

УДК 621.313; 621.314

А. М. ГАЛИНОВСКИЙ, Е. А. ЛЕНСКАЯ

### ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕРЕВЕРСИВНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА УПРАВЛЕНИЯ

Приведены методики расчета характеристик нереверсивных тиристорных выпрямителей бесконтактных синхронных машин в зависимости от угла управления тиристорами. Расчет моделей тиристорных выпрямителей проводится в системе схемотехнического моделирования в квазиустановившихся или переходных режимах работы. При расчете моделей выпрямителей в переходных режимах работы ограничивается число величин, текущие числовые значения которых записываются в оперативную память программы. Расчет проводится при частоте управления тиристорами меньшей частоты источника питания выпрямителя.

**Ключевые слова:** бесконтактная, синхронная, машина, выпрямитель, тиристор, угол, управление.

**Введение.** В бесконтактных синхронных машинах (БСМ) применяются диодные или тиристорные бесконтактные системы возбуждения (БСВ). К БСВ предъявляются требования [1]: быстродействие регулирования; высокое качество формы выходного напряжения.

В диодных БСВ сравнительно хорошее качество формы выходного напряжения. Требуемая скорость форсировки возбуждения БСМ достигается повышением напряжения возбуждения возбудителя. Главный недостаток диодной БСВ – медленное гашение поля.

Тиристорные БСВ практически безинерционны. При этом технико-экономические показатели тиристорных возбудителей (ТВ) невысоки. Регулирование нагрузки ТВ в основном осуществляется углом управления тиристорами, что приводит к существенному ухудшению качества формы выходного напряжения в номинальном режиме работы. Низкое качество формы выходного напряжения – главный недостаток тиристорной БСВ.

Качество кривой выходного напряжения может быть существенно улучшено при применении многофазного возбудителя. В бесконтактных синхронных турбогенераторах применяются возбудители с числом фаз якорных обмоток  $m = 44$  [1] и более.

Для совершенствования тиристорных БСВ необходим полный анализ характеристик многофазных тиристорных выпрямителей в зависимости от угла управления тиристорами с учетом коммутационных перенапряжений, качества форм напряжений и токов, потерь на элементах системы. Подобный анализ нельзя выполнить аналитическими методами [2, 3].

В работах [4, 5] обосновывается методика расчета параметров защитных цепей многофазных диодных выпрямителей.

В работах [6-8] приводятся методики расчета характеристик многофазных диодных выпрямителей в системе схемотехнического моделирования Micro Cap.

**Цель работы** – разработка методик расчета нереверсивных тиристорных выпрямителей в зависимости от угла управления тиристорами в системе схемотехнического моделирования.

**Материал и результаты исследований.** На рис. 1 показана электрическая схема модели многофазного мостового тиристорного выпрямителя в системе схе-

мотехнического моделирования Micro Cap. На схеме:  $V_1 - V_m$  – источники ЭДС;  $r_{i1} = r_{i2} = \dots = r_{im} = r_i$ ,  $x_{i1} = x_{i2} = \dots = x_{im} = x_i$  – активные и индуктивные сопротивления источника питания (источника); тиристоры  $T_{a1} \div T_{am}$  и  $T_{k1} \div T_{km}$  шунтируются защитными RC-цепями;  $R_d$ ,  $L_d$  – активное сопротивление и индуктивность нагрузки;  $V_{1к} - V_{mк}$  – дополнительные источники ЭДС, фазы которых смещены на  $90^\circ$  по отношению к одноименным фазам ЭДС основного источника питания. Цепи «управляющий электрод – катод» тиристоров шунтированы сопротивлениями смещения  $R_s$ .

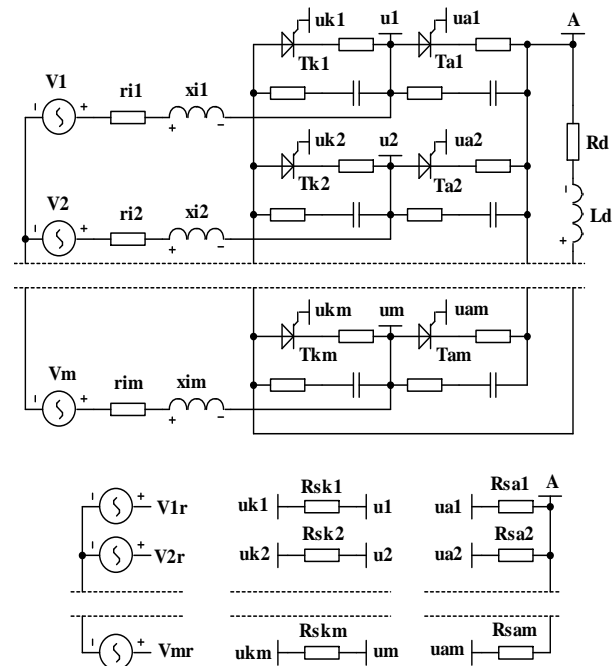


Рис. 1 – Схема модели многофазного мостового тиристорного выпрямителя в системе Micro Cap

Расчет параметров защитных цепей вентилей выпрямителей БСМ проводится при ограничении перенапряжений во всех возможных режимах работы выпрямителя [4, 5]. Минимальная емкость трехфазного мостового выпрямителя  $C_{Fmin} = 4 \cdot \tau_w^2 / (9 \cdot L_i)$ , где  $\tau_w$  – время восстановления запирающих свойств вентилей. Активное сопротивление, определяемое на границе

© А. М. Галиновский, Е. А. Ленская, 2015

апериодического режима переходного процесса,  $R_{fm} = \sqrt{3} \cdot \tau_w / C_{Fmin}$ . Емкость защитной цепи трехфазного мостового выпрямителя  $C_{F3} = k_{CF} \cdot C_{Fmin}$ , где  $k_{CF} = 2 \div 5$ . Активное сопротивление  $R_F = k_{RF} \cdot R_{Fm}$ , где  $k_{RF} < k_{CF}$ . В m-фазном мостовом выпрямителе  $C_{Fm} \approx 3C_{F3}/m$ . В выпрямителе с нулевой схемой преобразования  $C_F$  в два раза больше, чем в мостовом (трехфазном или многофазном) выпрямителе.

При анализе выпрямителей применяется система относительных единиц нагрузки неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя (о.е.н.), в которой базовыми величинами приняты напряжение холостого хода и ток короткого замыкания:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} A_i; I_{dk} = \frac{A_i}{z_i}; U_{d*} = \frac{U_d}{U_{d0}}; I_{d*} = \frac{I_d}{I_{dk}},$$

где  $A_i, z_i$  – амплитуда ЭДС и полное сопротивление трехфазного источника.

Методики расчета тиристорных выпрямителей БСМ в системе схемотехнического моделирования разработаны на базе методик расчета диодных выпрямителей [6-8]. Алгоритм расчета тиристорных выпрямителей приведен в табл. 1. Принятые обозначения:  $I_d, U_d, P_d$  – ток, напряжение и мощность нагрузки выпрямителя;  $P_{i1}, Q_{i1}, S_{i1}, \cos\phi_1$  – активная, реактивная, полная мощность, коэффициент мощности источника;  $p_T, p_{Rf}, p_{RS}, p_{ri}$  – потери на тиристорах, в защитных цепях вентилей, на сопротивлениях смещения и в источнике соответственно;  $p_{\Sigma}$  – суммарные потери;  $\Delta p$  – погрешность определения активных мощностей;  $\eta$  – КПД выпрямителя;  $I_i, I_{i1}$  – действующие значения полного тока и 1-ой гармоники тока источника;  $\lambda_i = I_{i1}/I_i; k_{i1} = I_d/I_i; k_S$  – коэффициент увеличения расчетной мощности источника;  $I_{d*} \cdot U_{d*}$  – ток и напряжение нагрузки в о.е.н.;  $k_{iu}$  – коэффициент высших гармоник напряжения выпрямителя;  $k_{su}$  – коэффициент искажения напряжения выпрямителя;  $M_Z = z_i/R_d$  – относительная величина сопротивления источника питания.

Характеристики выпрямителей строятся по результатам расчетов в квазиустановившихся или переходных режимах работы при интегрировании величин по времени. При расчете в переходных режимах работы в оперативную память записываются только текущие числовые значения величин  $i_d, u_d, p_{i1}, q_{i1}, i_i, p_T, p_{Rf}$  и  $p_{RS}$  (пункты № 1-8 табл. 1), частота управления тиристорами меньше частоты источника питания  $f_i$ .

Построим характеристики трехфазного мостового тиристорного выпрямителя в зависимости от угла управления тиристорами  $\alpha_u$  при коротком замыкании с режима холостого хода.

Параметры схемы. Источник питания:  $A_i = 80.5$  В;  $f_i = 100$  Гц ( $f_i = 400$  Гц);  $z_i = 0.93$  Ом. Тиристоры типа B25RIA120, время восстановления запирающих свойств  $t_w = 2.55$  мкФ,  $R_S = 500$  Ом. Защитная цепь:  $k_{CF} = 5; k_{RF} = 0.6 \cdot k_{CF}$ . Нагрузка:  $L_D = 0.07$  Гн. Блок сигналов управления: частота управления  $f_u = 99.75$  Гц; длительность сигналов управления  $T_{SU} = 120^\circ$ .

Таблица 1 – Алгоритм расчета тиристорных выпрямителей

№ п./п.	Обозначение	Единицы измерения	Формула
1	$I_d$	А	$\frac{1}{T} \int_0^T i_d dt$
2	$U_d$	В	$\frac{1}{T} \int_0^T u_d dt$
3	$P_{i1}$	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n e_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$
4	$Q_{i1}$	ВАР	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n e_{ij}' \cdot i_{ij} \right) dt$
5	$I_i$	А	$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m} \sum_m i_{ij}^2} dt$
6	$p_T$	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n u_{Tj} \cdot i_{Tj} \right) dt$
7	$p_{Rf}$	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n i_{Fj}^2 R_F \right) dt$
8	$p_{RS}$	Вт	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_n i_{RS}^2 \cdot R_S \right) dt$
9	$S_{i1}$	ВА	$\sqrt{P_{i1}^2 + Q_{i1}^2}$
10	$I_{i1}$	А	$S_{i1} / (m_i \cdot E_i)$
11	$P_d$	Вт	$U_d \cdot I_d$
12	$p_{ri}$	Вт	$m \cdot I_i^2 \cdot r_i$
13	$p_{\Sigma}$	Вт	$P_{i1} + p_T + p_{Rf} + p_{RS}$
14	$\Delta p$	-	$\frac{P_{i1} - P_d - p_{\Sigma}}{P_{i1} + P_d + p_{\Sigma}}$
15	$I_{d*}$	о.е.н.	$I_d / I_{dk}$
16	$U_{d*}$	о.е.н.	$U_d / U_{d0}$
17	$k_{i1}$	-	$I_d / I_{i1}$
18	$\lambda_i$	-	$I_{i1} / I_i$
19	$\cos\phi_1$	-	$P_{i1} / S_{i1}$
20	$\eta$	-	$P_d / P_{i1}$
21	$k_S$	-	$1 / (\cos\phi_1 \cdot \lambda \cdot \eta)$
22	$k_{iu}$	-	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{u_d}{U_d} \right)^2 - 1} dt$
23	$k_{su}$	-	$\sqrt{1 + k_{iu}^2}$
24	$M_Z$	-	$\pi \cdot I_{d*} / (3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{d*})$

На рис. 2 показаны внешние характеристики выпрямителя при  $\alpha_u = 0^\circ, \alpha_u = 60^\circ$  и разных значениях относительной величины активного сопротивления источника питания ( $k_r = r_i/x_i$ ): 1)  $k_r = 0$ ; 2)  $k_r = 0,25$ ; 3)  $k_r = 0,5$ ; 4)  $k_r = 0,75$ ; 5)  $k_r = 1$ .

На рис. 3 – напряжение и ток нагрузки выпрямителя в зависимости от угла управления при  $k_r = 0.172, R_d = 7$  Ом. Из рисунка: изменение угла управления ти-

ристорами от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$  не приводит к увеличению наибольшего напряжения на тиристорах.

На рис. 4 показаны расчетные соотношения (а) и потери выпрямителя (б) в зависимости от угла управления тиристорами при  $f_i = 100$  Гц (сплошные линии) и  $f_i = 400$  Гц (пунктирные линии).

С изменением угла управления тиристорами остаются практически неизменными коэффициент связи

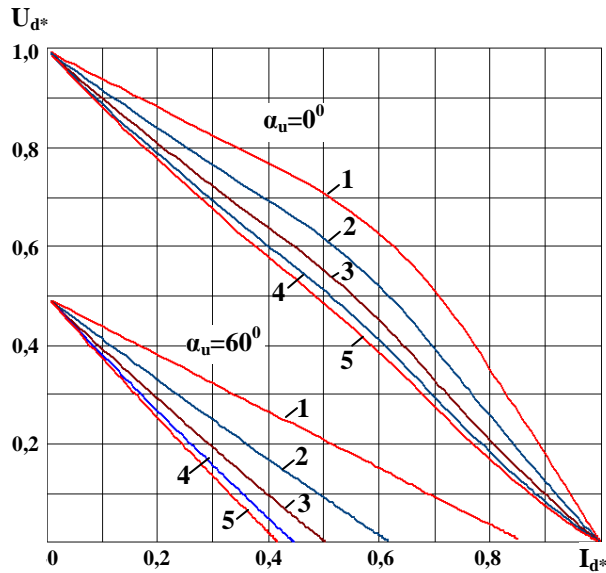


Рис. 2 – Внешние характеристики трехфазного мостового тиристорного выпрямителя при  $\alpha_u = 0^{\circ}$ ,  $\alpha_u = 60^{\circ}$  и разных величинах коэффициента  $k_T$

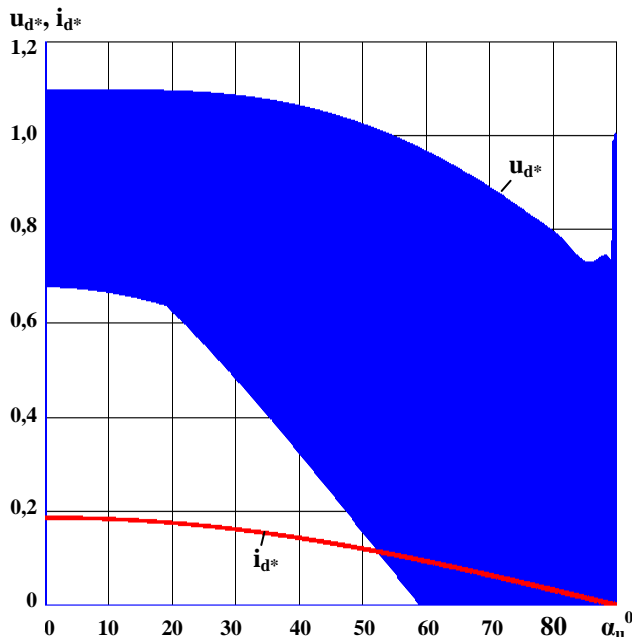


Рис. 3 – Напряжение и ток нагрузки трехфазного мостового тиристорного выпрямителя в зависимости от угла  $\alpha_u$  при номинальном сопротивлении нагрузки

**Выводы.**

1. Созданы методики расчета характеристик вращающихся нереверсивных тиристорных выпрямителей бесконтактных синхронных машин (БСМ) в зависимости от угла управления тиристорами. В основу

между токами нагрузки и источника питания выпрямителя  $k_{i1}$ , коэффициент искажения тока источника  $\lambda_i$ . Расчетные соотношения  $k_s$ ,  $k_{su}$ ,  $k_{i1}$ ,  $\lambda_i$ ,  $\eta_p$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $u_{d*}$  и потери  $p_{ri}$ ,  $p_T$  практически не зависят от частоты источника питания  $f_i$ . От частоты  $f_i$  существенно зависят потери на защитных цепях вентилей  $p_{Rf}$ .

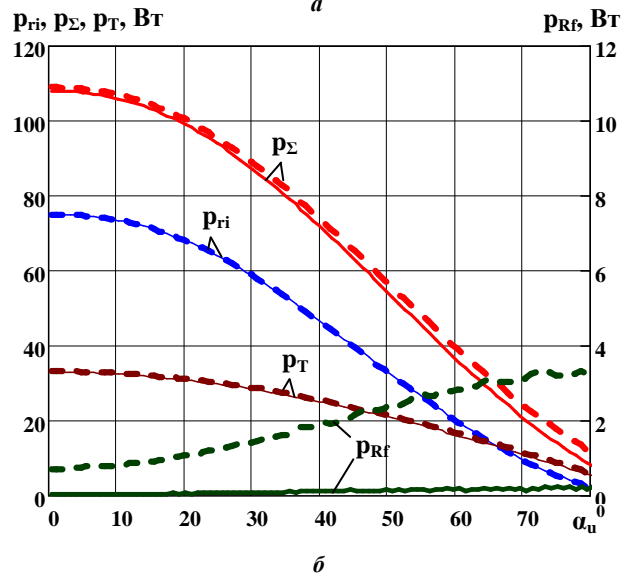
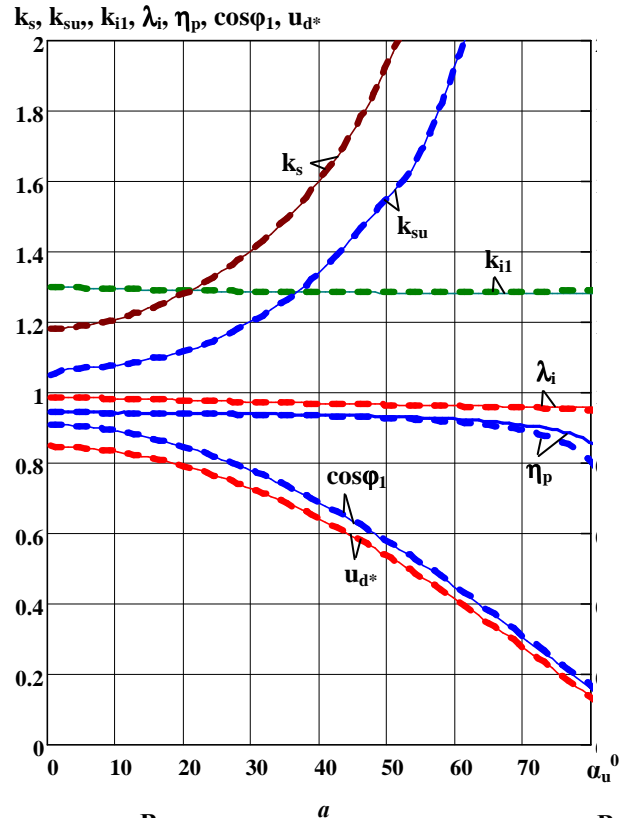


Рис. 4 – Расчетные соотношения (а) и потери (б) трехфазного мостового тиристорного выпрямителя в зависимости от угла  $\alpha_u$  при  $f_i = 100$  Гц и  $f_i = 400$  Гц

положены методики расчета моделей диодных выпрямителей БСМ в системе схемотехнического моделирования. При создании методик расчета выпрямителей принято известное допущение о синусоидальности результирующей ЭДС воздушного зазора вспомо-

гательной электрической машины БСМ. Характеристики выпрямителей рассчитываются при интегрировании величин по времени в квазиустановившихся или переходных режимах работы.

2. Расчет защитных цепей тиристорных выпрямителей проводится при угле управления  $\alpha_u = 0^0$  аналогично методике расчета диодных выпрямителей. При этом изменение угла управления тиристорами от  $0^0$  до  $90^0$  не приводит к увеличению наибольшего напряжения на тиристорах.

3. Полученные закономерности изменений расчетных соотношений тиристорных выпрямителей в зависимости от угла управления тиристорами позволяют совершенствовать методику проектирования тиристорных возбудителей, провести сопоставительный анализ диодных и тиристорных возбудителей БСМ.

**Список литературы:** 1. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин // Ленинград. – Наука. – 1988. – 322 с. 2. Беркович Е. И., Ковалев В. Н., Ковалев Ф. И. и др. Полупроводниковые выпрямители // М.– Энергия. – 1978. – 448 с. 3. Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей // Ленинград. – Энергоатомиздат. – 1983. – 128 с. 4. Галиновский А.М., Ленская А.М., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2005. – №4. – С. 43-50. 5. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Сенько В.И., Анпилогов Н.Г. Коммутационные перенапряжения в многофазных преобразователях // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Одеський НПП. – Київ. – Техніка. – 2011. – № 03 (79). – С. 319-322. 6. Галиновский А.М. Параметры и характеристики полупроводниковых выпрямителей вентильных генераторов // Гірнична електромеханіка та автоматика: на-

ук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 88. – С. 48-54. 7. Галиновский А.М., Бабенко О.Ю., Ленская Е.А. Определение основных соотношений выпрямителей вентильных генераторов по результатам расчетов переходных режимов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2012. – № 3. – С. 425-430. 8. Галиновский А.М. Исследование электромашинно-вентильных преобразователей бесконтактных синхронных и асинхронизированных машин в системе схемотехнического моделирования // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 5. – С. 23-29.

**Bibliography (transliterated):** 1. Glebov I. A. Scientific bases of systems designing of excitation of powerful synchronous machines. Leningrad: Science. 1988. 322 p. Print. 2. Berkovich E.I., Kovalev V.N., Kovalev F.I. and others. Semiconductor rectifiers. Moscow: Energiya. – 1978. – 448 p. Print. 3. Abramovych B. N., Kruhlyy A. A. Arousal, regulation and the stability of synchronous motors. Leningrad: Energoatomizdat – 1983. – 128 p. Print. 4. Galinovsky A.M., Lenska E.A., Erhard Ayhofer. Methods of calculating protection circuits valves rectifier. - Technical electrodynamic. 2005. No 4. 43–50. Print. 5. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A., Senko V.I., Anpilogov N.G. Switching overvoltage in multiphase transformers. Electrotechnical and computer systems. Kiev. Engineering. 2011. No 3. Pp. 319-322. Print. 6. Galinovsky A.M. Parameters and characteristics of semi-conductor rectifiers of gated generators. Mountain electromechanics and automatics: scientific and technical collection. 2012. No 88. 48-54. Print. 7. Galinovsky A.M., Babenko O. U., Lenska E.A. Determination of the main rectifiers ratios of gated generators using the calculation results of transient modes. Electromechanical and energy saving systems. Kremenchuk: KrNU. 2012. No 88. 425-430. Print. 8. Galinovsky A.M. Research into velve-engine transducers of brushless synchronous and asynchronous machines in a circuit simulation sistem. Elektrotehnika i elektromehanika – Electrical engineering & electromechanics. 2013. No 5. 23-29. Print.

Поступила (received) 15.10.2015.



**Галиновский Александр Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», доцент кафедры электромеханики, тел.: (044) 258-01-54; e-mail: alga40@mail.ru.

**Galinovsky Alexander Mikhailovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National technical university of Ukraine “Kiev polytechnic institute”, Docent at the department of Electromechanics, tel.: (044) 258-01-54; e-mail: alga40@mail.ru.



**Ленская Елена Александровна** – начальник отдела, Государственное агентство по энергоэффективности и энергосбережению Украины, тел.: (044) 558-58-35; e-mail: A\_Lenskay@ukr.net.

**Lenskaya Elena Aleksandrovna** – State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, tel.: (093) 861-71-71; e-mail: A\_Lenskay@ukr.net