

УДК 621.314

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ И ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Канд. техн. наук. Е. В. Ягуп

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ І ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Канд. техн. наук. К. В. Ягуп

**CALCULATION OF PARAMETERS OF REACTIVE POWER COMPENSATION USING THE MODEL AND SEARCH OPTIMIZATION**

PhD in Technical Science K. Iagup

*Статья посвящена вопросам компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения с целью улучшения качества электрической энергии и снижения потерь в линиях электропередачи. Для проведения исследования используется компьютерная программа MATLAB. С помощью блоков библиотеки SimPowerSystem сформирована визуальная модель трехфазной системы электроснабжения с несимметричной активно-индуктивной нагрузкой. С использованием встроенных средств поисковой оптимизации величина реактивной мощности снизилась фактически к нулю, а фазные токи выровнялись.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, несимметричная нагрузка, реактивная мощность, устройство компенсации

*Стаття присвячена питанням компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з метою поліпшення якості електричної енергії і зниження втрат в лініях електропередачі. Для проведення дослідження використовується комп'ютерна програма MATLAB. За допомогою блоків бібліотеки SimPowerSystem сформована візуальна модель трифазної системи електропостачання з несиметричним активно-індуктивним навантаженням. Із використанням вбудованих засобів пошукової оптимізації величина реактивної потужності знизилася фактично до нуля, а фазні струми вирівнялися.*

**Ключові слова:** система електропостачання, несиметричне навантаження, реактивна потужність, пристрій компенсації.

*Article is dedicated to problem of reactive power compensation in the power system, to improve the quality of electricity and reduce losses in transmission lines. To conduct the study used a computer program MATLAB. With a library of blocks formed SimPowerSystem visual model of three-phase power supply system with asymmetric active-inductive load was formed.*

*Searching of parameters of reactive power compensator was carried out with the help of search optimization Nelder-Mead method, which is implemented by built-in function fminsearch. In the model of reactive power compensator is presented interphase capacitors that are connected to power lines connected in triangle.*

*Optimization parameters are the interfacial capacitance values of capacitors, and the efficiency function is a mean-functional constructed from the values of reactive power of supplies. When working model in the unbalanced load has been demonstrated asymmetry of the phase currents and reactive power initiation in the system. The optimization was found values of the capacitors in which the reactive power in system disappears, and phase currents are equalized and significantly reduced.*

**Keywords:** power system, unbalanced load, reactive power, compensation device.

**Введение.** Электроснабжение предприятий, железных дорог, коммунальных объектов осуществляется от трехфазных сетей. На практике нагрузка в сетях носит активно-индуктивный характер и распределяется неравномерно. Это вызывает появление реактивной мощности в системе электроснабжения и несимметрию в электрических сетях, что негативно влияет на оборудование потребителей, вызывает дополнительные потери и снижает качество электрической энергии в целом [1-5].

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями.** Вопрос компенсации реактивной мощности в сетях электроснабжения представляется актуальным в связи с увеличением числа потребителей электрической энергии, внедрением нового оборудования, растущими требованиями к качеству электрической энергии и ежегодно увеличивающейся цене энергоресурсов. Поэтому в последнее время в практической деятельности все большее внимание уделяется разработке средств и методов расчета устройств для компенсации реактивной мощности на базе современных математических методов [7, 8, 9].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известно, что реактивную мощность позволяет свести практически к нулю использование компенсирующего устройства с реактивными элементами [1, 6, 7, 8]. Такой способ компенсации относительно прост с конструктивной точки зрения и легко реализуется на практике [8]. Суть этого метода заключается в том, что при активно-индуктивной нагрузке отстающий от напряжения ток можно сместить в нужном направлении, включив в такую электрическую схему дуальный индуктивности элемент – конденсатор. Однако возникают трудности, связанные с точным выбором значений параметров компенсирующих конденсаторов. Решением такой проблемы может быть использование специальных микропроцессорных систем управления автоматическими компенсаторами реактивной мощности на базе силовой полупроводниковой техники

[6]. В [9] была рассмотрена возможность практически полной компенсации реактивной мощности и симметрирования фазных токов сети с подключением межфазных компенсирующих конденсаторов. Исследования в [9] были основаны на разработке специальной математической модели, реализованной с помощью программы MathCAD. Такой подход требует, однако, составления уравнений модели и реализации в ней условий полной компенсации реактивной мощности. Использование SimPowerSystem позволяет исключить этап записи уравнений, поскольку при этом уравнения формируются автоматически по виду визуальной модели [10].

**Определение цели и задачи исследования.** Целью статьи является разработка компьютерной модели трехфазной системы электроснабжения с компенсирующим устройством, реализованная в программе MATLAB, и настройка ее с использованием поисковой оптимизации на полную компенсацию реактивной мощности в системе.

**Основная часть исследования.** Рассмотрим трехфазную систему электроснабжения с одинаковыми активными сопротивлениями и индуктивностями линий электропередач равными соответственно

$$r_a = r_b = r_c = 0.1 \text{ Ом}$$

$$L_a = L_b = L_c = 0.001 \text{ Гн},$$

источниками ЭДС сдвинутыми относительно друг друга на 120 эл. градусов с равными амплитудами  $U_a = U_b = U_c = 100 \text{ В}$ . Параметры нагрузки

$$R_{на} = 0.7 \text{ Ом}; L_{на} = 0,005 \text{ Гн};$$

$$R_{nb} = 1 \text{ Ом}; L_{nb} = 0,01 \text{ Гн};$$

$$R_{nc} = 2 \text{ Ом}; L_{nc} = 0,04 \text{ Гн},$$

что обеспечивает существенную несимметрию системы электроснабжения.

Компенсацию реактивной мощности будем осуществлять компенсирующим устройством, которое состоит из межфазных конденсаторов  $C_{ab}, C_{bc}, C_{ca}$ , соединенных треугольником (рис. 1).

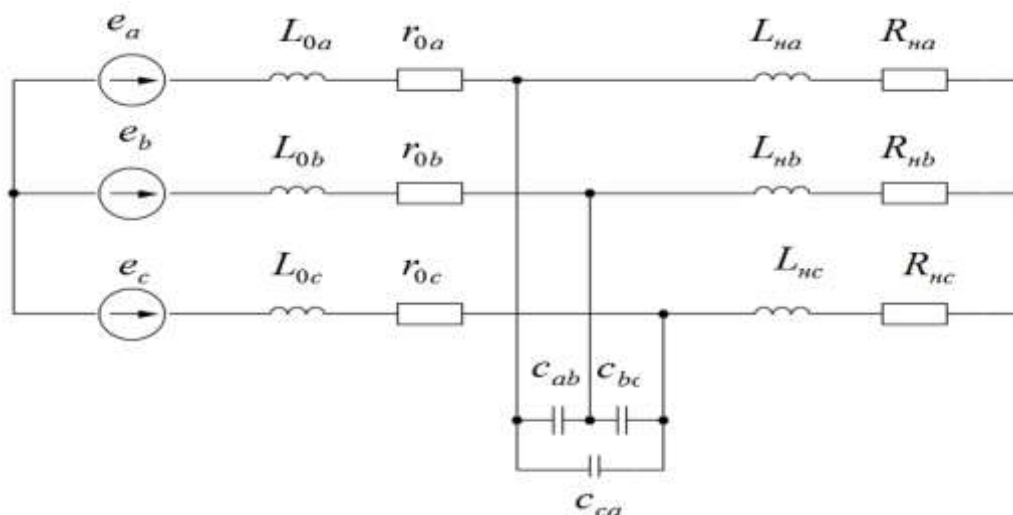


Рис. 1. Трехфазная электрическая сеть с конденсаторным устройством компенсации реактивной мощности.

На рис. 2. приведена компьютерная модель трехфазной системы электроснабжения при несимметричной активно-индуктивной нагрузке, реализованная в SimPowerSystem.

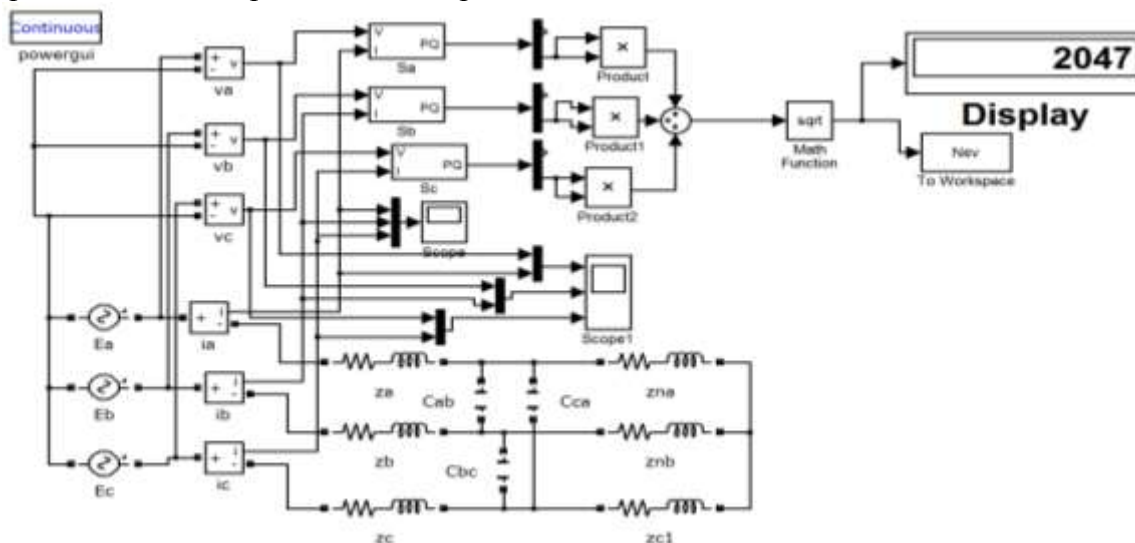


Рис. 2. Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения при отсутствии компенсации реактивной мощности.

Модель состоит из источников напряжений, значения напряжений и токов с которых снимаются виртуальными вольтметрами и амперметрами. С измерительных приборов значения передаются на устройство расчета активной и реактивной мощностей. Значения индуктивностей и сопротивлений  $z_a$ ,  $z_b$ ,  $z_c$  и нагрузки  $z_{na}$ ,  $z_{nb}$ ,  $z_{nc}$  были установлены в соответствии с вышеуказанными параметрами. Для выявления влияния несимметрии на работу системы электроснабжения в модели было отключено компенсирующее устройство установлением

свойств межфазных конденсаторов Open circuit. Модель позволяет измерять токи и напряжения и выводит их мгновенные значения на виртуальные осциллографы. На осциллографе Scope отображаются значения мгновенных токов сети, а на Scope1 выводятся одновременно токи и напряжения источников каждой отдельной фазы. На регистратор Display выводится среднеквадратичный функционал из реактивных мощностей (сконструирован по формуле  $\sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}$ ) значение которого позволяет судить о величине

реактивной мощности в трехфазной системе электроснабжения.

При работе модели использовался метод stiff 23s Розенброка. При этом шаг интегрирования был установлен равным 0.0001 с. Время прогона модели было установлено 0.06 с, что является достаточным для выхода токов и напряжений на установившийся режим.

На рис. 3. приведены временные диаграммы сетевых токов,

свидетельствующие о значительных амплитудах этих токов и существенной их несимметрии (в фазах А и В амплитуды токов превышают 30 А, а в фазе С – более 10 А). Значение среднеквадратичного функционала достигает достаточно большой величины (2047 ВАр). Эти показатели свидетельствуют о весьма неблагоприятном режиме работы системы электроснабжения

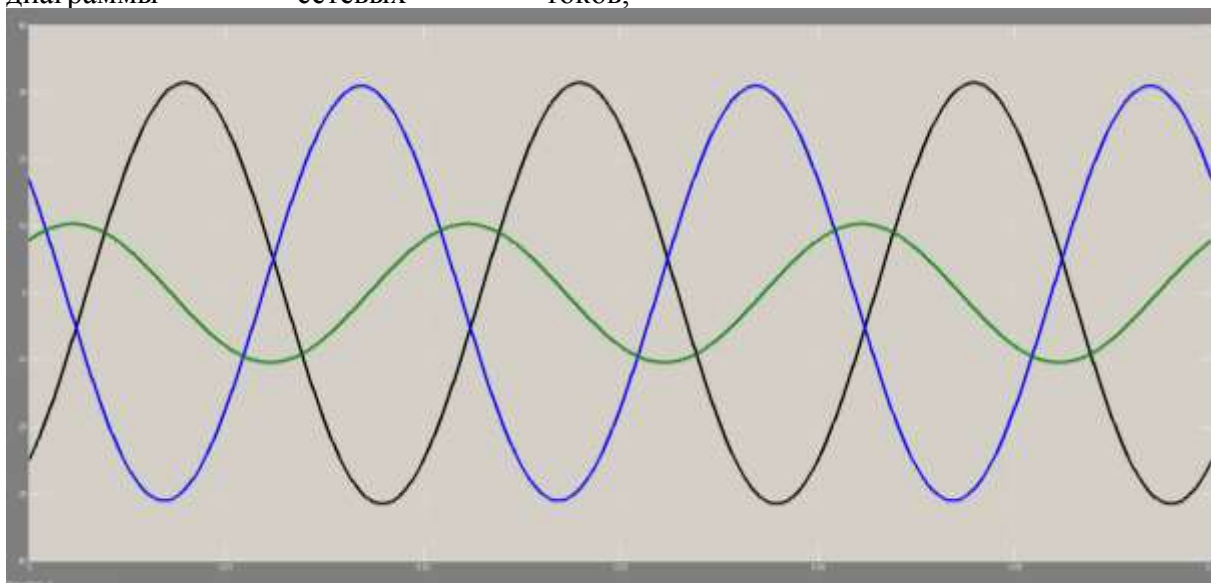


Рис. 3. Токи в фазах системы электроснабжения при отсутствии компенсации реактивной мощности.

На рис. 4. приведена компьютерная модель трехфазной системы электроснабжения с устройством

компенсации реактивной мощности, которая позволяет определить оптимальные условия компенсации.

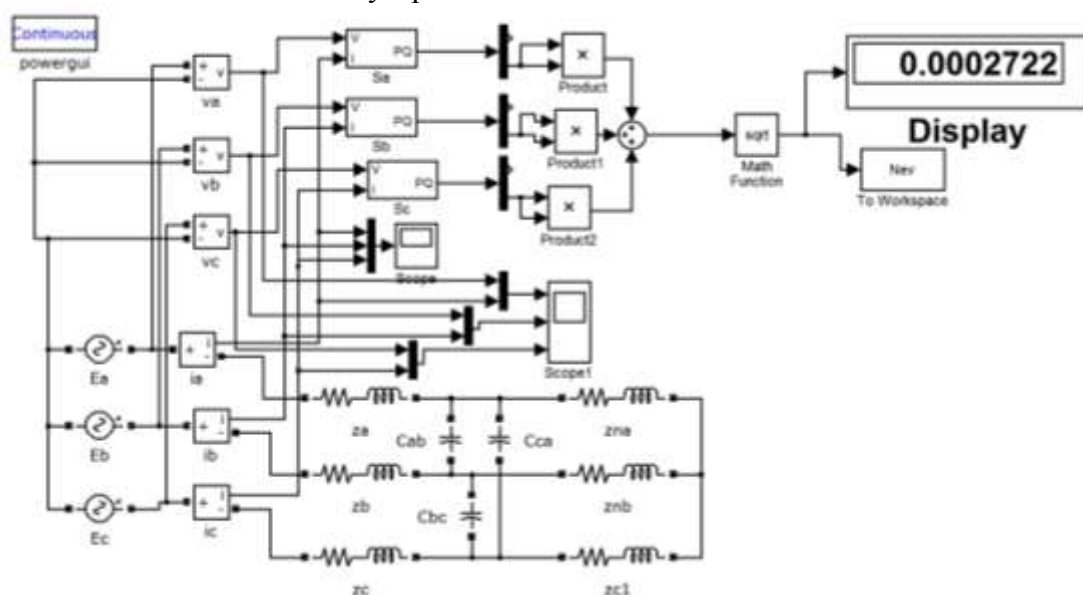


Рис. 4. Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения с симметрирующим устройством после выполнения поисковой оптимизации

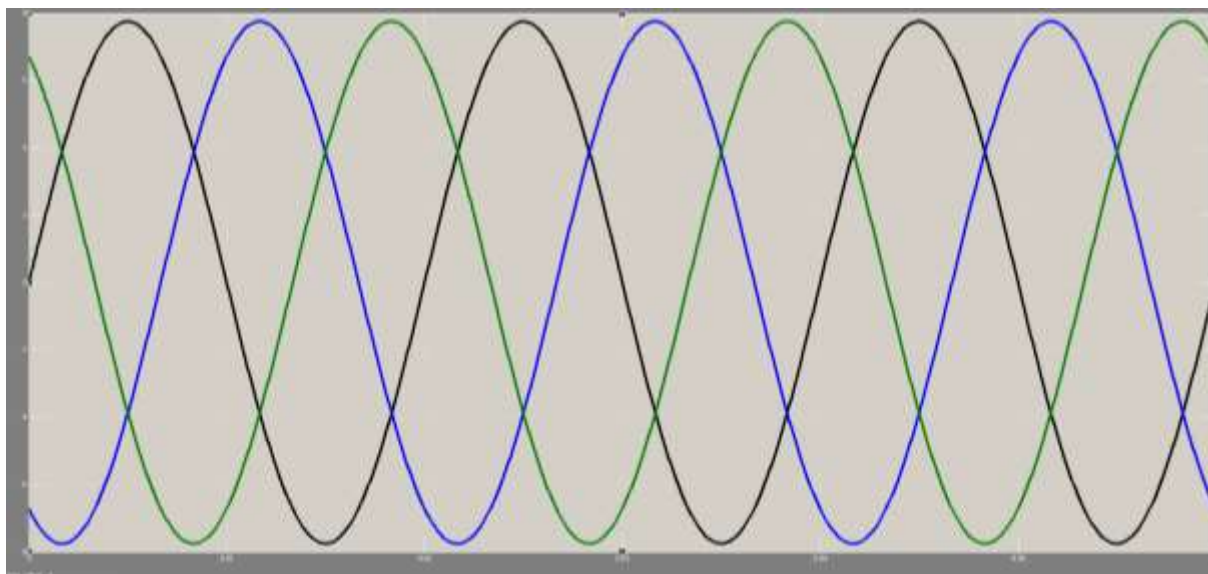


Рис. 5. Временные диаграммы фазных токов после компенсации реактивной мощности.

Поисковая оптимизация осуществлялась с использованием встроенной файл-функции `fminsearch` [10]. Предварительно выполнялся запуск модели, по окончании работы которой значение целевой функции передается с помощью блока `ToWorkspace` в рабочее пространство программы. В качестве целевой функции выбрана шаровая метрика, представляющая собой среднеквадратичный функционал, сконструированный из значений реактивных мощностей. Программа находит оптимум, воздействуя по алгоритму деформируемого многогранника на параметры оптимизации, в качестве которых выступают величины емкостей конденсаторов. В процессе оптимизации значение целевой функции уменьшилось до 0.0002722 ВАр. Найденные значения емкостей компенсирующих конденсаторов:  $C_{ab} = 5.6209e-004$  Ф,  $C_{bc} = 1.8229e-004$  Ф,  $C_{ca} = 3.4461e-005$  Ф. На рис. 5 приведены временные диаграммы фазных токов в компенсированной системе, амплитуды которых совершенно одинаковы

и составляют 7.75 А, что совпадает с найденными в [9] значениями при помощи моделирования в MathCAD. Соответственно уменьшатся потери в линиях электропередачи.

#### Выводы и перспективы.

1. Предложенный метод использования визуальной модели совместно с поисковой оптимизацией для точного расчета параметров устройства компенсации реактивной мощности дает возможность получить решение численными методами со сколь угодно заданной точностью.

2. При этом не требуется предварительное составление уравнений, описывающих модель исследуемой системы электроснабжения.

3. Предложенная методика перспективна для исследования не только линейных систем электроснабжения, но и для систем с нелинейными элементами, в том числе с силовыми полупроводниковыми приборами.

#### Список использованных источников

1. Минин, Г.П. Реактивная мощность. [Текст] / Г.П. Минин. – М. Энергия, 1978. – 88 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

3. . Гарро, М. Электрическая тяга [Текст] / М. Гарро. – М.: Гос. трансп. железнодорож. изд-во, 1959. – 387 с.
4. Мадьяр Л. Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) Мадьяр Леон. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 376 с.
5. Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов – К.: Наукова думка, 1985. – 324 с.
6. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / [Под ред.] Р.М. Матура. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Закарюкин, В. П. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. С. Иванова // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 26–33.
8. Бардушко, В. Д. Параметрический синтез систем параллельных емкостных компенсирующих устройств в тяговой сети в современных условиях [Текст] / В. Д. Бардушко. – Електрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 8–13.
9. Ягуп, В.Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации [Текст] // В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11 (186). – С. 449–454.
10. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

Рецензент докт. техн. наук, профессор Я.В.Щербак

---

Ягуп Катерина Валеріївна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричної тяги Українського державного університету залізничного транспорту.  
Тел. (057)730-10-76.

Iagup Katerina Valeriivna, cand. of techn. Sciences, the senior lecture of Department of automated electric transport systems of the Ukrainian State University of Railway Transport.  
Tel. (057)730-10-76.