

УДК 621.316.722.076.12

А. Н. Марикин, А. В. Мирощенко, С. В. Кузьмин**УСТРОЙСТВО ПОПЕРЕЧНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНДУКТИВНОСТЬЮ**

Дата поступления: 16.06.2015

Решение о публикации: 19.10.2015

Цель: Определить целесообразность применения компенсирующего устройства в однофазных сетях переменного тока с резкопеременной нагрузкой. Особенностью компенсирующего устройства является наличие управляемого реактора, в котором изменение индуктивности осуществляется с помощью перемещения сердечника магнитопровода. Реактор подключен последовательно с батареей конденсаторов. Емкость конденсаторной батареи компенсирующего устройства при этом постоянна. **Методы:** Аналитическими методами рассчитаны требуемые электротехнические характеристики устройства. В качестве исходных данных использовались измерения с фидеров контактной сети железной дороги переменного тока. Определена конструкция реактора, массогабаритные показатели. Для расчета максимальной индукции в магнитопроводе произведено моделирование в программе ELCUT. Построены зависимости индуктивности реактора в зависимости от текущего положения подвижной части сердечника. Произведено сравнение электроприводов, подходящих для данного устройства по техническим и стоимостным показателям. **Результаты:** Рассчитаны основные массогабаритные показатели реактора. Выбран тип электропривода для механического изменения положения сердечника магнитопровода. Выбран рабочий ход подвижной части сердечника реактора. Определены минимальная и максимальная индуктивности реактора. Оценены потери энергии при его работе, основные преимущества и недостатки рассматриваемого устройства. Сформулирован вывод о целесообразности использования устройства компенсации реактивной мощности в однофазных сетях переменного тока с резкопеременной нагрузкой. **Практическая значимость:** Устройство поперечной компенсации на основе механического регулятора реактивности может рассматриваться как способ эффективной компенсации реактивной мощности на железных дорогах переменного тока.

Поперечная компенсация, реактивная мощность, однофазная сеть, переменный ток, управляемый реактор.

***Alexandr N. Marikin**, D. Eng., professor, department chairman, marikin_s@mail.ru; **Vasiliy A. Miroshchenko**, postgraduate student, vasilymir@yahoo.com; **Stanislav V. Kuzmin**, postgraduate student, stason1986@mail.ru (Petersburg State Transport University) REACTIVE POWER SHUNT COMPENSATION DEVICE WITH VARIABLE INDUCTANCE

Objective: To determine practicability of using compensation device in single-phase alternating current networks with abruptly variable load. Specific feature of the compensation device is the presence of a controlled reactor in which altering inductance is achieved by relocating the core. The reactor is looped with a series bank. Capacity of the compensation device's condenser bank is constant. **Methods:** The necessary electrotechnical characteristics of the device are calculated by analytical methods. Measurements of alternating-current railway contact network were used as basic data. Design and weight-size parameters for a reactor are determined. Simulation in ELCUT program was conducted to calculate maximum induction in magnetic core. Correlations between reactor inductance and current position of the movable part of the core are calculated. Comparison between electrical drivers that suit the device by technical and cost parameters

was conducted. **Results:** Reactor's main weight-size parameters are calculated. A type of electrical driver for mechanical alteration of the magnetic core location is chosen. Working stroke of the movable part of the reactor's core is chosen. Reactor's minimum and maximum inductance are determined. Power losses during the device's operation, chief advantages and shortcomings are estimated. The conclusion on practicability of using a device for compensation of reactive power in single-phase alternating current networks with abruptly variable load is reached. **Practical importance:** Shunt compensation device based on a mechanical reactable regulator can be viewed as a method for efficient compensation of reactive power in alternating current railways.

Reactive shunt compensation, reactive power, single-phase A. C. network, alternating current, controlled reactor.

Одним из направлений повышения энергетической эффективности устройств поперечной компенсации реактивной мощности в тяговом электроснабжении переменного тока является создание устройств, которые реагируют на изменение тяговой нагрузки. Такие устройства можно реализовать на основе управляемых реакторов. Индуктивность реактора можно менять различными способами [5]:

- переключением ступеней обмотки реактора с помощью механических контакторов;
- насыщением магнитопровода путем намагничивания;
- переключением тиристорной группы в силовой цепи реактора или в цепи управляющей обмотки;
- механическим изменением немагнитного зазора в магнитопроводе с помощью электропривода.

Переключение ступеней обмотки реактора с помощью механических контакторов не обеспечивает эффективной компенсации реактивных токов в условиях резкопеременной тяговой нагрузки.

Насыщение магнитопровода путем намагничивания позволяет плавно изменять индуктивность катушки. Основные проблемы возникают при достижении насыщения сердечника. В режиме насыщения переменное магнитное поле катушки перестает носить синусоидальный характер. Таким образом, в сеть генерируются высшие гармоники, которые требуют фильтрации.

Частыми переключениями тиристорov в силовой цепи реактора либо в цепи компенса-

ционной обмотки также достигается плавное и точное регулирование тока индуктивного характера. Но такое регулирование приводит к генерации высших гармоник в сети, что влечет за собой необходимость использования фильтров высших гармоник. Такие меры повышают стоимость установки, увеличивают её потери.

Вместе с тем механическое регулирование индуктивного сопротивления реактора способно обеспечить плавное изменение генерируемой реактивной мощности в широком диапазоне без генерации высших гармоник.

Конструкция устройства и схема подключения

Один из вариантов механического изменения индуктивности использует компания TRENCH [4]. Конструкция предполагает изменение магнитного зазора сердечника с помощью перемещения подвижных плунжерных сердечников. Вращение стержню передает червячная передача, а перемещение плунжерных сердечников обеспечивает винтовая передача. Такая конструкция отличается большими потерями на трение и невысокой надежностью.

Предлагается использовать бронестрежневой реактор компактных размеров [1]. Перемещение стержня вдоль оси катушки приводит к изменению ширины немагнитного зазора в сердечнике, что влияет на индуктивность катушки. Сердечник может перемещаться с

помощью электрического, гидравлического или пневмотического привода.

Компенсирующее устройство предполагается подключать на подстанциях переменного тока между питающим и отсасывающим фидерами (рис. 1). Устройство следует подключать через быстродействующий выключатель для отключения в аварийных режимах.

Сердечник реактора L жестко прикреплен к электроприводу M . Электропривод передает сердечнику поступательное движение, изменяя магнитный зазор в стержне реактора. Электродвигатель управляется с помощью частотного преобразователя UZ . Преобразователь оснащен микропроцессором с возможностью регулирования в зависимости от угла между током и напряжением, значение которого передается от цифрового фазометра Φ . Фазометр получает информацию от трансформатора тока TA , установленного на питающем фидере, и трансформатора напряжения TV , измеряющего напряжение между питающим и обратным проводом. В электропривод встроены датчик положения, который передает информацию в частотный электропривод. Датчик позволяет избежать механического взаимодействия подвижной части магнитопровода с неподвижной в крайних положениях.

Расчет реактора

Для расчета конструкции и массогабаритных показателей реактора необходимо определить максимальную реактивную мощность, которую должно генерировать устройство компенсации. Для определения значения реактивной мощности использовали данные измерений с северного участка Октябрьской железной дороги. Для анализа взяты значения со счетчиков реактивной энергии, установленных на питающих фидерах контактной сети. Максимальное получасовое значение реактивной энергии было зафиксировано на подстанции Свирь: $W_p = 909$ кВАр·ч. Таким образом, средняя получасовая реактивная мощность составляет

$$Q_{\text{ср}} = W_p / 0,5 = 1818 \text{ кВАр.}$$

На станции Свирь имеются статические конденсаторные установки для поперечной компенсации мощностью $Q_{\text{кв}} = 2750$ кВАр. Максимальная средняя получасовая реактивная мощность, требующая компенсации, составляет

$$Q_{\text{срmax}} = Q_{\text{ср}} + Q_{\text{кв}} = 1818 + 2750 = 4568 \text{ кВАр.}$$

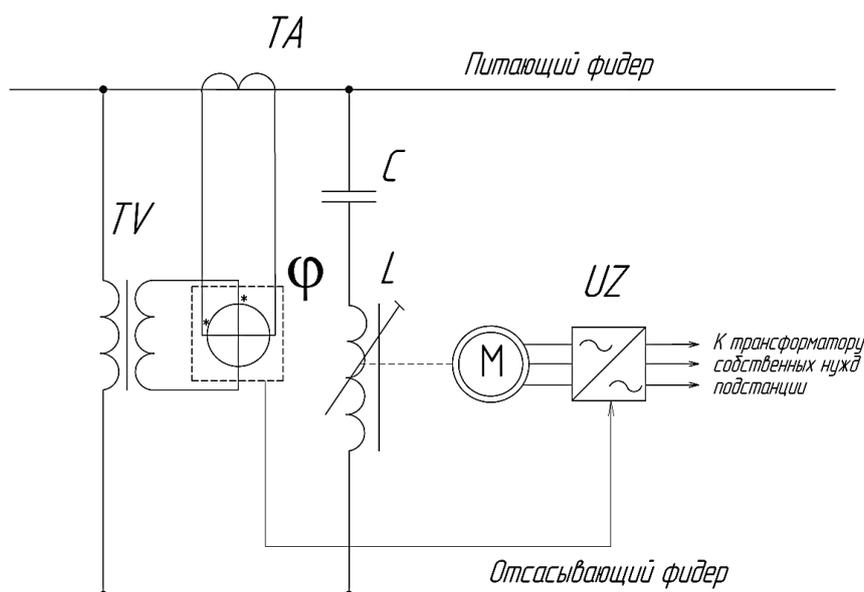


Рис. 1. Схема подключения компенсирующего устройства

Для определения массогабаритных показателей устройства принимается максимальная мощность компенсации реактивной мощности $Q_{\text{кв}} = 5$ МВАр. Известно, что номинальное напряжение $U_{\text{н}}$ устройства компенсации реактивной мощности составляет

$$U_{\text{н}} = 1,125 \cdot U_{\text{кв}},$$

где $U_{\text{кв}}$ – напряжение контактной сети, $U_{\text{кв}} = 27,5$ кВ.

$$U_{\text{н}} = 1,125 \cdot 27,5 = 30,9 \text{ кВ.}$$

Номинальный ток $I_{\text{н}}$ устройства:

$$I_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{кв}}}{U_{\text{н}}} = \frac{5000}{30,9} = 161,5 \text{ А.}$$

Емкость конденсаторной батареи можно вычислить по формуле

$$C_{\text{кв}} = \frac{Q_{\text{кв}}}{U_{\text{н}}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f},$$

где f – частота питающей сети, $f = 50$ Гц.

Тогда необходимая емкость конденсаторной батареи для компенсации 5 МВАр составит

$$C_{\text{кв}} = \frac{5000000}{30900^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

Максимальная индуктивность реактора компенсирующей установки $L_{\text{кв}}$ должна полностью компенсировать реактивность установленной конденсаторной батареи на частоте питающей сети:

$$\omega \cdot L_{\text{кв}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{кв}}},$$

где ω – угловая частота питающей сети, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Отсюда индуктивность реактора равна

$$L = \frac{1}{314^2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-5}} = 0,6 \text{ Гн.}$$

Определим сечение проводника для реактора, исходя из номинальной плотности тока $\Delta = 2,8$ А/мм²:

$$S = \frac{I_{\text{н}}}{\Delta} = \frac{161,5}{2,8} = 57,62 \text{ мм}^2.$$

По технологическим соображениям сечение одного проводника не должно превышать 35 мм², поэтому в данном случае необходимо взять два проводника по 28,8 мм² каждый. Были выбраны проводники прямоугольного сечения с размерами 10,6 × 2,8 мм с фактическим сечением $S_{\text{ф}} = 59,7$. Размер проводника в изоляции составит 11,1 × 3,3 мм. Тогда фактическая плотность тока $\Delta_{\text{ф}}$ в проводнике составит

$$\Delta_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{н}}}{S_{\text{ф}}} = \frac{161,5}{59,4} = 2,72 \text{ А/мм.}$$

Рассматриваемая конструкция реактора не должна позволять магнитопроводу уходить в режим насыщения при номинальном токе. Кроме этого, она должна иметь компактные размеры. Оптимальным для данных условий является бронестержневой реактор с диамагнитными вставками. После многочисленных расчетов и моделирований была получена конструкция реактора, представленная на рис. 2.

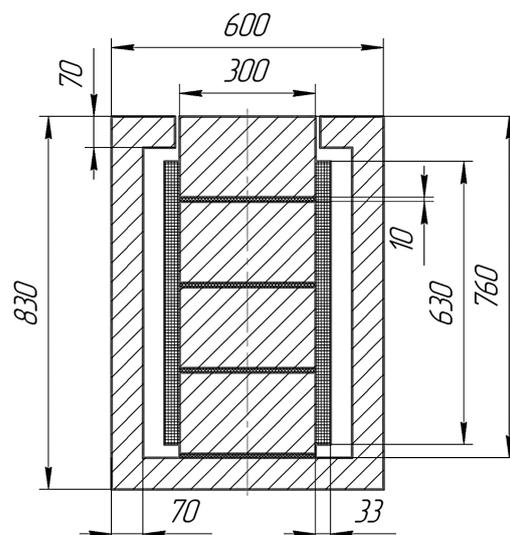


Рис. 2. Конструкция реактора

Длина реактора составляет 830 мм. Он имеет четыре диамагнитные вставки из немагнитного фарфора. Диаметр сердечника 300 мм, длина его подвижной части 750 мм. Обмотка реактора составляет 280 витков.

Расчет электротехнических параметров реактора

Разработанная конструкция была проверена в программе ELCUT на предмет насыщения сердечника при номинальном токе. По результатам моделирования максимальное мгновенное значение индукции составляет $B_{\max} = 1,22$ Тл. Точка насыщения для выбранной электротехнической стали составляет 1,7 Тл [2]. Результаты моделирования представлены на рис. 3. При такой конструкции реактора его индуктивность составит $L_{\text{ку}} = 0,64$ Гн.

Было смоделировано перемещение подвижной части стержня с шагом 10 мм (рис. 4).

Анализ зависимости показывает, что электропривод должен обеспечивать перемещение сердечника в диапазоне от 0 до 600 мм. При дальнейшем увеличении немагнитного зазора значение индуктивности изменяется незначительно. Чем меньше значение рабочей длины штока, тем компактнее и дешевле получается устройство. При немагнитном зазоре 600 мм индуктивность реактора составляет $L_{\min} = 0,05$ Гн.

При такой конфигурации реактор имеет следующие массогабаритные показатели:

- масса подвижной части реактора 404,6 кг;
- масса броневое сердечника (без подвижной части) 897 кг;
- масса меди обмотки реактора 157 кг;
- общая масса реактора 1459 кг;
- габаритные размеры реактора (без учета электропривода) $D \times Ш \times В$ 830 × 600 × 600 мм.

Суммарные потери активной мощности реактора составят 5,54 кВт.

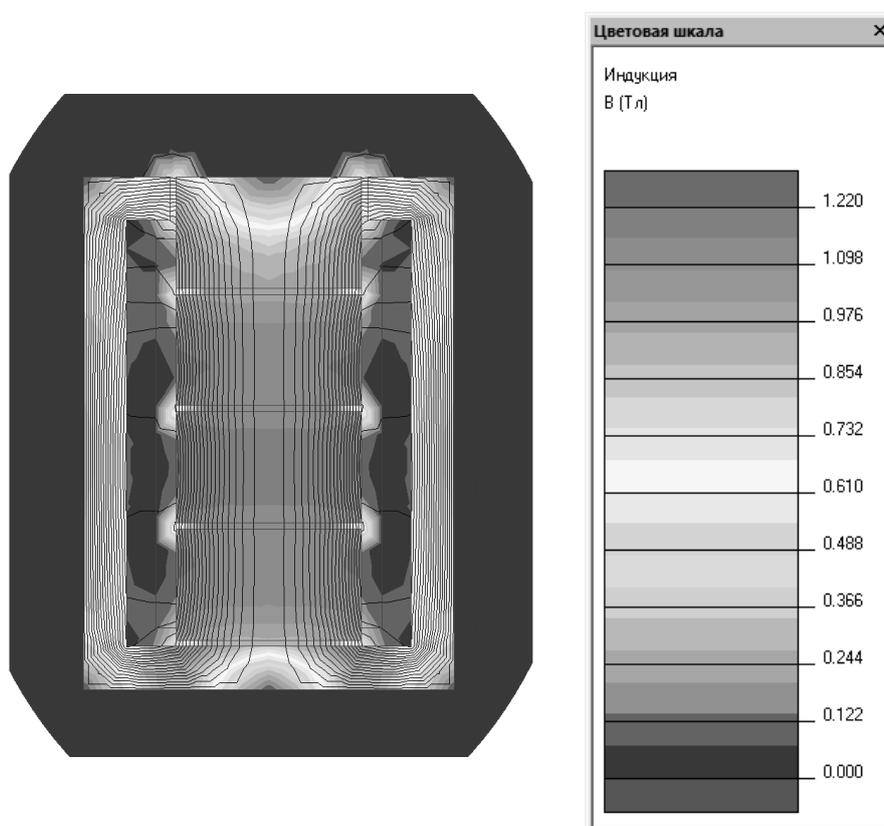


Рис. 3. Результаты моделирования

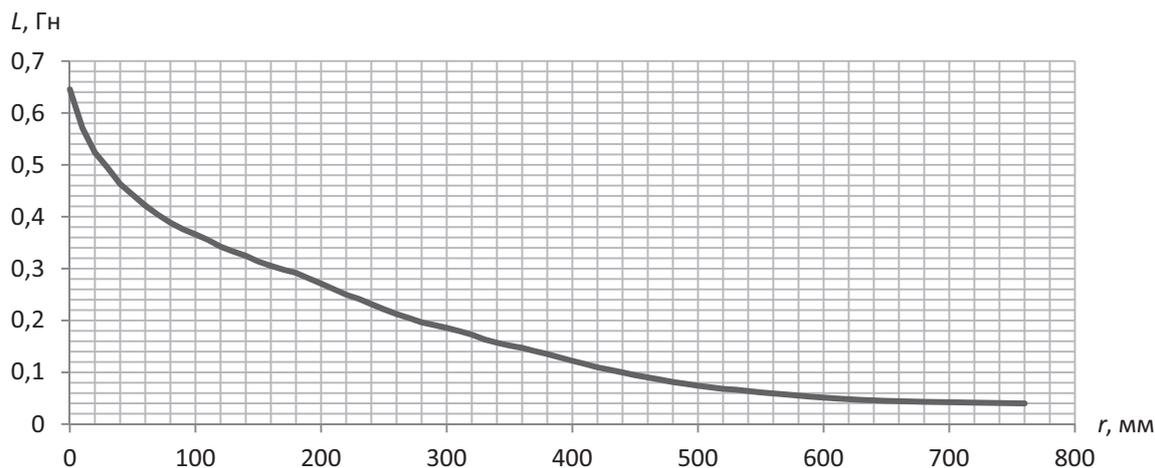


Рис. 4. Зависимость индуктивности реактора от положения сердечника

Выбор привода

По технологическим соображениям в качестве привода для перемещения сердечника был выбран электропривод.

Электропривод должен иметь высокую надежность, обеспечивать хорошее быстродействие и точность позиционирования. Кроме этого, он должен иметь минимальные потери.

При выборе рассмотрены следующие виды приводов для поступательного движения: с ролико-винтовой передачей (РВП), с шарико-винтовой передачей (ШВП), винты с трапецидальной резьбой, линейный двигатель [3, 6] (см. таблицу).

Сравнение показывает, что линейный электропривод обладает высокой скоростью, сравнительно большим КПД, минимальными

Сравнение типов электроприводов

Показатель	РВП	Винты с трапецидальной резьбой	ШВП	Линейный двигатель
Номинальная нагрузка	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Срок службы	Большой	Маленький	Средний	Очень большой
Скорость	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая
Позиционирование	Простое	Среднее	Среднее	Простое
Жесткость	Очень высокая	Очень высокая	Средняя	Очень высокая
Ударные нагрузки	Высокие	Высокие	Средние	Высокие
Габариты	Малые	Средние	Средние	Минимальные
КПД, %	> 80	~ 40	> 70	> 90
Установка	Не требует разборки механики	Требуется разработка механики	Требуется разработка механики	Не требует разборки механики
Обслуживание	Очень простое	Сложное	Среднее	Очень простое

габаритами, простым и точным позиционированием и минимальными затратами на обслуживание.

Современные линейные двигатели способны развивать скорость порядка 5 м/с с ускорением порядка 150 м/с². С такими характеристиками полное перемещение сердечника реактора займет менее 0,2 с, что соизмеримо со скоростью изменений режима нагрузки в контактной сети. Кроме того, в системе регулирования предусматривается блок сравнения индуктивного (X_L) и емкостного (X_C) сопротивлений электрической цепи для исключения условий резонанса. При этом в процессе регулирования всегда обеспечивается соотношение

$$X_L = X_C \pm \Delta X,$$

где ΔX – допустимое отклонение.

Электропривод выполнен на базе линейного синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами. Такая конструкция двигателя имеет длительную наработку на отказ и широкий модельный ряд. Электропривод используется для поступательного горизонтального движения сердечника. Вертикальное движение потребует большего момента двигателя и, как следствие, больших затрат энергии.

Следует отметить, что инерционность механической части регулятора может быть использована для повышения устойчивости регулятора при резких колебаниях нагрузки.

Заключение

Предлагаемое устройство обладает следующими свойствами: плавной регулировкой генерируемой реактивной мощности в требуемом диапазоне, наличием обратной связи, отсутствием генерации высших гармоник тока и напряжения во внешней сети, компактными габаритами, возможностью подключения к имеющемуся компенсирующему устройству, высоким быстродействием.

Основным недостатком устройства является наличие механического элемента в конструкции.

Таким образом, предлагаемое устройство поперечной компенсации на основе механического регулятора может рассматриваться как способ эффективной компенсации реактивной мощности на железных дорогах переменного тока.

Библиографический список

1. Мастрюков Л. А. Новый высокоэкономичный шунтирующий реактор РОМБС-110000/750/110 для ЛЭП 750 кВ с компенсированной нейтралью / Л. А. Мастрюков // Электро. – 2005. – № 6. – С. 21–27.
2. Молотилова Б. В. Холоднокатаные электро-технические стали : справ. / Б. В. Молотилова. – М. : Металлургия, 1989. – 168 с.
3. Носов В. В. Сравнение поступательных приводов технологических машин / В. В. Носов // Молодежь и наука : сб. материалов IX Всерос. науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск. – Красноярск : Сиб. федерал. ун-т, 2013.
4. Регулируемые шунтирующие реакторы для компенсации реактивной мощности. – Trench Austria GmbH, 2009. – 8 с.
5. Соколов С. Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий / С. Е. Соколов, А. Г. Долгополов // Новости электротехники. – 2012. – № 3 (75). – С. 18–22.
6. Янгулов С. В. Проектирование передач с линейными перемещениями выходного звена : учеб. пособие / С. В. Янгулов. – Томск : Изд-во Томск. политехнич. ун-та, 2011. – 169 с.

References

1. Mastryuov L. A. *Elektro – Electro*, 2005, no. 6, pp. 21–27.
2. Molotilova B. V. *Kholodnokatanyye elektrotekhnicheskiye stali. Spravochnik* [Cold-rolled Electrical Steel. Reference Book]. Moscow, Metallurgiya, 1989. 168 p.

3. Nosov V.V. Sravneniye postupatelnykh privodov tekhnologicheskikh mashin [Comparison of Linear Drivers of Technological Machines] *Molodezh i nauka: sbornik materialov IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* (Youth and Science: Proc. of 9th All-Russian Sci. and Pract. Conf. of Students, Postgraduate Students and Young Researchers). Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2013.

4. Reguliruyemye shuntiruyushchiye reaktory dlya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Controlled Shunt Reactors for Reactive Power Compensation]. Trench Austria GmbH, 2009. 8 p.

5. Sokolov S.Ye. & Dolgoplov A. G. *Novosti elektrotehniki – Electrical Eng. News*, 2012, no. 3 (75), pp. 18-22.

6. Yangulov S. V. *Proyektirovaniye peredach s lineynymi peremeshcheniyami vykhodnogo zvena. Uchebnoye posobiye* [Designing Transmission with Linear Movements of Output Element. Study Guide]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2011. 169 p.

*МАРИКИН Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, marikin_s@mail.ru; МИРОЩЕНКО Василий Анатольевич – аспирант, vasilymir@yahoo.com; КУЗЬМИН Станислав Валерьевич – аспирант, stason1986@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).