnetic field on the changes in the partial discharges parameters in the model of insulation with a distributed defect. The studies were carried out on a developed experimental setup, isolation model and based on the author's experimental technique. The research confirms the influence of the magnetic field on changes in the amplitude, number of pulses and intensity of partial discharges in practice. The analysis of the obtained data series for the reliability of differences was carried out using mathematical methods. Based on the results of the analysis of the phase-distributed patterns of the occurrence of partial discharges, the repeated appearance of additional discharges in new phase windows under the additional action of an alternating magnetic field was established.

Keywords: cable lines, insulation, partial discharges, magnetic field.

References

1. Kuchinskiy G.S. *Chastichnyye razryady v vysokovol'tnykh konstruktsiyakh* [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
2. Ovsyannikov A.G., Korobeynikov S.M., Vagin D.V. [Relationship of apparent and true charges of partial discharges]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 8, pp. 37–43. (in Russ.)
3. Kupershtokh A.L., Stamatelatos S.P., Agoris D.P. [Modeling of partial discharges in solid dielectrics at AC voltage]. *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2006, vol. 32, iss. 15, pp. 74–75. (in Russ.)
4. Pokholkov Yu.P., Merkulov V.I., Petrov A.V. *Fizika dielektrikov (oblast' slabykh i sil'nykh poley): laboratornyy praktikum* [Physics of dielectrics (area of weak and strong fields): laboratory workshop]. Tomsk, TPU Publ., 2003. 132 p.
5. Skanavi G.I. *Fizika dielektrikov* [Physics of dielectrics]. Moscow, Saint Petersburg, Publishing house of technical and theoretical literature, 1945. 500 p.
6. Tareyev B.M. *Fizika dielektricheskikh materialov* [Dielectric Materials Physics]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 328 p.
7. Hepburn D.M., Stewart B.G., Dissado L.A., Fothergil J.C. Magnetic field disturbance of partial discharge activity in a cone-plane gap. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, Nashville, America, Oct. 22–24, 2007, pp. 142–145. DOI: 10.1109/eeic.2007.4562606
8. Hepburn D.M., Stewart B.G. Magnetic field effect on partial discharge activity in oil. *Intern. Electr. Insul. Conf., Birmingham, U.K.*, 2009, pp. 56–61.

9. Reid A.J., Hepburn D.M., Stewart B.G. The Influence of External Magnetic Fields on the Partial Discharge Characteristics of Voids. *Electrical Insulation Conference (EIC)*, June 2013, pp. 147–150. DOI: 10.1109/eic.2013.6554222

10. Tarifa J.M.M., Conde J.R., Robles G., Feito J.S. Influence of leakage magnetic fields on partial discharge activity in power transformers. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 1724–1730. DOI: 10.1109/tdei.2010.5658222

11. Korzhov A.V. Effect of magnetic field on partial discharge parameters in power cables and on the breakdown characteristics of impregnated paper insulation. *Journal of Electrostatics*, 2018, vol. 96, pp. 169–176. DOI: 10.1016/j.elstat.2018.11.001

Received 5 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Коржов, А.В. Влияние магнитного поля на изменение параметров частичных разрядов в модели изоляции с распределенным дефектом / А.В. Коржов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 64–69. DOI: 10.14529/power200407

FOR CITATION

Korzhov A.V. Impact of Magnetic Field on Variation of Partial Discharges Parameters in the Insulation Model with a Distributed Defect. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 64–69. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200407