

УДК 621.314.25

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Канд. техн. наук Е. В. Ягуп

**МОДЕЛЮВАННЯ НЕСИММЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ**

Канд. техн. наук К. В. Ягуп

**SIMULATION OF ASYMMETRICALLY POWER SUPPLY SYSTEMS WITH USING OPTIMIZATION FOR DETERMINING PARAMETERS OF BALANCING DEVICE**

Cand. of techn. sciences K. Yagup

*Рассматривается возможность устранения несимметрии в сети электроснабжения с использованием симметрирующего устройства, представляющего собой комплект конденсаторных батарей, соединенных в треугольник. Для определения параметров симметрирующего устройства применяется поисковая оптимизация. Реализация метода осуществлена на визуальной модели средствами программы MATLAB и ее приложений Simulink и SimPowerSystems. В результате выполнения поисковой оптимизации режим работы сети стал симметричным, амплитуды сетевых токов снизились в несколько раз, а реактивная мощность сети сведена практически до нуля.*

**Ключевые слова:** трехфазная система, несимметрия, поисковая оптимизация, симметрирующее устройство.

*Розглядається можливість усунення несиметрії в мережі електропостачання з використанням симетруючого пристрою, що являє собою комплект конденсаторних батарей, з'єднаних в трикутник. Для визначення параметрів симетруючого пристрою застосовується пошукова оптимізація. Реалізація методу здійснена на візуальній моделі засобами програми MATLAB і її додатків Simulink і SimPowerSystems. В результаті виконання пошукової оптимізації режим роботи мережі став симетричним, амплітуди мережних струмів знизилися в кілька разів, а реактивна потужність мережі була зведена практично до нуля.*

**Ключові слова:** трифазна система, несиметрія, пошукова оптимізація, симетруючий пристрій.

*The asymmetry of the network reduces technical and economic indexes of supply network itself and its customers. It is advisable for asymmetry elimination, to use a special balancing equipment, which consists of capacitor battery set connected in a triangle.*

*The possibility of determining the values of parameters of balancing equipment using search optimization is considered. Implementation of the method performed on a visual model of the software MATLAB and its applications Simulink and SimPowerSystems. To perform search optimization the built-in MATLAB function `fminsearch()` was used. The efficiency function is*

*formulated as root-mean-square functional that uses effective voltage values measured at the terminals of the load, and the optimization parameters are the values of balancing capacitors.*

*As a result of search optimization symmetrical operation of three-phase power supply system has been determined. By rotation of balancing system full compensation of reactive power in the system was achieved. Amplitude values of network currents became several times smaller. The possibility of switching to a two-element balancing system was shown.*

**Keywords:** *three-phase system, asymmetry, search optimization, balance device.*

**Актуальность.** Несимметрия сети снижает технико-экономические показатели работы, как самой сети электроснабжения, так и ее потребителей [1-3]. При несимметричных режимах возникают токи и напряжения нулевой и обратной последовательностей, создающие магнитные поля, вращающиеся встречно вращению ротора электродвигателя [4-7]. При этом срок службы асинхронного двигателя может сократиться вдвое при его питании от несимметричной системы электроснабжения. Поэтому задача устранения несимметрии является актуальной.

Одним из важнейших параметров качества электрической энергии является коэффициент несимметрии напряжения, нормально допустимая величина которого равна 2 %, а предельно допустимая 4 % [1-3]. Одной из причин возникновения несимметрии в сетях электроснабжения является питание электропоезда от двух фаз на железных дорогах [8].

Применение схем, состоящих из трех батарей конденсаторов с различными емкостями, включенными в треугольник, является экономически целесообразным и надежным средством [1-3, 9]. Кроме того, использование такого устройства дает возможность не только симметризовать токи, но и компенсировать реактивную мощность в сети. При таком способе симметрирования токов необходимо определить величины емкостей конденсаторов для оптимального режима сети электроснабжения. С этой целью в [10-13] исследовалась возможность применения метода поисковой оптимизации, реализованная на визуальной модели сети электроснабжения. Однако

мгновенные значения напряжений и токов регистрировались непосредственно на стороне источников электрической энергии. Реализация на практике такого метода является затруднительной задачей, в то время как измерение электрических величин доступно на стороне нагрузки.

**Цель и задачи исследования.** Целью статьи является оптимизация режима работы трехфазной системы электроснабжения с несимметричной нагрузкой, реализованной на визуальной модели с использованием поисковой оптимизации по критерию выравнивания напряжений на зажимах нагрузки.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Определение параметров оптимизации и формирование математического выражения для целевой функции.
2. Разработка визуальной модели трехфазной сети электроснабжения с симметрично-компенсирующим устройством, в которой измерение действующих значений напряжений осуществляется на стороне нагрузки, а не на стороне сети.
3. Применение поисковой оптимизации для определения значений параметров симметричного режима работы трехфазной сети электроснабжения.
4. Преобразование найденных после оптимизации величин параметров оптимизации для полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения.
5. Исследование возможности перехода от трехэлементной системы симметрирования на двухэлементную.

**Основная часть.** На рис. 1 изображена визуальная модель трехфазной

системы электроснабжения, реализованная в среде MATLAB и ее приложений Simulink и SimPowerSystems.

Блоки Ea, Eb и Ec представляют собой источники напряжений. Их амплитуды  $E_a = E_b = E_c = 100 \text{ В}$ , а частоты равны 50 Гц. Сопротивления линии электропередачи соответствуют блокам za, zb и zc и равны  $R_a = R_b = R_c = 0.1 \text{ Ом}$   $L_a = L_b = L_c = 0.001 \text{ Гн}$ . Блоки zna, znb,

znc представляют собой активно-индуктивную нагрузку, которая распределена неравномерно, что вызывает несимметрию сетевых токов. Параметры нагрузки соответствуют значениям:  $R_{na} = 1.5 \text{ Ом}$ ,  $R_{nb} = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_{nc} = 2 \text{ Ом}$ ,  $L_{na} = 0.025 \text{ Гн}$ ,  $L_{nb} = 0.01 \text{ Гн}$ ,  $L_{nc} = 0.04 \text{ Гн}$ . Время прогона модели составляет 0,02 с, что достаточно для установления режима модели.

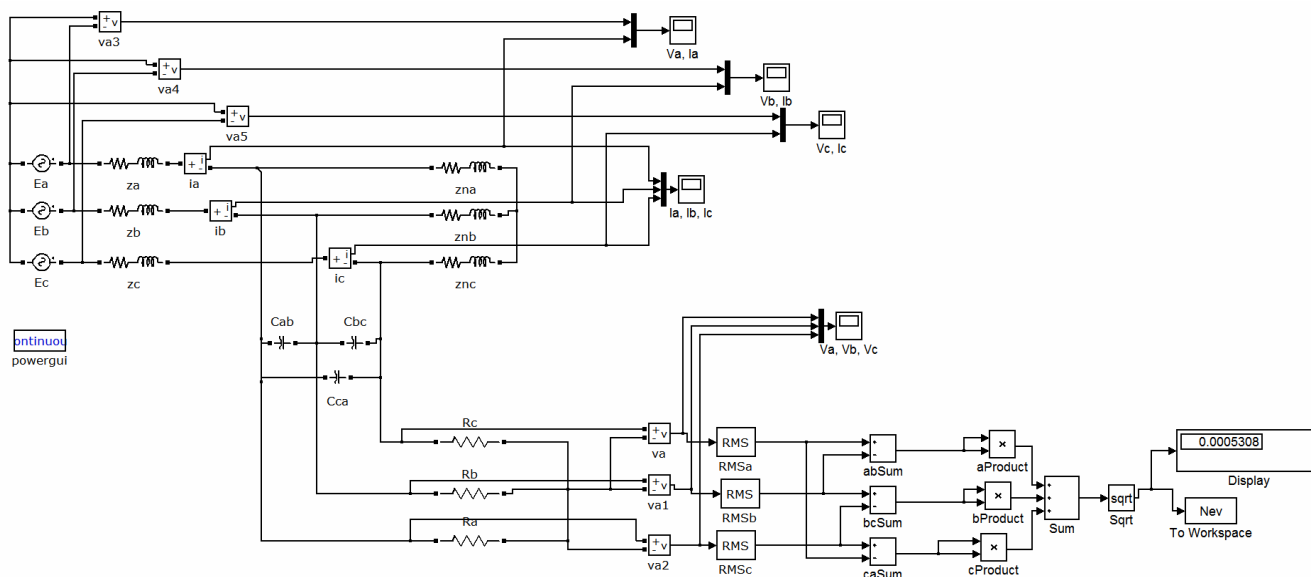


Рис. 1. Визуальная модель трехфазной трехпроводной системы электроснабжения

Симметрирующее устройство представляет собой комплект конденсаторных батарей Cab, Cbc и Cca, соединенных треугольником. Значения величин емкостей конденсаторов используются в качестве параметров оптимизации, которые в процессе поисковой оптимизации должны быть определены таким образом, чтобы режим работы сети стал оптимальным.

В качестве параметров целевой функции используются действующие

значения напряжений, измерение которых осуществляется на зажимах нагрузки. Для этого в электрическую схему системы электроснабжения включены резисторы с большими сопротивлениями, создающие искусственную нулевую точку. Эти резисторы реализованы в модели элементами Ra, Rb, Rc с сопротивлениями  $R_a = R_b = R_c = 100\,000 \text{ Ом}$ .

Целевая функция представляет среднеквадратичный функционал, реализуемый формулой

$$N = \sqrt{(V_{1a} - V_{1b})^2 + (V_{1b} - V_{1c})^2 + (V_{1c} - V_{1a})^2}$$

где  $V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}$  – действующие значения напряжений на нагрузке, относительно искусственно созданной нулевой точки.

Реализация целевой функции осуществляется группой блоков, находящихся в нижней части модели (рис. 2). Блоки RMSa, RMSb, RMSc вычисляют действующие значения напряжений относительно нулевой точки, блоки abSum, bcSum, caSum вычитают действующие значения напряжений фаз одно из другого, согласно формуле, блоки aProduct, bProduct, cProduct возводят в квадрат полученные значения, блок Sum суммирует все значения, а затем блок Sqrt извлекает квадратный корень из полученной суммы. Блок To Workspace передает значение целевой функции в рабочее пространство MATLAB. Это значение обрабатывается специальной

программой (листинг 1), которая в конечном счете, последовательным изменением значений величин емкостей конденсаторов, минимизирует значение целевой функции.

Листинг 1 иллюстрирует текст основной программы, которая выполняет поисковую оптимизацию. Во второй строке входные параметры оптимизации представлены в качестве глобальных переменных. Эти же переменные передаются в соответствующие блоки модели Cab, Cbc, Cca. В четвертой строке осуществляется вызов специальной встроенной функции fminsearch(), выполняющей поисковую оптимизацию. В квадратных скобках указан вектор начальных значений величин емкостей конденсаторов. Имя 'func\_s3fnesim' представляет собой файл-функцию, которая доставляет значение целевой функции.

```
1 warning off
2 global Cab Cbc Cca Nst
3 Nst=0
4 Y=fminsearch('func_s3fnesim',[70.1 20.1 5.1])
5 Nst
```

Листинг 1. Текст основной программы

```
1 function Nev=func_s3fnesim(x)
2 global Cab Cbc Cca Nst
3 Cab=abs(x(1))*1E-6)
4 Cbc=abs(x(2))*1E-6)
5 Cca=abs(x(3))*1E-6)
6 sim model1
7 x
8 Nst=Nst+1
```

Листинг 2. Текст дополнительной функции

В тексте файл-функции (листинг 2) строки 3 – 5 присваивают глобальным переменным абсолютные значения, так как значения емкостей должны быть положительными величинами. Оператор sim осуществляет вызов визуальной модели

model1 трехфазной системы электроснабжения, где вычисляется целевая функция, значение которой используется программой по алгоритму деформирующего многогранника.

**Анализ результатов оптимизации работы системы электроснабжения.** На рис. 2 изображены временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения в несимметричном режиме до выполнения оптимизации (блоки батарей конденсаторов  $C_{ab}$ ,  $C_{bc}$ ,  $C_{ca}$  отключены).

При работе сети в таком режиме наибольшая из амплитуд токов фаз превышала наименьшую более чем в 1,5 раза и сдвиги фаз не равнялись 120 эл. градусам.

После выполнения поисковой оптимизации при начально заданных величинах емкостей  $C_{ab} = 10.1 \Phi$ ,  $C_{bc} = 10.1 \Phi$ ,  $C_{ca} = 10.1 \Phi$  токи стали полностью симметричными (рис. 3), и их фазы теперь одинаково сдвинуты влево относительно фаз источников (рис. 4). Значения емкостей конденсаторов в результате оптимизации стали равными  $C_{ab} = 262.52 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 222.02 \text{ мкФ}$ ,  $C_{ca} = 92.367 \text{ мкФ}$ . Из рис. 3 и 4 видно, что в фазах наблюдается емкостной характер сдвига фаз, т. е. произошла

перекомпенсация, из-за чего в сети сохраняется реактивная мощность. Амплитудные значения сетевых токов стали равными 5.28 А.

Полная компенсация реактивной мощности может быть достигнута изменением значений емкостей конденсаторов на одну и ту же величину, что эквивалентно повороту симметрирующей системы векторов. Последовательно вычитаем из значений величин найденных емкостей корректирующее значение 1 мкФ до тех пор, пока сдвиги фаз токов не станут равными нулю относительно питающих напряжений. В результате найдены величины емкостей конденсаторов  $C_{ab} = 216.52 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 176.02 \text{ мкФ}$ ,  $C_{ca} = 46.367 \text{ мкФ}$ , при которых амплитуды токов уменьшились до значения 2.945 А (рис. 5).

Таким образом, при поставленных начальных условиях было осуществлено лишь симметрирование, и в зависимости от начальных условий был найден лишь «ближайший» режим симметрирования.

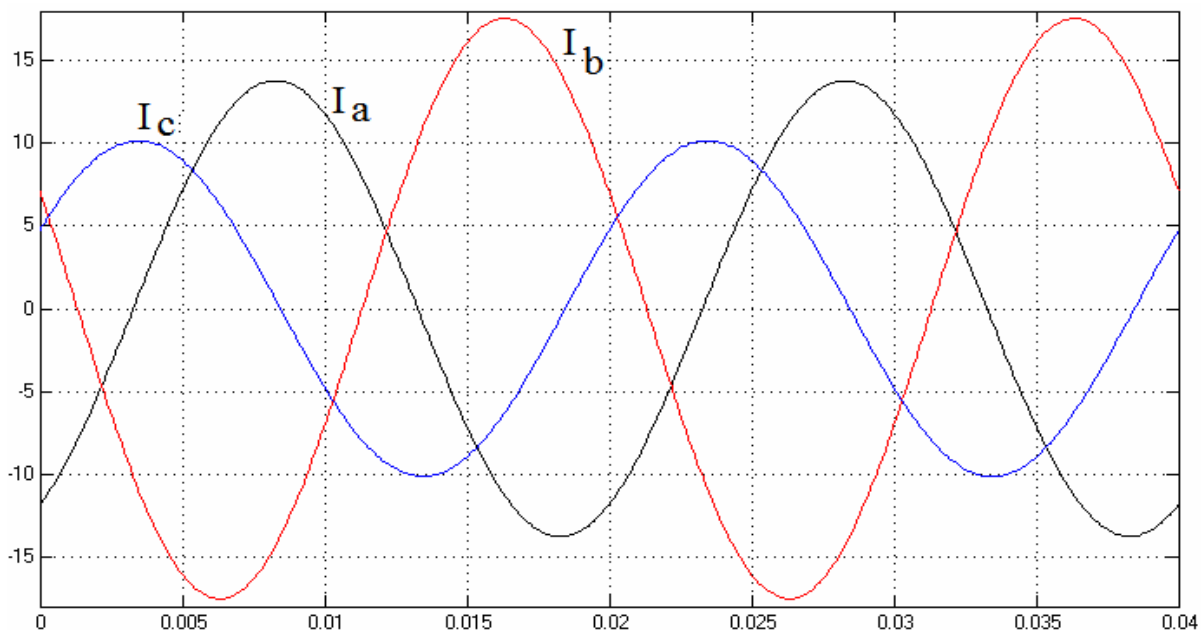


Рис. 2. Временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения в несимметричном режиме

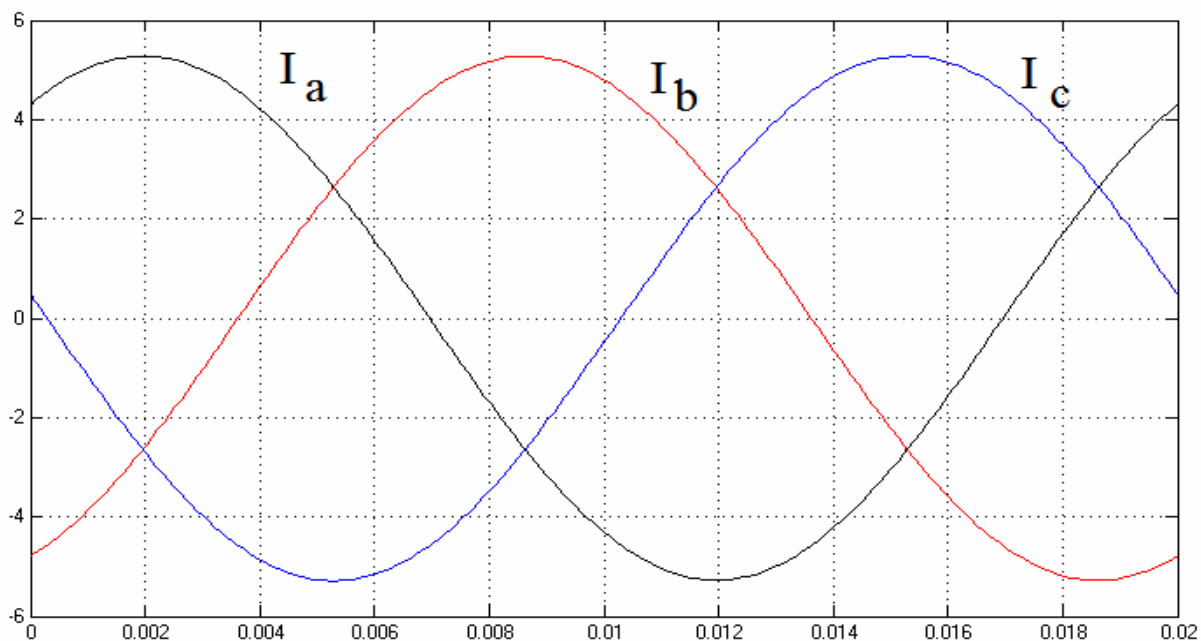


Рис. 3. Временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения после оптимизации при задании начальных параметров равными  $C_{ab} = 10.1$ ,  $C_{bc} = 10.1$ ,  $C_{ca} = 10.1$

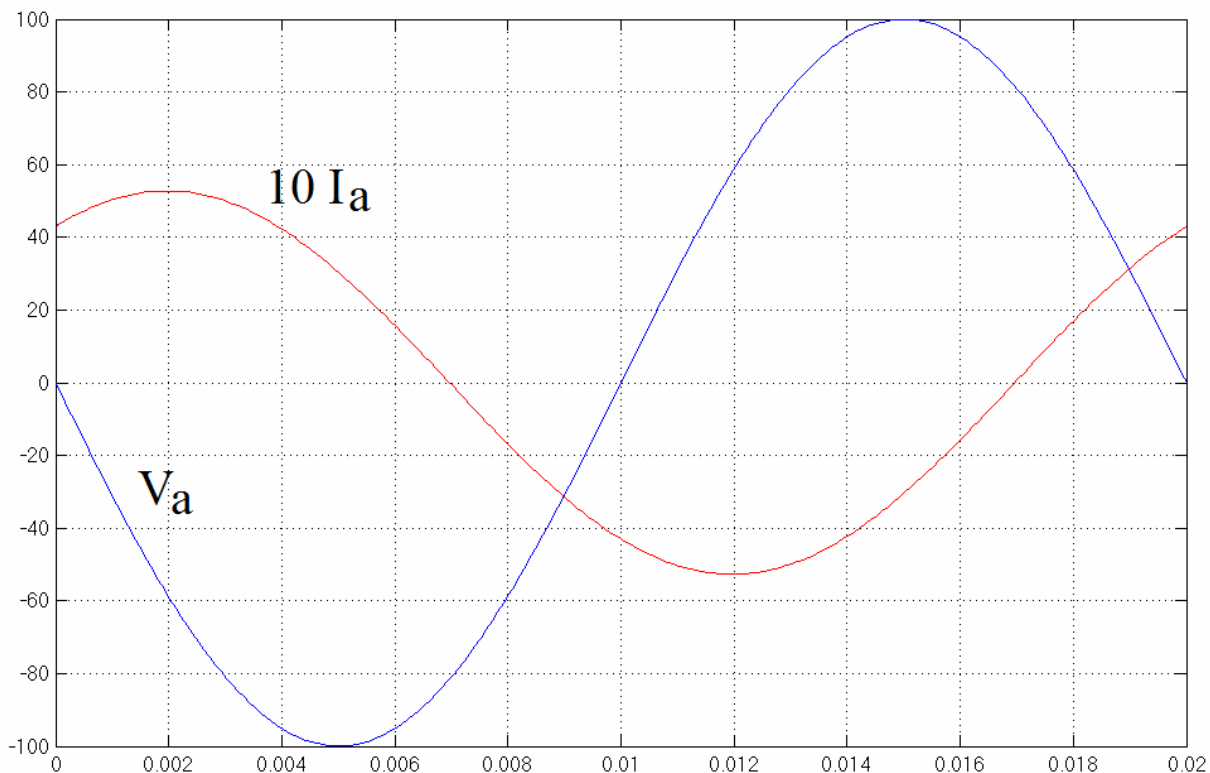


Рис. 4. Временная диаграмма напряжения и тока в фазе А после оптимизации при задании начальных параметров  $C_{ab} = 10.1$ ,  $C_{bc} = 10.1$ ,  $C_{ca} = 10.1$

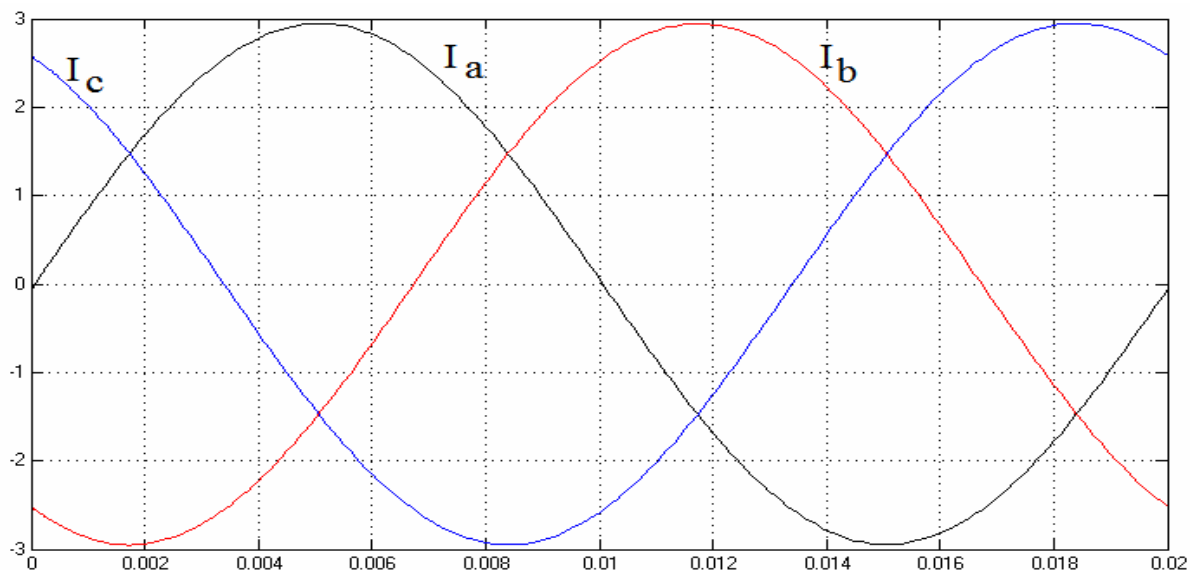


Рис. 5. Временные диаграммы сетевых токов после выполнения компенсации реактивной мощности

При изменении вектора начальных условий заданием значений емкостей равными  $C_{ab} = 70.1 \Phi$ ,  $C_{bc} = 20.1 \Phi$ ,  $C_{ca} = 5.1 \Phi$ , после выполнения оптимизации, значения емкостей конденсаторов так же изменились от найденных ранее и стали равными  $C_{ab} = 191.54 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 151.04 \text{ мкФ}$ ,

$C_{ca} = 21.379 \text{ мкФ}$  и произошла недокомпенсация – сдвиг фаз приобрел индуктивный характер (рис. 6). Амплитуда тока при этом равна 3.761 А. Последовательным увеличением значений емкостей конденсатора на 1 мкФ была достигнута полная компенсация реактивной мощности.

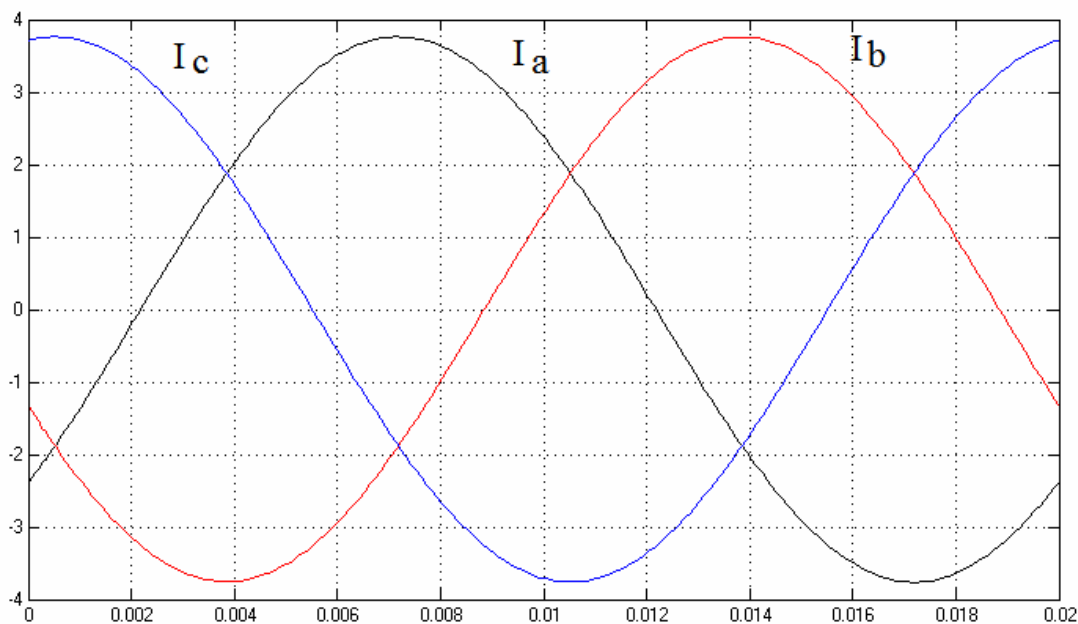


Рис. 6. Временные диаграммы сетевых токов после оптимизации при задании начальных значений емкостей  $C_{ab} = 70.1$ ,  $C_{bc} = 20.1$ ,  $C_{ca} = 5.1$

Таким образом, в результате выполнения поисковой оптимизации при задании различных начальных значений величин емкостей достигнута симметрия сетевых токов.

Для перехода к двухэлементной системе симметрирования значения емкостей конденсаторов можно определить вычитанием наименьшей величины

емкости конденсатора из больших величин емкостей [3]. Наименьшая емкость равна  $C_{ca} = 46.367 \text{ мкФ}$ . Вычитая это значение из найденных, получим  $C_{ab} = 170.153 \text{ мкФ}$ ,  $C_{bc} = 129.653 \text{ мкФ}$ ,  $C_{ca} = 0 \text{ мкФ}$ .

При запуске модели с отключением емкости  $C_{ca}$  и заданием указанных параметров  $C_{ab}$  и  $C_{bc}$  токи сети стали полностью симметричными (рис. 7).

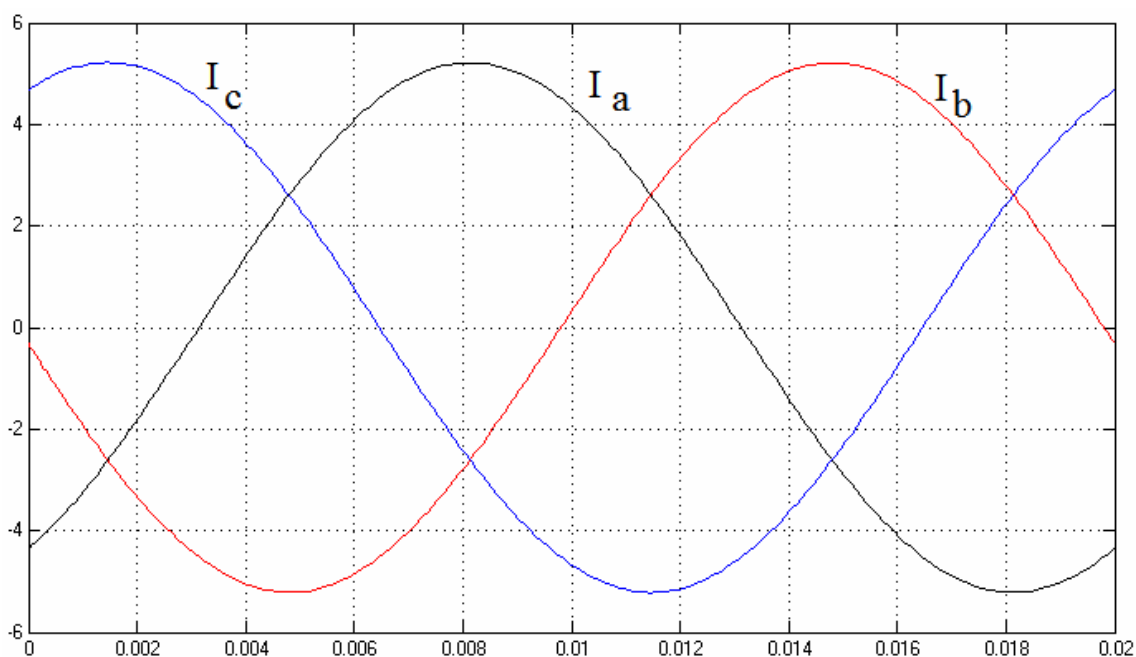


Рис. 7. Временные диаграммы сетевых токов трехфазной системы электроснабжения, отсимметрированных двухэлементной системой симметрирования

#### Выводы:

1. Для реализации поисковой оптимизации сформирована целевая функция и определены параметры оптимизации. Целевая функция составлена как среднеквадратичный функционал, в котором используются действующие значения напряжений, замеренные на зажимах нагрузки. Параметрами оптимизации являются величины емкостей симметрирующих конденсаторов.

2. Разработана компьютерная модель трехфазной трехпроводной системы электроснабжения, в которой потребление реактивной мощности от сети снижается

практически до нуля благодаря подключению симметрирующего устройства.

3. В результате проведения поисковой оптимизации определен симметричный режим работы трехфазной системы электроснабжения, при этом амплитудные значения токов уменьшились в несколько раз.

4. Путем вращения симметрирующей системы достигнута полная компенсация реактивной мощности в системе. В таком режиме работы амплитудные значения токов в линии достигли своего минимального значения.



5. Показана возможность перехода на симметрирование токов в системе двухэлементную систему симметрирования, при которой осуществляется полное электроснабжения.

*Список использованных источников*

1. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
2. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1977. – 128 с.
3. Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
4. Mirabbasi D. Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its derrection [Text] // Davar Mirabbasi, Ghodrattollah Seifossadat , Mehrdad Heidari. – Electrical and Electronics Engineering, 2009, 5–8 Nov. – pp. 189-192.
5. Khoobroo A. Effects of system harmonics and unbalanced voltages on electromagnetic performance of induction motors [Text] // Amir Khoobroo, Mahesh krishnamurthy ; Babak Fahimi ; Wei Jen Lee. – Industrial Electronics, 2008. 10-13 Nov., – pp. 1173-1178.
6. Fernando J. T. E. Ferreira. Star- and delta-connected windings tolerance to voltage unbalance in induction motors // Fernando J. T. E. Ferreira, Baoming Ge ; Enrique C. Quispe ; Aníbal T. De Almeida, Electrical Machines (ICEM), 2014, pp. 2045-2054.
7. Vinod Matta Unbalance and voltage fluctuation study on AC traction system Vinod Matta, Gaurav Kumar – IEEE, Electric Power Quality and Supply Reliability Conference 2014, pp. 303-308.
8. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
9. Annette von Jouanne. Assessment of Voltage Unbalance [Text] / IEEE Transactions on power delivery, vol. 16, no. 4, october 2001. – pp. 782-790.
10. Ягуп, В. Г. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации [Текст] / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 1. – С. 60-66.
11. Ягуп, К. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности с использованием модели и поисковой оптимизации [Текст] / К. В. Ягуп // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 150. – С. 115-120.
12. Ягуп, К. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности сети электроснабжения с трансформатором на визуальной модели [Текст] / К. В. Ягуп // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 25-32.
13. 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.

Рецензент д-р 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. E-mail.Yag.kate@rambler.ru.

Yagup 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.

Стаття прийнята 23.05.2016р.