

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»**

**16+**  
**ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ  
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Выпуск 3**

**Тула  
Издательство ТулГУ  
2024**

Председатель

*Кравченко О.А.*, д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя

*Воротилин М.С.*, д-р техн. наук.

Заместитель председателя

*Прейс В.В.*, д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь

*Моргунова Е.В.*, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

#### Члены редакционного совета:

*Батанина И.А.*, д-р полит. наук –

гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;

*Берестнев М.А.*, канд. юрид. наук –

гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;

*Борискин О.И.*, д-р техн. наук –

гл. редактор серии «Технические науки»;

*Егоров В.Н.*, канд. пед. наук –

гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;

*Заславская О.В.*, д-р пед. наук –

гл. редактор серии «Педагогика»;

*Качурин Н.М.*, д-р техн. наук –

гл. редактор серии «Науки о Земле»;

*Понаморева О.Н.*, д-р хим. наук –

гл. редактор серии «Естественные науки».

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

*Борискин О.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Заместитель главного редактора

*Ларин С.Н.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь

*Яковлев Б.С.*, канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ

*Журин А.В.*, канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

#### Члены редакционной коллегии:

*Агуреев И.Е.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Анцев А.В.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Анцев В.Ю.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Бабкин А.С.*, д-р техн. наук (ЛГТУ, г. Липецк);

*Бабочкин Г.И.*, д-р техн. наук (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва);

*Вальтер А.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Вартаков М.В.*, д-р техн. наук (Московский политехнический университет, г. Москва);

*Васин С.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Волгин В.М.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Гринчар Н.Г.*, д-р техн. наук (Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва);

*Дикусар А.И.*, чл.-корр. АН Молдовы, д-р хим. наук (Институт прикладной физики АН Молдовы, г. Кишинев);

*Добровольский Н.М.*, д-р физ.-мат. наук (ТППУ, г. Тула);

*Жулай В.А.*, д-р техн. наук (Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж);

*Запомель Я.*, д-р техн. наук (Технический университет Остравы, Чехия, г. Острава);

*Золотухин В.И.*, д-р техн. наук (ТулГУ, НПП «Вулкан-ТМ», г. Тула);

*Крюков В.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Куц В.В.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

*Лавриненко В.Ю.*, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

*Ивахненко А.Г.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

*Колтунович Т.Н.*, д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, Польша, г. Люблин);

*Коновалов А.В.*, д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);

*Костров Б.В.*, д-р техн. наук (Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, г. Рязань);

*Ларкин Е.В.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Меццержаков В.Н.*, д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк);

*Мозжечков В.А.*, д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);

*Романович А.А.*, д-р техн. наук (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород);

*Савин Л.А.*, д-р техн. наук (Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл);

*Степанов В.М.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Сычугов А.А.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Титов В.С.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);

*Трегубов В.И.*, д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева», г. Тула);

*Черняев А.В.*, д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

*Шолохов М.А.*, д-р техн. наук (УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург);

*Юдин С.В.*, д-р техн. наук (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Тульский филиал, г. Тула);

*Яцун С.Ф.*, д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

- 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
- 2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
- 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы (технические науки);
- 2.5.2 Машиноведение (технические науки);
- 2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки);
- 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением (технические науки);
- 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки);
- 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);
- 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки);
- 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

## ПОДАВЛЕНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Д.Ю. Шакиров, Т.Х. Мухаметгалеев

*В современных промышленных предприятиях широко распространён частотно-регулируемый электропривод, который является источником нелинейной нагрузки, которая в свою очередь может являться источником высших гармонических составляющих. В данной статье рассмотрены способы подавления высших гармоник с помощью фильтрокомпенсирующих устройств, выявлены преимущества и недостатки пассивного и активного фильтра высших гармоник. Предложена схема модели пассивного фильтра для подавления высших гармоник при изменении нагрузки в частотно-регулируемом электроприводе, показаны результаты исследования и сделан вывод.*

*Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, источник нелинейной нагрузки, высшие гармонические составляющие, пассивные и активные фильтры высших гармоник.*

Большинство современных промышленных предприятий стремятся снизить энергопотребление и улучшить качество выпускаемой продукции за счет использования частотно-регулируемого электропривода. Данный тип электропривода имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести облегченный пуск двигателя, большую точность регулирования скорости двигателя. К недостаткам можно отнести относительно высокую стоимость преобразователя частоты, который, кроме того, является источником несинусоидальности напряжения и тока в питающей электросети (проблема электромагнитной совместности преобразователя частоты с питающей электросетью). Это вызвано тем, что преобразователь частоты является нагрузкой с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Поэтому преобразователь частоты является источником высших гармонических составляющих напряжения и тока в питающую электросеть. Все это негативно влияет на качество электроэнергии, вызывает дополнительные потери энергии в системе электроснабжения [1,2]. Кроме того, высокий уровень гармоник негативно влияет на срок службы изоляции кабелей и электрооборудования, снижает эффективность работы другого электрооборудования и может приводить к ложным срабатываниям систем защиты [3,4].

Для подавления высших гармонических составляющих напряжения и тока используют специальные фильтры, как правило, активные и пассивные фильтры высших гармоник [5]. Активные фильтры позволяют успешно подавлять высшие гармоники, даже при изменении нагрузки в системе, это возможно благодаря микропроцессорным устройствам, аналого-цифровым и цифро-аналоговым преобразователям, которые входят в состав активного фильтра. Однако сложное устройство данного фильтра вызывает высокую стоимость подобных фильтров. Помимо этого, активный фильтр требует сложной настройки и обучения алгоритма адаптации, а необходимость время от времени калибровать аналого-цифровой преобразователь может и вовсе оттолкнуть от выбора данного типа фильтра [6,7].

Состоящие из неактивных элементов (индуктивность, емкость, активное сопротивление) пассивные фильтры высших гармоник являются альтернативой активным. Одним из главных преимуществ пассивных фильтров является простота конструкции, как следствие низкая стоимость, высокая надежность и долговечность. Главным недостатком данного типа фильтров является не эффективность подавления высших гармоник при изменении нагрузки, так как данный тип фильтров настраивается конкретно на определенный случай [8,9].

Для подавления высших гармоник при изменении нагрузки предлагается рассмотреть систему с пассивными фильтрами высших гармоник, которая позволит подавлять высшие гармоники тока при изменении нагрузки в системах «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель». В отличие от системы с активными фильтрами, у данной системы отсутствуют аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, что упрощает настройку параметров фильтра и снижает стоимость устройства [10].

**Исследование.** Исследование основывалось на теории электрических машин, на основах электротехники, и включает в себя основы моделирования электроприводов. Моделирование проводилось с использованием программного пакета Ltspice, схема моделирования представлена на рисунке 1. Схема состоит из следующих моделей: питающая сеть, трансформатор тока, пассивный фильтр высших гармоник, преобразователь частоты, асинхронные электродвигатели, избирательно-измерительные фильтры, определители амплитуды, система управления IGBT транзисторами, устройство включения дополнительной нагрузки.

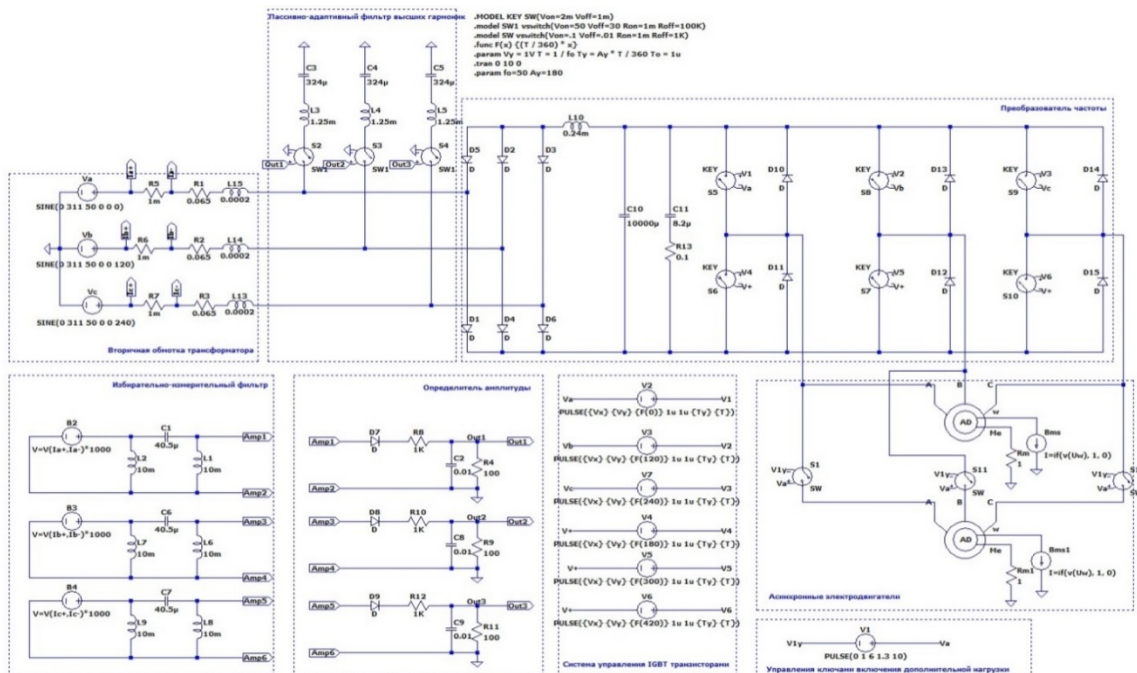


Рис. 1. Схема модели «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Модель избирательно-измерительных фильтров показана на рисунке 2. За основу модели был выбран высокочастотный П-образный LC фильтр, который расположен на входе преобразователя частоты. Данный фильтр настраивается на определенную гармоническую составляющую, например, на пятую гармонику с резонансной частотой 250 Гц.

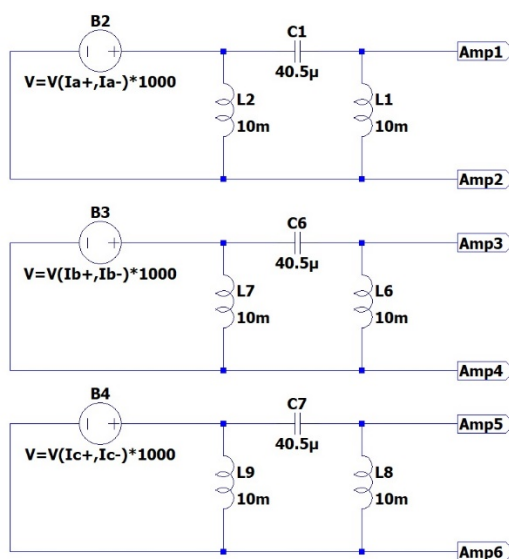


Рис. 2. Модель избирательно-измерительных фильтров

Модель определителей амплитуды показана на рисунке 3. Данная модель определяет амплитуду гармоники на выходе избирательно-измерительного фильтра.

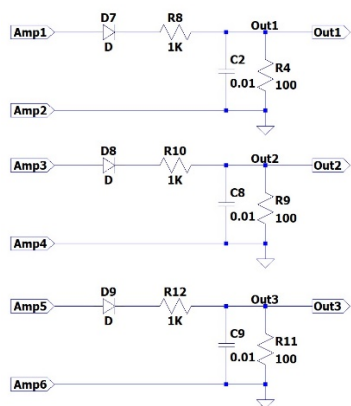


Рис. 3. Модель определителей амплитуды высших гармоник

Модель пассивного фильтра показана на рисунке 4. Данная модель представляет собой LC фильтр с релейной системой управления. При превышении допустимого значения на выходе определителя амплитуды срабатывает реле, следовательно, пассивный фильтр начинает подавлять высшие гармоники на выходе преобразователя частоты.

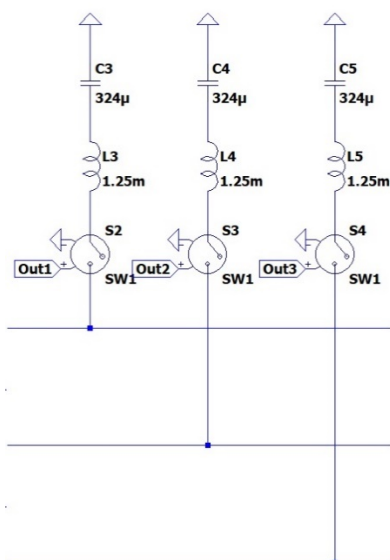


Рис. 4. Модель пассивного фильтра

В первую очередь рассмотрим влияние высших гармоник на сеть в системе без использования системы пассивных фильтров.

Временная диаграмма напряжений на выходе определителя амплитуды представлена на рисунке 5.

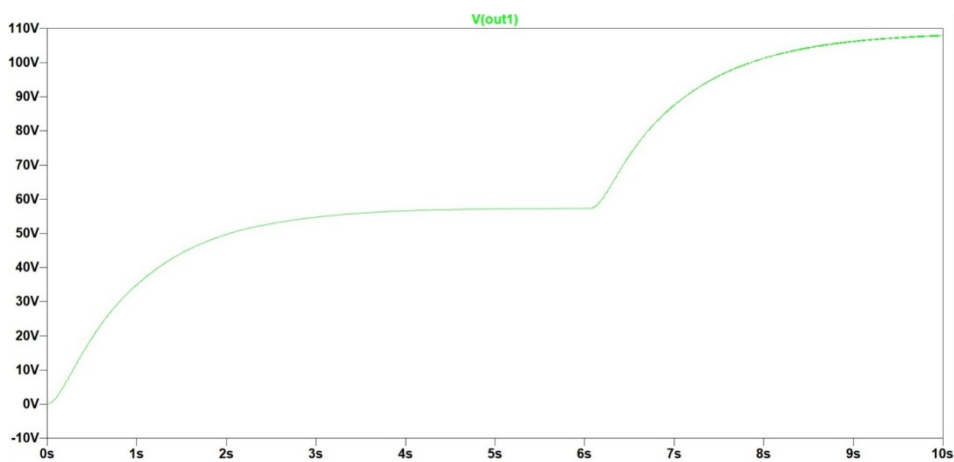


Рис. 5. Временная диаграмма напряжений на выходе определителя амплитуды

Если обратить внимание на временную диаграмму можно заметить, что на шестой секунде (включается второй электродвигатель) амплитуда пятой гармонической составляющей увеличивается на 100%.

Теперь предлагается рассмотреть влияние высших гармоник на сеть при использовании системы пассивных фильтров, настроенных на пятую гармоническую составляющую с резонансной частотой 250 Гц. В этом случае диаграмма напряжений будет иметь вид согласно рисунку 6.

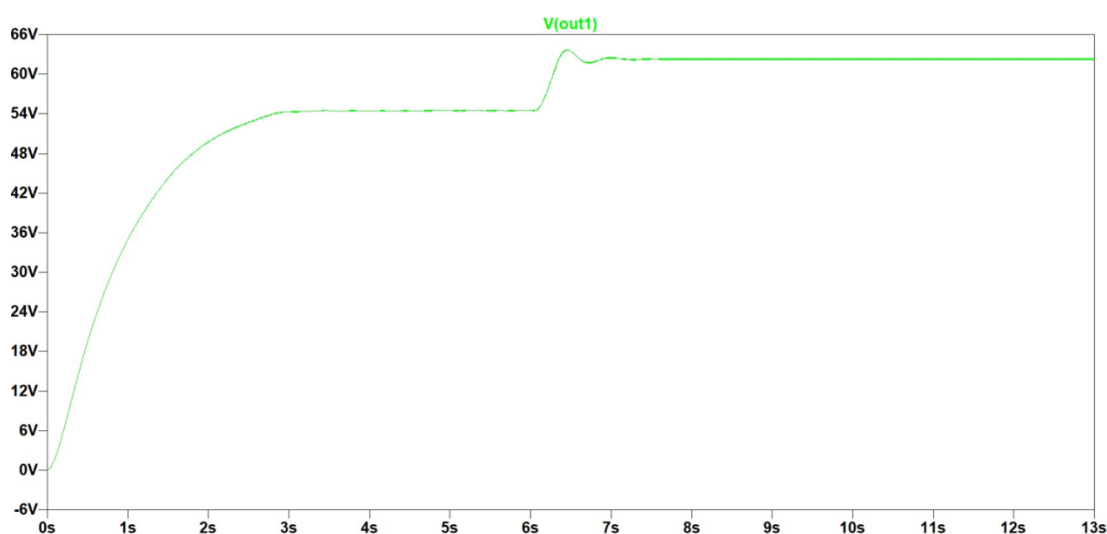


Рис. 6. Временная диаграмма напряжений на выходе определителя амплитуды

Из рисунка 6 видно, что благодаря системе пассивных фильтров высших гармоник в момент возрастания нагрузки (подключается второй электродвигатель) амплитуда пятой гармоники возрастает незначительно.

Таким образом, предложенная система пассивных фильтров высших гармоник может подавлять высшие гармоники при изменении нагрузки в системе «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель».

#### Список литературы

- 1.Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и систем. М: Высшая школа, 1967. 54 с.
- 2.Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes // IEEE Press Editorial Board, 2007. 400 p.
- 3.Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Москва: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
- 4.Nussbaumer Henri J. Fast Fourier transform and convolution algorithms. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1931. P. 54-71.
- 5.Абрамович Б.Н. О компенсации высших гармоник тока и напряжения / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Мингазов А.С., Полищук В.В. // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 126-127.
- 6.Фурсанов М.И., Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Минск: УВИЦ при УП «Белэнерго», 2005. 201 с.
- 7.Попов И.И., Сидорова В.Т., Орлов А.И. Основы энергетической электроники. Йошкар-Ола, 2013. С. 26.
- 8.Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes // IEEE Press Editorial Board, 2007. 400 p.
- 9.Тихомиров В.А. Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // Нижний Новгород. С. 204-215.
- 10.Пронин М.В. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития // Новости электротехники. 2006. № 2. С. 102.

Шакиров Дамир Юнусович, магистрант, [s4akirov@yandex.ru](mailto:s4akirov@yandex.ru), Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технологический университет,

Мухаметгалеев Танир Хамитевич, канд. техн. наук, доцент, [banzay-13-13@yandex.ru](mailto:banzay-13-13@yandex.ru), Россия, Казань, Казанский государственный энергетический университет

#### SUPPRESSION OF HIGHER HARMONIC COMPONENTS WHEN CHANGING THE LOAD IN A FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

D.YU. Shakirov, T.KH. Mukhametgaleyev

*In modern industrial facilities, frequency-controlled electric drives are widely used. These drives can cause non-linear loads, which in turn generate higher harmonic components. This article discusses methods for reducing higher harmonics by using filter compensation devices, and it reveals the advantages and disadvantages of passive and active harmonic filters. The article proposes a schematic diagram of a passive harmonic filter model for reducing harmonics during load changes in a frequency-regulated drive, and the results of the research are presented. Finally, a conclusion is drawn based on the findings of the study.*

*Key words: frequency-controlled electric drive, non-linear load source, higher harmonic components, passive and active filters of higher harmonics.*

*Shakirov Damir Yunusovich, undergraduate, [s4akirov@yandex.ru](mailto:s4akirov@yandex.ru), Russia, Kazan Kazan National Research Technological University,*

*Mukhametgaleyev Tanir Khamitevich, candidate of technical science, docent, [banzay-13-13@yandex.ru](mailto:banzay-13-13@yandex.ru), Russia, Kazan, Kazan State Energy University*