

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**О. Г. Волкова**

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: volkova@zntu.edu.ua

Рассмотрена методика оптимизации по критерию пластической и упругой деформации контактного взаимодействия разрывных электрических контактов на стадии проектирования. Предложен пошаговый подход к расчету контактного взаимодействия электрических контактов. Приведены поля механических напряжений и перемещений контактных поверхностей на примере главных контактов модели модернизированного контактора КНОА 110/1000. Показан результат расчета методом конечных элементов с использованием пакета прикладных программ ANSYS и Comsol Multiphysics. Приведены эпюры напряжений на контактной поверхности при нагружении нормальным и касательным усилиями. Предложено использовать данный метод для усовершенствования имеющихся и проектирования новых электрических аппаратов. Применение данного метода позволит сократить затраты на проектирование новых электрических аппаратов и оптимизировать конструкцию по критерию упругопластического контакта, что приведет к снижению переходного сопротивления.

Ключевые слова: электрический контакт, переходное сопротивление, контактная поверхность, механическое напряжение, метод конечных элементов.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОВЕРХОНЬ СИЛЬНОСТРУМІННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ**О. Г. Волкова**

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: volkova@zntu.edu.ua

Розглянуто методику оптимізації за критерієм пластичної та пружної деформації контактної взаємодії розривних електричних контактів на стадії проектування. Запропоновано покроковий підхід до розрахунку контактної взаємодії електричних контактів. Наведено поля механічних напруг і переміщень контактних поверхонь на прикладі головних контактів моделі модернізованого контактора КНОА 110/1000. Показано результат розрахунку методом кінцевих елементів із використанням пакету прикладних програм ANSYS і Comsol Multiphysics. Наведено епюри напружень на контактній поверхні при навантаженні нормальним і дотичним зусиллями. Запропоновано використовувати даний метод для вдосконалення наявних і проектування нових електричних апаратів. Застосування даного методу дозволить скоротити витрати на проектування нових електричних апаратів та оптимізувати конструкцію за критерієм пружно-пластичного контакту, що призведе до зниження перехідного опору.

Ключові слова: електричний контакт, перехідний опір, контактна поверхня, механічне напруження, метод кінцевих елементів.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Важнейшим фактором, влияющим на работоспособность контактных деталей, по которым оценивается износ контактных поверхностей и рост их переходного сопротивления, является характер контактного взаимодействия [1–4]. Принято считать, что наличие достаточных по величине сжимающих усилий на контактных поверхностях – гарантия их надежной и длительной эксплуатации. Однако это упрощенный подход и не содержит конкретных рекомендаций по выбору конструктивных и эксплуатационных параметров для контактных систем. В большинстве случаев рекомендации носят весьма общий характер, основанный на анализе опыта эксплуатации уже существующих конструкций. Достоверных методов оценки контактного взаимодействия, представленных в виде аналитических зависимостей и используемых на стадии проектирования новых изделий, недостаточно, что требует дальнейшего рассмотрения этого вопроса.

Цель работы заключается в анализе взаимодействия контактных поверхностей в процессе коммутации и разработке практических рекомендаций при проектировании коммутационных электрических аппаратов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В процессе эксплуатации электрических аппаратов геометрия поверхностей коммутационных контактов претерпевает значительные изменения. Однако расчет взаимодействия коммутационных контактных деталей ведется на стадии проектирования, как правило, упрощенно, для поверхностей с идеальной геометрией, без учета последующих эксплуатационных изменений [5–7]. Для большинства проектируемых аппаратов это контактные сопряжения типа цилиндра с выпуклыми /вогнутыми поверхностями или плоскостью. В настоящее время работы, посвященные расчету взаимодействия реальных контактных поверхностей с учетом их эксплуатационных изменений, недостаточно. Однако известно, что в большинстве случаев, учет изменения геометрии контактных деталей в процессе их эксплуатации может решающим образом влиять на их работоспособность. Например, способность поверхностных пленок разрушаться при взаимном перемещении контактных поверхностей существенно зависит от геометрии контактирующих деталей и усилия их замыкания.

Оценка характера взаимодействия контактных поверхностей в реальных условиях, требует учета большого числа факторов (механические характе-

ристики контактных материалов при рабочих температурах, конфигурацию и микрогеометрию контактирующих поверхностей, механических и адгезионных свойств поверхностных пленок и др.). Это не позволяет достаточно точно представлять контактное взаимодействие в аналитической форме [5]. Однако современные методы математического моделирования с использованием вычислительной техники во многом упрощают эту задачу и позволяют представить картину контактного взаимодействия твердых тел с учетом упруго-пластического характера деформацией, реологических и трибологических свойств контактирующих материалов (коэффициент трения, износ и др.). С этой целью во многих отраслях науки для решения контактных задачи успешно применяются пакеты расчетных программ на основе конечно-элементного анализа (например, ANSYS, Comsol Multiphysics) [8].

Рассмотрим такой подход расчета контактного взаимодействия на примере модернизируемой конструкции контактора РПН КНОА 110/1000 (рис. 1, табл. 1).

Общий подход к применению данного метода для решения нашей задачи сводится к поэтапной реализации следующих шагов:

1. Построению модели контактной пары в графическом редакторе (например AutoCAD) и экспортирование ее с помощью формата обмена данными в пакет ANSYS. Для анализа контактного

взаимодействия уже существующих конструкций были использованы рабочие чертежи проектируемых контакт-деталей, а профили контактных поверхностей были приближены к виду проектируемого изделия (рис. 2).

Таблица 1 – Основные параметры контактора РПН КНОА 110/1000

Наименование параметра	Величина
Номинальное напряжение, кВ	110
Номинальный ток, А	1000
Ресурс механической износостойкости, не менее тысяч переключений	500
Ресурс электрической износостойкости контактов, разрывающих ток при переключении, не менее тысяч переключений	50
Время переключения с одного фиксированного положения на другое, с	3,8±20%
Количество переключений до смены масла в контакторе, не менее тысяч переключений	50

2. Создание модели твердотельных объектов, отображающих геометрию замыкаемых контактов и их сеточное разбиение.

3. Установление контактной пары.

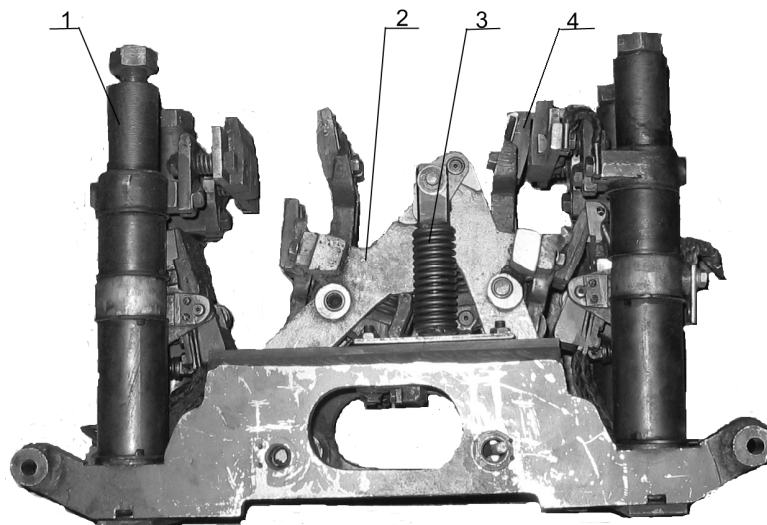


Рисунок 1 – Контактор РПН КНОА 110/1000: 1 – стойка с неподвижными контактами; 2 – двухкоромысловый шарнирный четырехзвенник; 3 – пружинный механизм; 4 – подвижные контакты

4. Назначение целевой и контактной поверхностей, элементы которых связаны между собой физическими постоянными, позволяющими учитывать кинематику контактной деформации.

5. Установление ключевых опций элементов и реальных постоянных контактирующих поверхностей.

6. Определение характера движения жесткой контактной поверхности.

7. Задание необходимых граничных условий.

8. Задание опций силового нагружения.

9. Решение контактной задачи.

10. Анализ результатов.

В качестве входных данных для расчета использованы: механические характеристики контактных материалов (твердость, модуль упругости, коэффициент Пуассона), усилия замыкания (взяты из технического задания на проектирование или по аналогии с существующими конструкциями), геометрические параметры контактирующих тел (например, фрагмент сборочного чертежа контактора – выделенный фрагмент на рис. 2).

Разбивка и распределение сетки КЭ, число которых составило около восьми тысяч, проводилась автоматически. Для сходимости вычисления все КЭ

принимались квадратичной формы (рис. 2,а). Плотность сетки соответствует полю механических на-

пряжений и деформаций: чем выше значение градиента напряжений, тем мельче сетка.

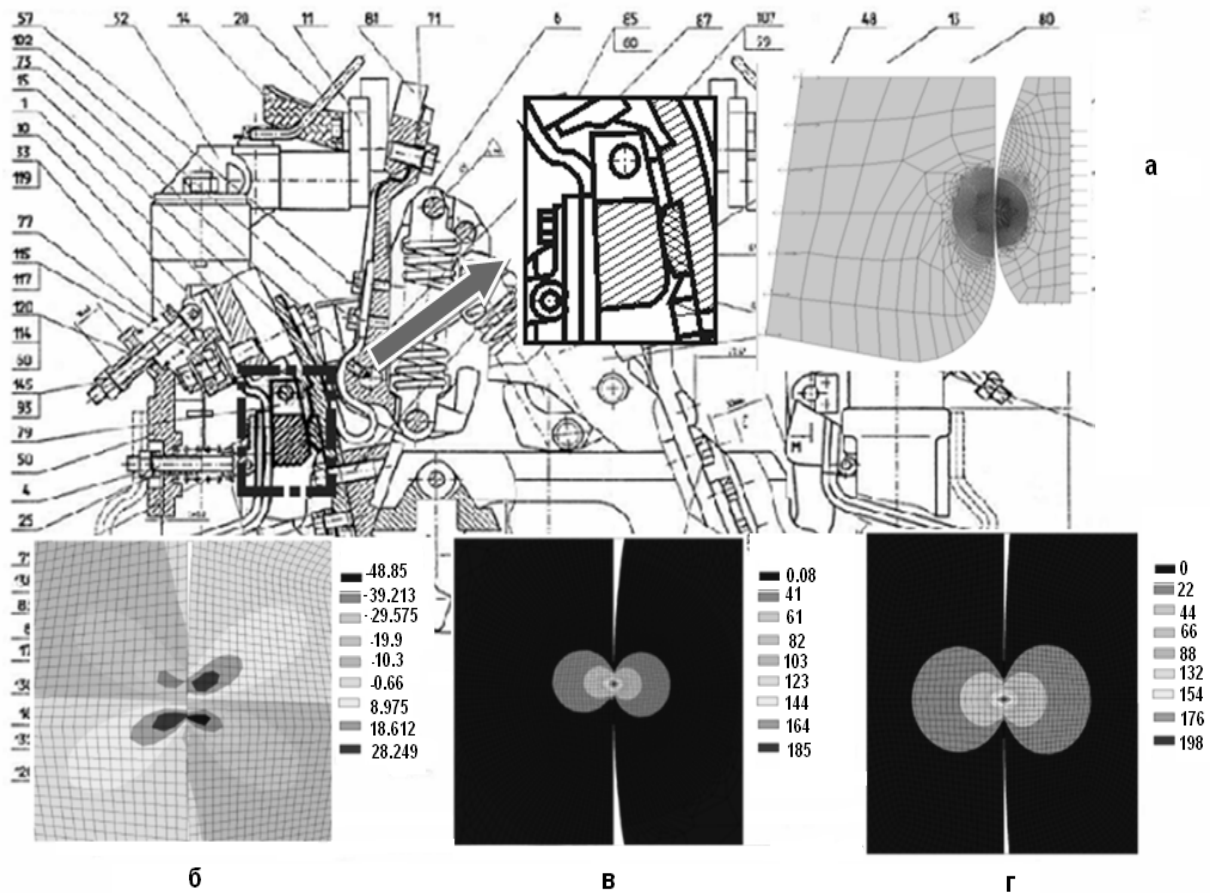


Рисунок 2 – Результаты расчета полей механических напряжений и перемещений контактных поверхностей главных контактов контактора РПН КНА 110/1000

Результаты обработки расчетных данных на компьютере представлены в виде эпюр напряжений и перемещений контактных поверхностей (рис. 2,б–г).

Полученные эпюры показали, что в зонах максимальной концентрации напряжений наблюдается пластическая деформация, что согласно [5, 9, 10] гарантирует разрушение поверхностных пленок и образование чистых металлических контактов. Периферийные зоны поверхности контактирования относятся к зонам упругой деформации и являются основными очагами переходного сопротивления.

При решении контактных задач в ANSYS по умолчанию считается, что расчетная модель представляет бесфрикционное сжатие двух поверхностей, а учет сил трения требует введения в расчет касательного усилия.

Как показывают результаты сравнительного эксперимента (рис. 3–7), проведенного с использованием Comsol Multiphysics, наличие касательного усилия приводит к перераспределению деформации и смещению изолиний контактных напряжений в направлении касательного усилия.

Кроме того, на этих участках контактной поверхности активно происходит разрушение поверхностных пленок.

Особо следует отметить, что управляемое приложении касательных усилий в дополнение к сжимающим усилиям может существенно увеличить площадь контактного взаимодействия в процессе коммутации (рис. 3) [9,10].

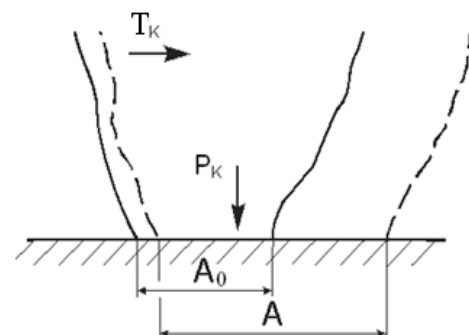


Рисунок 3 – Схема роста площади контактирования при приложении касательной нагрузки

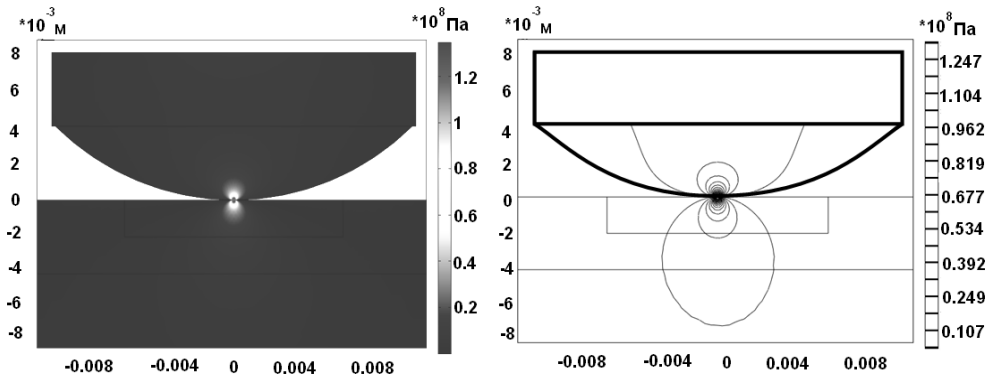


Рисунок 4 – Модель и изолинии напряжений контактной зоны при нагружении нормальным усилием

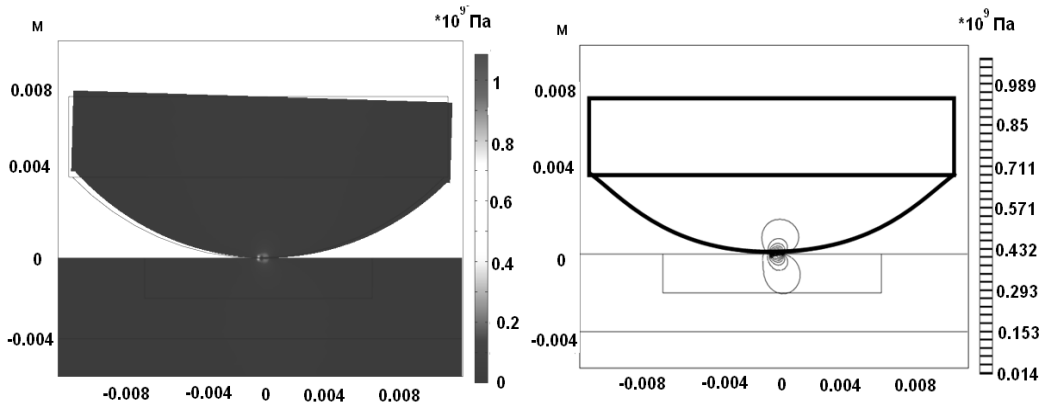


Рисунок 5 – Модель и изолинии напряжений контактной зоны при нагружении нормальным и касательным усилиями

Сравнение графиков давления на рис. 6 и 7 указывает на рост области контактного взаимодействия, от $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $5,0 \cdot 10^{-4}$ мм². При этом, учитывая, что предел текучести меди составляет $2 \cdot 10^8$ Па, площадь участка с пластической деформацией увеличилась от $1,4 \cdot 10^{-4}$ до $2,6 \cdot 10^{-4}$ мм².

Согласно утверждениям Р. Хольма, на участках с пластической деформацией гарантировано происходит разрушение поверхностных пленок. По совокупности эти изменений состояния контактной поверхности, должно снижаться и переходное сопротивление. Особо следует отметить, что добиться этого можно без существенного увеличения силы сжатия контактов, что позволит упростить конструкцию механизма переключения и повысить его быстродействие [9, 10].

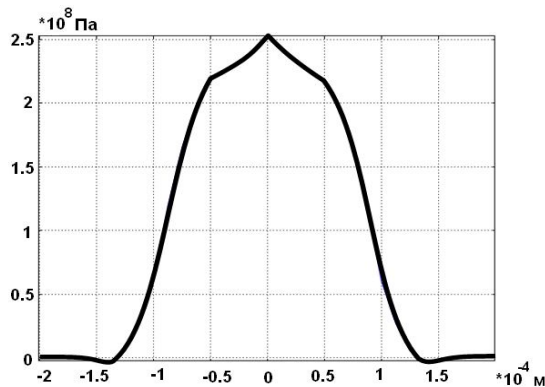


Рисунок 6 – Распределение давления на контактной поверхности при нагружении нормальным усилием

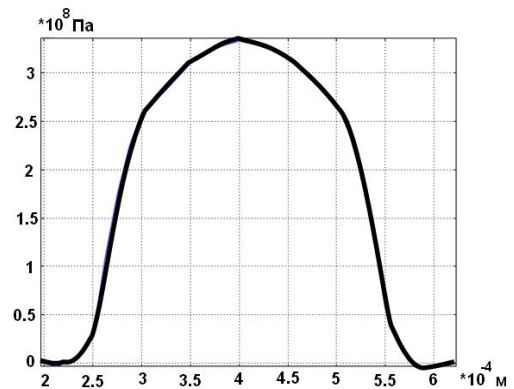


Рисунок 7 – Распределение давления на контактной поверхности при нагружении нормальной и касательной усилиями

ВЫВОДЫ. Представлен анализ контактного взаимодействия поверхностей главных контактов с использованием численного метода с применением пакета прикладных программ ANSYS и Comsol Multiphysics при различных усилиях замыкания. Такой подход к решению контактной задачи позволит уже на стадии проектирования представить характер контактного взаимодействия и внести коррективы в конструкцию коммутационного устройства.

Оптимизация по критерию характера замыкания контактов, позволит снизить переходное сопротивление и продлить срок службы коммутационного устройства.

Выражаю благодарность доценту кафедры электрических аппаратов НТУ «ХПИ» Байде Евгению

нию Ивановичу за его ценные замечания и помощь в работе над повышением надежности коммутационных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antler M. Materials, coatings and platings // *Electrical contacts: principles and applications*; ed. Slade P.G., New York: Marcel Dekker, Inc., 1999. – PP. 403–433.
2. Garzon R.D. High voltage breakers: design and applications. – New York: Marcel Dekker, Inc. – 2002. – P. 456.
3. Влияние проводимости трансформаторного масла на электротермические процессы в контактах переключающих устройств / О.Г. Волкова, Г.П. Волков, В.В. Зиновкин // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2007. – Вип. 3/2007 (44), част. 1. – С. 60–62.
4. Timsit R.S. Electrical conduction through small contact spots // *Proceedings of 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. – 2004. – PP. 184–190.

5. *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology* / M. Braunovic, N.K. Myshkin, V.V. Konchits. – New York : CRC Press, 2007. – P. 646.

6. Электрические и электронные аппараты / Дегтярь В.Г., Годжелло А.Г., Шоффа В.Н. и др.; под ред. Ю.К. Розанова. – [2-е изд.]. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.

7. *Electrical contacts. Principles and applications* / Slade P.G., Abbott W.H., Braunovic M. etc.; ed. by P.G. Slade. – New York: Marcel Dekker, Inc., 1999. – P. 1055.

8. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.

9. Волкова О.Г. Влияние усилия замыкания разрывных контактов на переходное сопротивление // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 2. – С. 25–26.

10. Исследование влияния усилия сжатия на переходное сопротивление разрывных электрических контактов / О.Г. Волкова, В.С. Лупиков, Е.И. Байда // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 28. – С. 12–21.

INVESTIGATION OF HIGH CURRENT ELECTRICAL CONTACTS SURFACES MECHANICAL INTERACTION

O. Volkova

Zaporizhzhya National Technical University

vul. Zhukovskoho, 64, Zaporizhzhya, 69063, Ukraine. E-mail: volkova@zntu.edu.ua

The article describes a technique for the optimization criterion of plastic and elastic deformation of the contact interaction of interrupting electrical contacts at the design stage. A stepwise approach to the calculation of contact interaction of electrical contacts is proposed. Fields of mechanical stresses and displacements of contact surfaces on the example of the main contacts of the contactor model modernized KHOA 110/1000 is considered. The results of finite element analysis using ANSYS application package and Comsol Multiphysics are presented. Stress distribution on the contact surface under loading normal and tangential forces is shown. It is proposed to use this method to improve the design of existing and new electric apparatus. Application of this method will reduce the cost of designing new electric apparatus, and optimize the design criterion of elastic-plastic contact that will reduce the contact resistance.

Key words: electrical contact, the contact resistance, the contact surface, mechanical stress, finite element method.

REFERENCES

1. Antler, M. (1999), *Electrical contacts: principles and applications*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
2. Garzon, R.D. (2002), *High voltage breakers: design and applications*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
3. Zinovkin, V.V., Volkova, O.G. and Volkov G.P. (2007), “Influence of conduction of transformer oil on electrothermal processes in contacts of switching devices”, *Transactions of Kremenchuk State Polytechnical University*, iss. 1, no. 3 (44), part 1, pp. 60–62.
4. Timsit, R.S. (2004), “Electrical conduction through small contact spots”, *Proceedings of 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 184–190.
5. Braunovic M., Myshkin, N.K. and Konchic, V.V. (2007), *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology*, CRC Press, New York, USA.

6. Rozanov, Yu.K. (2001), *Elektricheskie i elektronnyie apparaty* [Electrical and electronic apparatus], Informelektro, Moscow, Russia.

7. Slade, P.G. (1999), *Electrical contacts. Principles and applications*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.

8. Basov, K.A. (2002), *ANSYS v primerah i zadachah* [ANSYS in examples and tasks], KompterPress, Moscow, Russia.

9. Volkova, O.G. (2011), “Influence of interrupting contacts locking efforts on contact resistance”, *Elektrotehnika I Elektromekhanika*, no. 2, pp. 25–26.

10. Volkova, O.G., Lypikov V.S. and E.I. Bayda (2012), “Investigation of the effect of compression force on the contact resistance of interrupting electrical contacts”, *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universyitetu «KhPI»*, no. 28, pp. 12–21.

Стаття надійшла 22.05.2015.