

И.А. Бершадский /д.т.н./, В.В. Якимшина /к.т.н./, В.Г. Данилов
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ВЫБОР РЕГУЛИРУЕМЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЕТЯХ 0,4 КВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

В данной работе показана проблема ухудшения качества электроэнергии в современных промышленных и бытовых распределительных сетях 0,4-10 кВ. Разработан алгоритм рационального выбора силового оборудования для регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств.

Ключевые слова: *качество электроэнергии, распределительные сети, фильтрокомпенсирующее устройство.*

Постановка проблемы

Ухудшение качества электроэнергии – одна из проблем современного электроснабжения. В России ГОСТ Р 54149-2010 регламентирует тринадцать показателей качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения.

Сложившаяся сегодня практика регулирования качества электроэнергии, как правило, ограничивается контролем двух показателей: отклонение напряжения и частоты. При этом меньшее внимание уделяется нормированию показателей, связанных с высшими гармониками тока и напряжения.

Основными источниками гармоник искажений в сети являются нагрузки крупных промышленных потребителей с нелинейными вольт-амперными характеристиками, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы.

Но в последние годы наблюдается значительное ухудшение качества электроэнергии и в городских распределительных сетях 0,4-10 кВ. Это объясняется увеличением доли нелинейной нагрузки коммерческих и офисных потребителей.

Примеры нелинейных нагрузок:

- промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители);
- преобразователи частоты для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока;
- источники бесперебойного питания;
- офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.);
- бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы);
- некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

Ухудшение качества электроэнергии в распределительных сетях характерно для большинства развитых стран и приводит к серьезным от-

рицательным последствиям, основными из которых являются следующие:

1. Увеличение потерь при передаче и распределении электроэнергии за счет дополнительного нагрева обмоток высокочастотными гармониками и сердечниками трансформаторов вихревыми токами.
2. Искажение формы кривой напряжения активизирует возникновение и протекание ионизационных процессов в изоляции электрических машин, трансформаторов и кабелей, что приводит к увеличению диэлектрических потерь и снижению срока службы электрооборудования, увеличению случаев аварий в кабельных сетях, вызванных ускоренным старением изоляции.
3. Увеличение капитальных вложений, вызванное преждевременной заменой оборудования и необходимостью проведения комплекса организационно-технических мероприятий по повышению качества электроэнергии.
4. Ложное срабатывание устройств релейной защиты и автоматики из-за высокочастотных электромагнитных помех.
5. Неправильная работа измерительных приборов и приборов учета электроэнергии (ошибка может достигать 10 %).
6. Неисправности в работе чувствительного электронного оборудования (компьютеры, принтеры и т. д.). Из-за провалов и бросков несинусоидальной формы напряжений и токов.
7. Мерцание источников света (фликер) с низкочастотным колебанием напряжения, что приводит к физиологической усталости зрения человека.
8. Перегрузка нулевых проводников токами третьей гармоники.

Анализ последних исследований и публикаций

В работе [1] рассмотрены причины и последствия ухудшения качества электроэнергии в по-

следние годы, а также классические методы решения этой проблемы в общих чертах. В научных работах [2-4] рассматриваются разновидности схем пассивных фильтров гармоник (ПФГ) и их перспективы. В публикациях [5-7] рассмотрены вопросы расчета и моделирования статического тиристорного компенсатора (СТК) для специфических потребителей.

Данная работа посвящена расчету и корректному выбору конденсаторных батарей и индуктивных реакторов для регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) и является продолжением указанных исследований.

Цель (задачи) исследования

Оптимизация алгоритмов улучшения качества электроэнергии и стабильности энергосистемы с высоким уровнем нелинейной нагрузки с помощью регулируемых ФКУ.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать качество электроэнергии в распределительных сетях 0,4-10 кВ, исследовать компенсационные характеристики различных схем и видов регулируемых ФКУ, разработать алгоритмы расчета с последующим выбором компонентов регулируемого ФКУ, промоделировать статические и динамические характеристики энергосистемы.

Основной материал исследования

Основным средством ослабления высших гармоник в системах электроснабжения являются силовые фильтры гармоник. ПФГ представляет собой частотно-селективную цепь, обеспечивающую подавление или ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. Основными достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Они дешевы, не требуют регулярного обслуживания, могут выполнять одновременно подавление гармоник и коррекцию коэффициента мощности. Как правило, используют узкополосный фильтр – последовательный колебательный контур, настроенный в резонанс на частоту определенной гармоники (рис. 1а). Также существуют несколько разновидностей типовых схем ПФГ, такие как широкополосный фильтр второго и третьего порядка (рис. 1б и 1в, соответственно) и фильтр С-типа (рис. 1г). Однако они имеют существенные недостатки: расчет и компоновка существенно сложнее узкополосного фильтра, достаточно высокие потери мощности на основной частоте, при расстройке компонентов (в том числе вследствие старения) значительно возрастают потери.

Для подавления нескольких гармоник ис-

пользуют составные фильтры, образованные параллельным соединением нескольких узкополосных фильтров. Каждый колебательный контур настроен на частоту одной из гармоник (как правило, 5-й, 7-й, 11-й, 13-й).

Но у всех ПФГ имеется серьезный недостаток – они не предполагают динамичность системы энергоснабжения. При изменении нагрузки и/или питающего напряжения возможны серьезные нарушения в нормальной работе всей системы. При изменении спектрального состава вследствие увеличения или уменьшения потребления электроэнергии ПФГ могут привести к резонансным явлениям на основной частоте, что приведет к серьезному возрастанию тока и снижению напряжения; ПФГ сложно коммутировать, т. к. их подключение в сеть сопровождается высокими бросками напряжения.

Поэтому для систем энергоснабжения с высокими динамическими временными показателями были представлены системы регулируемых источников реактивной мощности (РИРМ), которые помимо компенсации (или генерации) реактивной мощности на основной частоте могут выполнять функции фильтрации гармони-

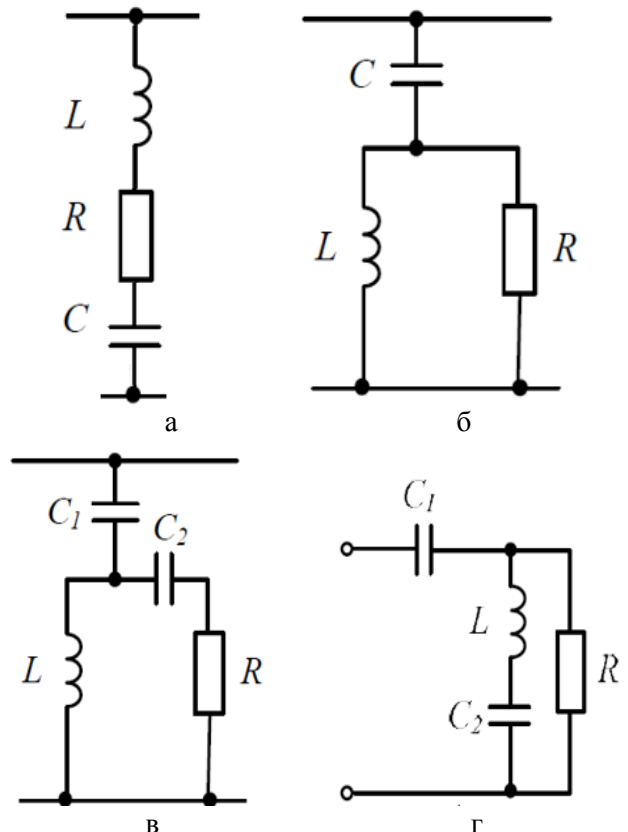


Рис. 1. Типовые схемы ПФГ:
 а – узкополосный фильтр; б – широкополосный фильтр второго порядка;
 в – широкополосный фильтр третьего порядка;
 г – фильтр С-типа

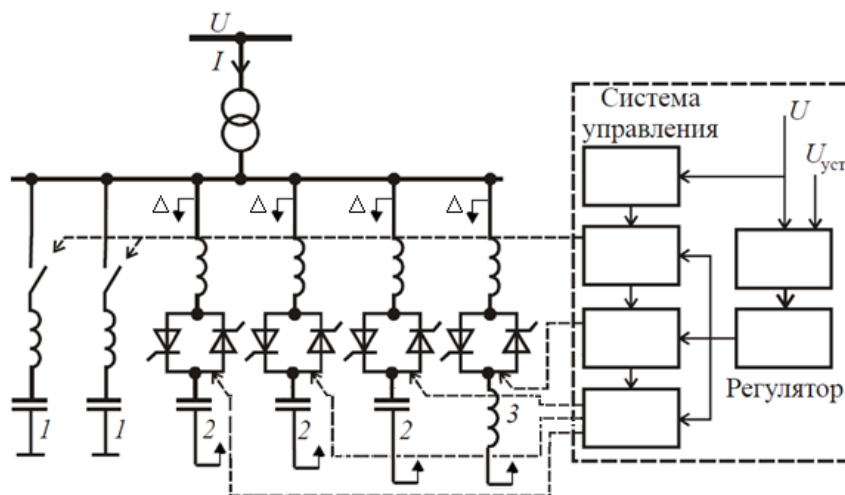


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированного СТК:
 1 – коммутируемые выключателями ПФГ; 2 – коммутируемая тиристорами ФКЦ;
 3 – управляемая тиристорами ТРГ

ческого спектра напряжения и тока и стабилизации напряжения для обеспечения надлежащего качества электроэнергии.

В данной работе разрабатывается алгоритм быстрого и эффективного выбора конденсаторной батареи и индуктивного реактора для пассивного фильтра гармоник и СТК на напряжении 0,4 кВ. Принципиальная схема такого РИРМ приведена на рисунке 2.

Цепи ПФГ постоянно включены, соединены по схеме «звезда», в то время как компоненты СТК соединены по схеме «треугольник», а конденсаторная батарея настраивается с индуктивным реактором в резонанс на 5-ю гармонику, что нивелирует возможное гармоническое искажение от СТК и обеспечивает дополнительную

фильтрацию гармонического состава.

Разработана методика, которая позволяет для данной системы электроснабжения автоматически выбирать силовые компоненты для предложенной РИРМ при изменении уровня нелинейной нагрузки 0,4 кВ, ее типа и мощности и проверять соответствия уровня искажения напряжения THD на шинах 0,4 кВ ТП. Такая схема РИРМ может применяться как для дуговых сталеплавильных печей, так и для систем электропередач для повышения стабильности электроснабжения и повышения качества электроэнергии.

Блок-схема алгоритма расчета и выбора силовых компонентов РИРМ представлена на рисунке 3.

Модель системы электроснабжения приведена

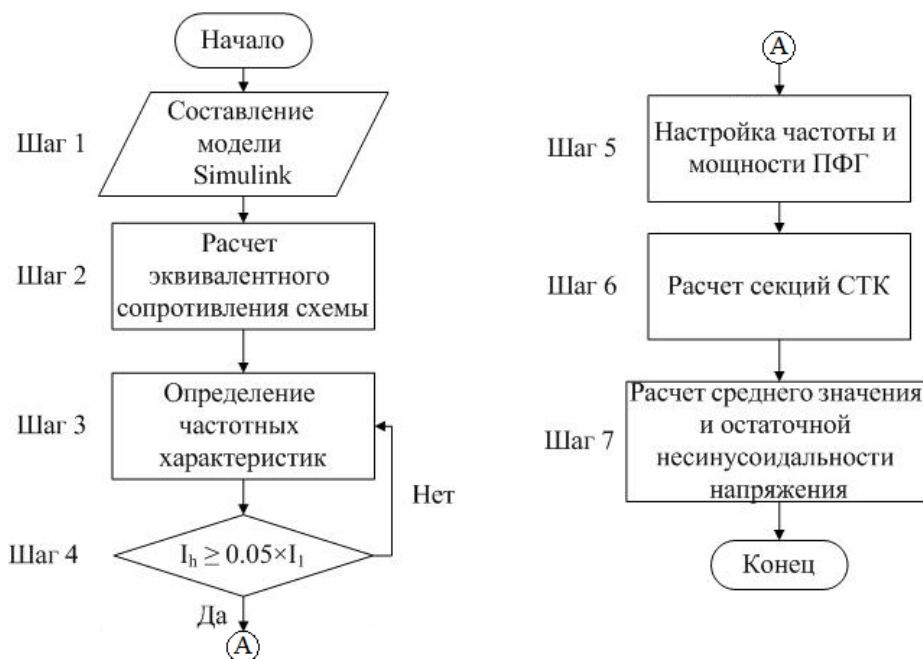


Рис. 3. Алгоритм расчета и выбора силовых компонентов СТК

на рисунке 4а и состоит из внешней системы питания, соединительной линии ААШВ 3х95, трансформатора ТМ-2500/10, потребителя с высокой долей нелинейной нагрузки и реактивной мощности (рис. 5) и СТК.

Суть алгоритма состоит в следующем. Составляется модель Simulink и производится ввод параметров компонентов. Далее находится эквивалентное сопротивление сети и нагрузки на частоте первой гармоники (МОм):

$$Z_{ЭК} = \frac{(R_{пер_эк} + j \cdot X_{пер_эк}) (R_{нагр} + j \cdot X_{нагр})}{(R_{пер_эк} + R_{нагр}) + j (X_{пер_эк} + X_{нагр})},$$

где $R_{пер_эк}$ и $X_{пер_эк}$ – переходные активное и реактивное сопротивления сети; $R_{нагр}$ и $X_{нагр}$ – активное и реактивное сопротивления нагрузки.

Производится расчет необходимой минимальной реактивной мощности конденсаторных батарей ПФГ:

$$Q_{бк_n} \geq 3 \cdot 1,2 \cdot U_{нн} \cdot I_n,$$

где $U_{нн}$ – напряжение на низкой стороне; I_n – ток n -й гармоники.

Теперь можно вывести соотношения расчетных мощностей:

$$\begin{cases} Q_{ПФГ} = Q_{\min} + \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{4} \geq Q_{бк_n} \\ Q_{ТРГ} = \frac{1,1 (Q_{\max} - Q_{ПФГ})}{4} \\ Q_{ФКЦ} = \frac{3 (Q_{\max} - Q_{ПФГ})}{4} \end{cases}.$$

Такое распределение мощности между ПФГ и СТК значительно снижает общую стоимость всей установки (за счет уменьшения мощности силовой электроники в схеме СТК) без потери функциональности.

Далее, с учетом дефицита реактивной мощности, производится выбор ФКУ, его оборудования и параметров на гармонику, которую необходимо компенсировать.

Коэффициент токораспределения между ФКУ и сетью:

$$k_{np} = \frac{\sqrt{1 + n_{ГАРМ} \cdot tg^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_{ЭК}}\right)^2 + n_{ГАРМ} \cdot tg^2}},$$

где $n_{гарм}$ – номер гармоники, которую необходимо компенсировать; R_{ϕ} – активное сопротивление фильтра.

Кратность снижения напряжений n -й гармоники:

$$k_{un} = \frac{R_{\phi}}{R_{ЭК}} \cdot \frac{k_{np}}{1 + n_{ГАРМ} \cdot tg^2}.$$

Остаточное напряжение n -й гармоники (%):

$$U_{n_ост} = k_{un} \cdot U_{n_гарм}.$$

ТНД после установки ФКУ (%):

$$k_{НС} = \sqrt{\sum U_{n_ост}^2}.$$

На рисунке 4б показана модель управления и силовой части СТК. За основу был взят пример из Matlab (MatLab / demos / SimPowerSystems / FACTSDemos / SVC (detaile dmodel), предложенного Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille). Настроенная на систему меньшей мощности и выполняющая другие функции модель из примера содержит три блока, имитирующих фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), и блок, имитирующий тиристорно-реакторную группу (ТРГ). Далее, на рисунках 4в и 4г, показаны блоки ФКЦ и ТРГ с полным представлением силовой электроники.

На рисунке 6 показаны остаточные после компенсации реактивная мощность (Q , МВАр) и напряжение на высокой стороне трансформатора (U , о.е.). Также можно увидеть значение угла открытия тиристорных ключей на ТРГ в градусах и количество подключаемых ФКЦ в каждый момент времени.

Таким образом, для рассмотренного примера электроснабжения подстанции промпредприятия с трансформатором мощностью 2500 кВА, с учетом дефицита реактивной мощности в 3 МВАр на пике потребления, выбрано ПФГ 5-й гармоники с параметрами $Q_{бк}=1356$ кВАр, реактор 2хРТСТ-820-0,027, $R_{\phi}=6$ МОм, ПФГ 7-й гармоники с параметрами $Q_{бк}=291$ кВАр, реактор 2хРТСТ-660-0,064, $R_{\phi}=8$ МОм, для СТК подо-

Трёхфазный источник напряжения
10 кВ

TM 2500/10

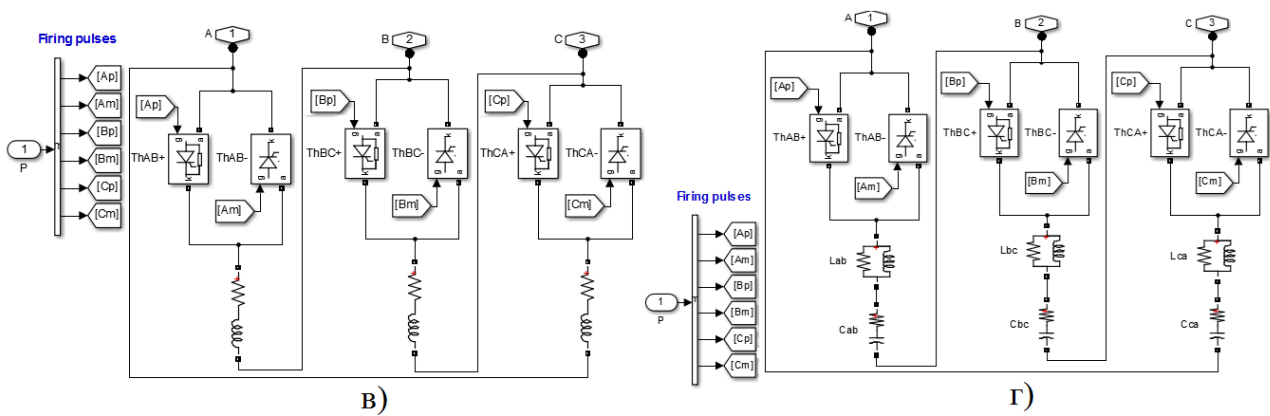
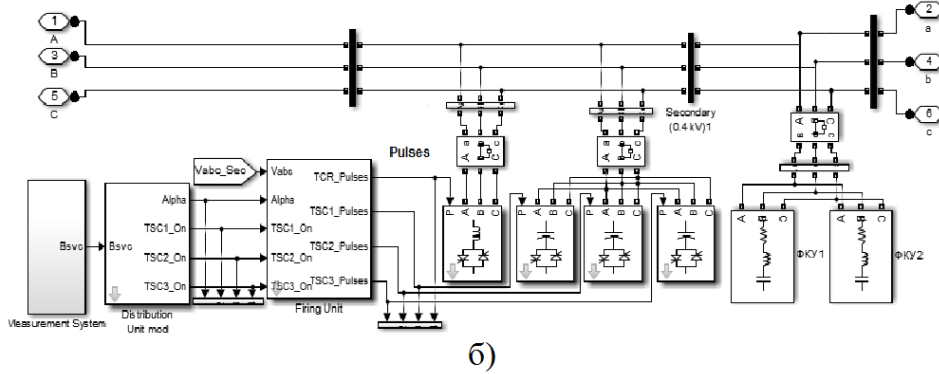
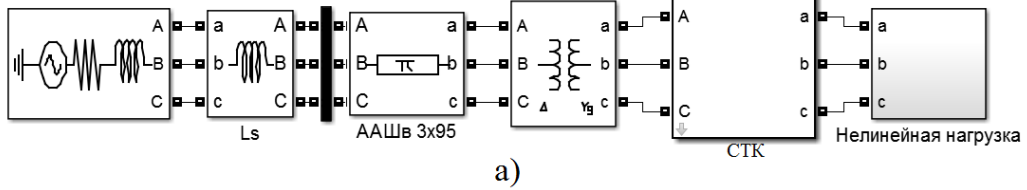


Рис. 4. Модель Simulink:

а – система электроснабжения; б – СТК; в – силовой блок ТРГ; г – силовой блок ФКУ

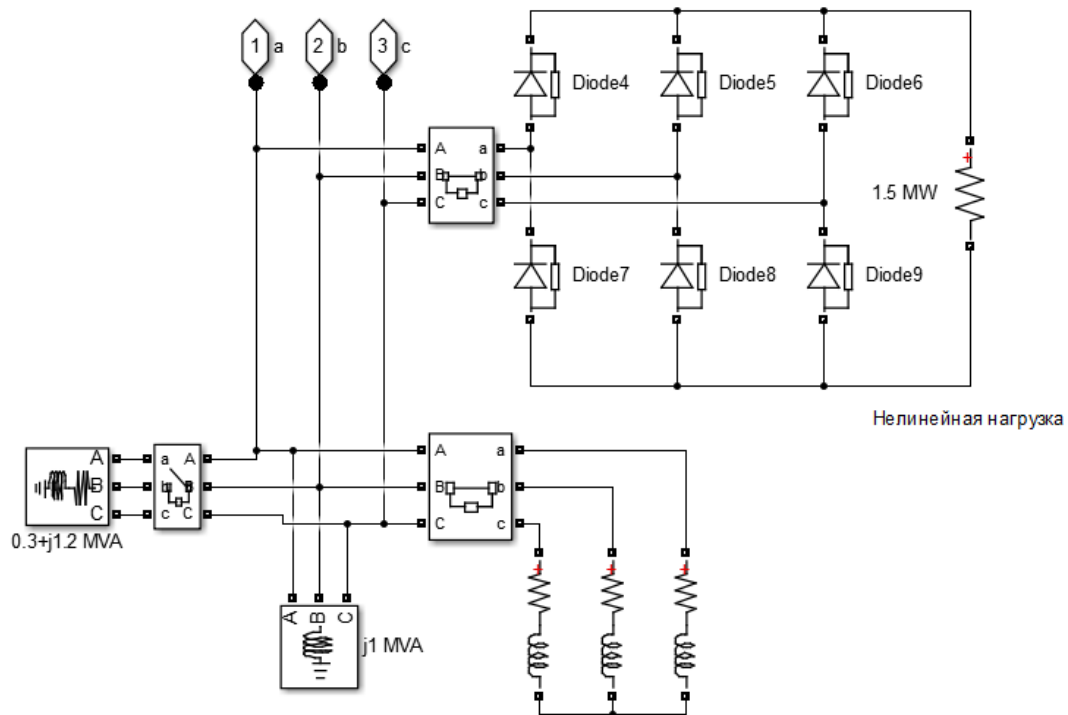


Рис. 5. Нелинейная нагрузка

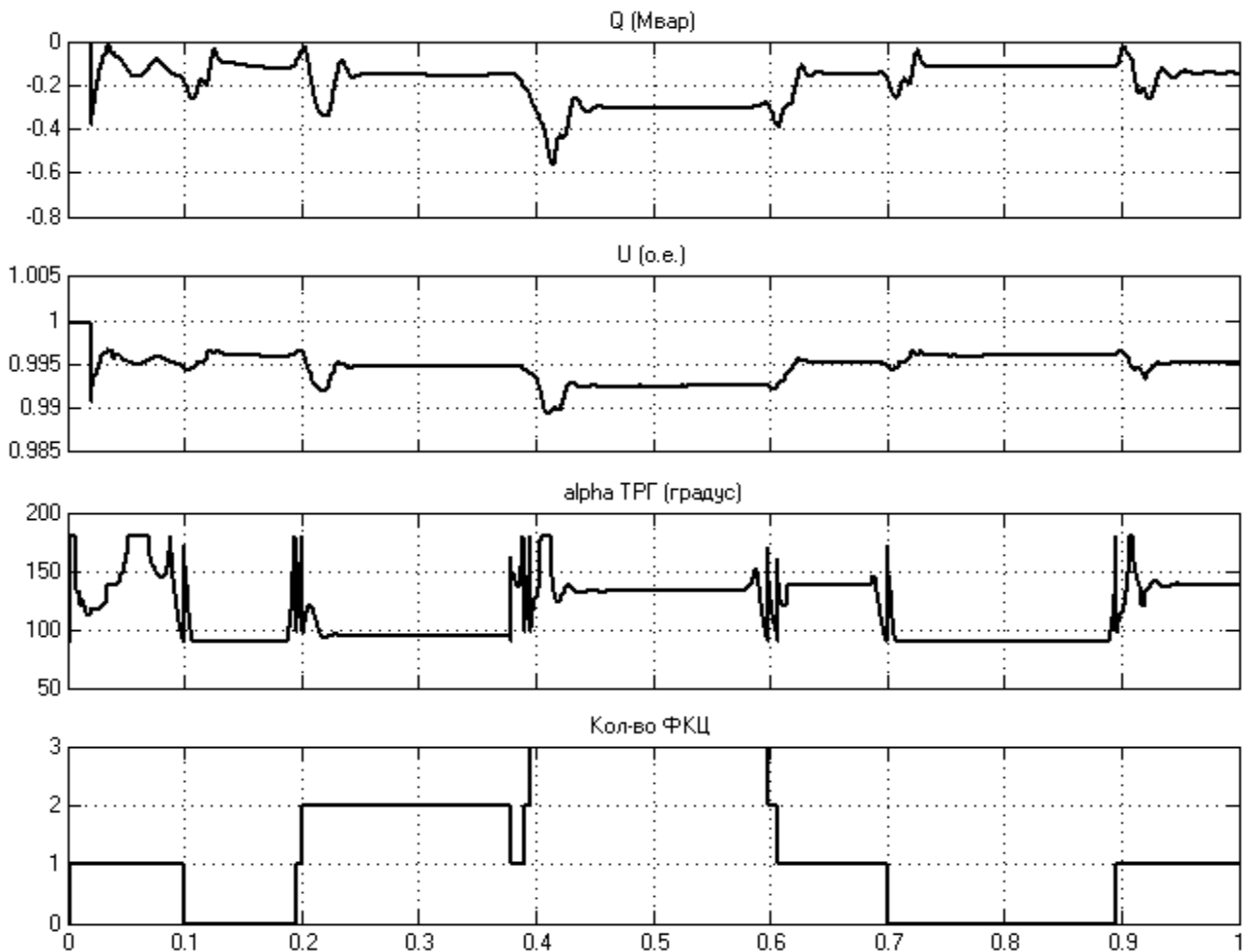


Рис. 6. Результаты моделирования во времени, с

браны три ФКЦ с параметрами $Q_{\text{ок}}=552$ кВАр и ТРГ РТСТ-410-0,076.

Выводы

В результате проведенной работы приведена схема СТК, содержащая цепи ПФГ, и разработана методика автоматизированного рационального выбора силовых компонентов на основании номиналов электрооборудования, выпускаемого отечественными производителями. Правильность выбора проверена путем моделирования в пакете прикладных программ Matlab R2014.

Список литературы

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Yao, X. The method for designing the third order filter // Proc. 8th IEEE ICHQP, 14-16 Oct. 1998, Athens. – Athens (Greece): IEEE, 1998. – P. 139-142.
3. Das, J. Passive filters – potentialities and limitations // IEEE trans. on industry applications. – 2004. – No. 1. Vol.40. – P. 232-241.

4. Koval, D. Power quality characteristics of computer loads / D. Koval, C. Carter // IEEE trans. on industry applications. – 1997. – No. 3. Vol. 33. – P. 613-621.
5. Корнилов, Г.П. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий: учеб. пособие / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храпшин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 239 с.
6. Pardeep, S.V. Power System Stability Improvement of Long Transmission Line System by Using SVC / S. V. Pardeep, K. G. Vijay // International Journal of Engineering Research and Application. – 2013. – Vol. 3. Issue 5. – P. 01-03.
7. Николаев, А.А. Определение оптимального режима работы статического тиристорного компенсатора в условиях сильных отклонений напряжения / А.А. Николаев, В.В. Анохин, В.С. Ивекеев // Инновации в науке: сб. ст. по матер. ЛП междунар. науч.-практ. конф., 28.12.2015 г., Новосибирск. – Новосибирск: СибАК, 2015. – Ч. 1, № 12 (49). – С. 46-55.

I.A. Bershadsky / Dr.Sci. (Eng.), V.V. Yakimishina /Cand. Sci. (Eng.), V.G. Danilov
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

**THE SELECTION OF ADJUSTABLE FILTER COMPENSATING DEVICES
 IN 0.4 KV NETWORKS WITH NONLINEAR LOADS**

Background. The power quality is one of the problems of the modern electricity supply. The current practice of power quality control is limited to monitoring several parameters: deviation of voltage, frequency, and harmonic composition. The main sources of deterioration of the quality of electric power supply are loads of large industrial customers with nonlinear current-voltage characteristics, which when working create the currents of non-sinusoidal shape.

Materials and/or methods. To optimize the algorithms for improving power quality and stability of power system with high levels of nonlinear loads using adjustable filter compensating devices (FCD) it is necessary to solve the following tasks: to analyze the power quality in distribution networks 0.4-10 kV, study compensation characteristics of different schemes and types of adjustable FCD, develop methods and algorithms for calculating the configuration with subsequent rational choice of adjustable FCD components, simulate static and dynamic characteristics of the power system.

Results. For the power supply of an industrial enterprise substation with transformer capacity of 2500 kVA, taking into account the deficit of reactive power in 3 MVAR at peak consumption, selected: passive harmonic filters (PHF) of the 5th harmonic with the parameters $Q_{bc}=1356$ kVAR, reactor 2xPTCT-820-0,027, $R_f=6$ мΩ; PHF of the 7th harmonic with the parameters $Q_{bc}=291$ kVAR, reactor 2xPTCT-660-0,064, $R_f=8$ мΩ. For static thyristor compensator (STC) chosen three filter compensating circuits (FCC) with the parameters $Q_{bc}=552$ kVAR and thyristor-reactor group (TRG) PTCT-410-0,076.

Conclusion. The result shows a diagram of STC containing a chain of PHF and the method for computer-aided rational selection of the power components on the basis of the values of electrical equipment produced by domestic manufacturers. The correct choice is checked by simulation in the software package Matlab R2014.

Keywords: power quality, distribution networks, filter compensating device.

Сведения об авторах

И.А. Бершадский

Телефон: +380 (50) 212-20-15

Эл. почта: ibersh@rambler.ru

В.Г. Данилов

Телефон: +380 (66) 800-12-10

Эл. почта: danilov1011100@gmail.com

В.В. Якимшина

Телефон: +380 (50) 705-03-39

Эл. почта: yvsm@list.ru

Статья поступила 23.05.2017 г.

© И.А. Бершадский, В.В. Якимшина, В.Г. Данилов, 2017

Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев



Видеожурнал **“ДОНЕЦКИЙ ПОЛИТЕХНИК”**
 смотрите каждую субботу
 на телеканале **ОПЛОТ 2**
 YouTube <https://goo.gl/d2kKr0>