

УДК 621.317.7

М. Л. Новоселов, аспирант
В. К. Барсуков, кандидат технических наук
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ НАГРУЗОК

Рассматриваются способы построения математической модели работы трехфазной электрической сети с различными типами нагрузок в рамках пакета программ NI Multisim и NI LabVIEW. При изменении принципа получения питающего напряжения в схеме и построении изображения трехфазной системы токов и напряжений на комплексной плоскости для получения годографа, наглядно показывающего изменение формы, отличной от синусоидальной, и характеризующего нагрузку генератора, осуществляется анализ адекватности метода.

Ключевые слова: трехфазный годограф, несинусоидальность, нелинейные потребители, искажение формы питающей сети.

Современное приборостроение использует в большинстве устройств технологию импульсных источников питания, что позволяет уменьшить габариты и массу готового изделия, а также упрощает и удешевляет производство. Повсеместное использование устройств с импульсным характером потребления тока влечет за собой искажение формы питающей сети, появление высокочастотных гармоник, увеличение тока в нейтральном проводнике [1]. Это, в свою очередь, влияет на работу практически всего электрооборудования: в генераторах, электродвигателях и трансформаторах увеличиваются потери и нагрев; в конденсаторах увеличивается температурный режим работы, происходит преждевременное старение, увеличение погрешности; в силовых и соединительных кабелях возрастает нагрев, увеличивается вероятность пробоя изоляции.

При исследовании работы трехфазной сети в среде схемотехнического моделирования NI Multisim с различными типами нагрузок, а далее математической обработки результатов в среде графического программирования NI LabVIEW была получена информация о влиянии нагрузки на форму тока сети, в том числе нейтрального провода. Интерпретация

нагрузки генератора в виде годографа трехфазных напряжений и токов позволяет получить наглядное графическое изображение на двухкоординатной плоскости [2]. Для этого мгновенные значения трехфазных напряжений и токов преобразовываются в координаты векторов на комплексной плоскости по формулам:

$$X = \frac{2}{3}(U_A - 0,5U_B - 0,5U_C);$$

$$Y = \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_B - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_C\right).$$

Эксперимент 1.1. Моделирование трехфазной сети с использованием генератора идеального синусоидального напряжения и линейной симметричной нагрузки (рис. 1). Для построения годографа трехфазных напряжений и токов данные из NI Multisim передаются в NI LabVIEW через коннекторы IO1, IO2, IO3. Коннектор IO1 передает мгновенное значение тока в фазе A, IO2 – в фазе B, IO3 – в фазе C, коннектор IO4 передает данные, необходимые для построения графика формы тока в нейтральном проводе.

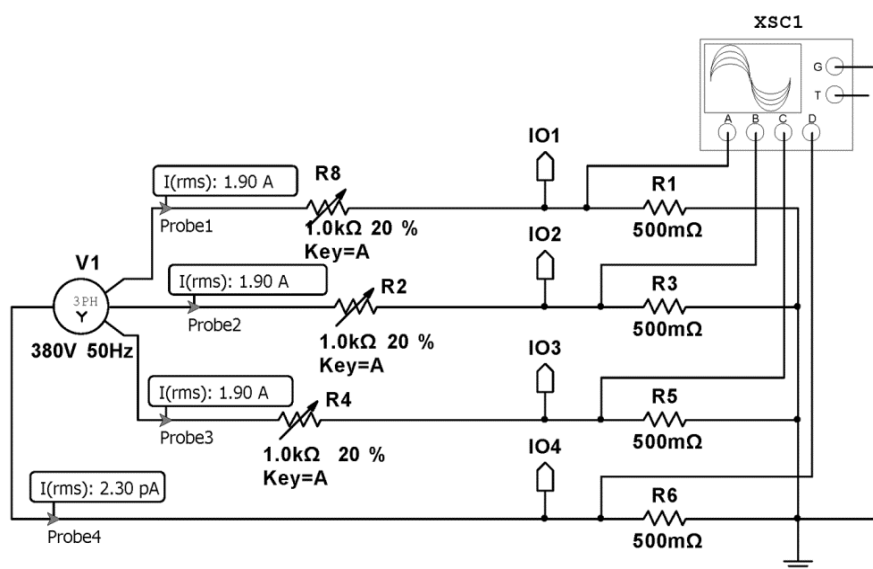


Рис. 1. Схема в NI Multisim для моделирования

Построение трехфазного годографа токов показало, что его форма очень близка к окружности (рис. 2), при этом ток в нейтральном проводе отсутствует.

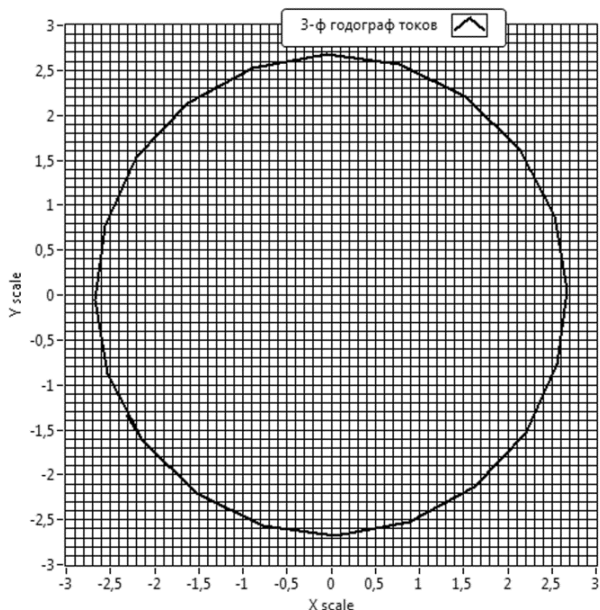


Рис. 2. Форма годографа при симметричной линейной нагрузке

Эксперимент 1.2. Линейная нагрузка увеличивается последовательно в каждой фазе, моделируя увеличение коэффициента несимметрии, форма годографа тока меняет вид на эллипс, расположенный под углами, соответствующими углам сдвига фаз (рис. 3).

Также при увеличении нагрузки в одной из фаз увеличивается ток нулевой последовательности, при этом в нулевом рабочем проводнике протекает ток, практически равный фазному (рис. 4).

Эксперимент 1.3. Нагрузка в каждой фазе последовательно меняется на активно-индуктивную (рис. 5). Величину тока в каждой фазе при этом выравниваем по действующему значению.

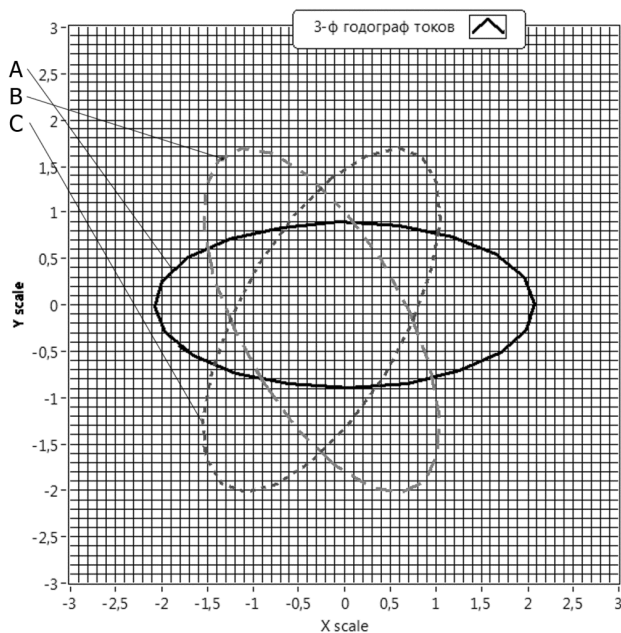


Рис. 3. Изменение годографа трехфазных токов при линейной нагрузке с несимметрией в фазе A (кривая A), в фазе B (кривая B) и фазе C (кривая C)

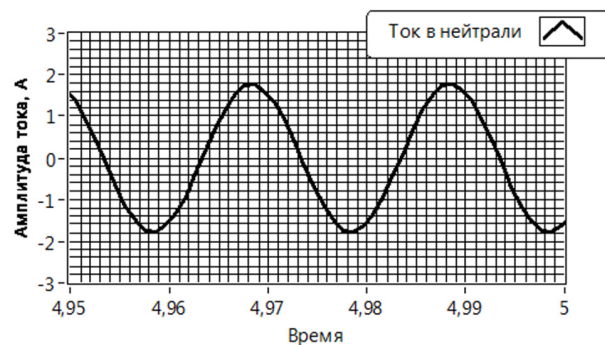


Рис. 4. Форма тока в нейтральном проводнике при несимметричной нагрузке

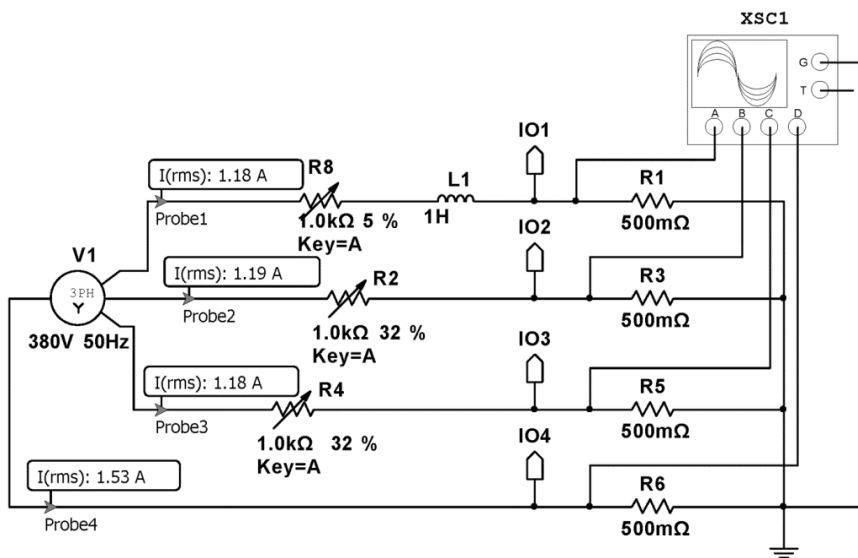


Рис. 5. Схема в NI Multisim с активно-индуктивной нагрузкой в фазе A

При симметричной нагрузке, но с добавлением емкостной составляющей ток в нейтральном проводе сопоставим с фазным. Годограф токов также имеет форму, отличную от окружности (рис. 6).

Эксперимент 1.4. Моделируем схему в NI Multisim (рис. 7), в которой последовательно меняем нагрузку в каждой фазе на нелинейную, имеющую импульсный характер. В роли такой нагрузки выступает однофазный двухполупериодный выпрямитель. Токи во всех фазах выравшиваем по действующему значению.

Поскольку потребитель (в данном случае – двухполупериодный выпрямитель) имеет импульсный характер потребления тока, трехфазный годограф токов рисуется с явно выраженными пиковыми областями, меняющими угол поворота в зависимости от фазы, в которой находится нелинейный потребитель.

Форма тока в нейтральном проводнике несинусоидальная и имеет значение, близкое к фазному (рис. 9).

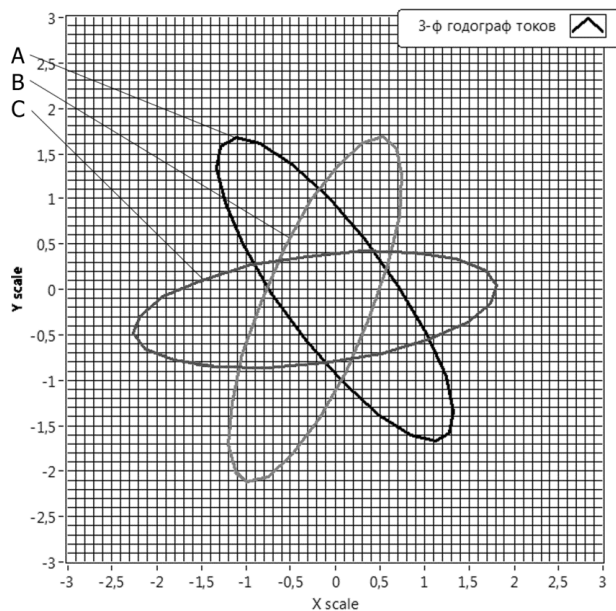


Рис. 6. Трехфазный годограф токов при добавлении емкостной составляющей в фазу A (кривая A), в фазу B (кривая B) и фазу C (кривая C)

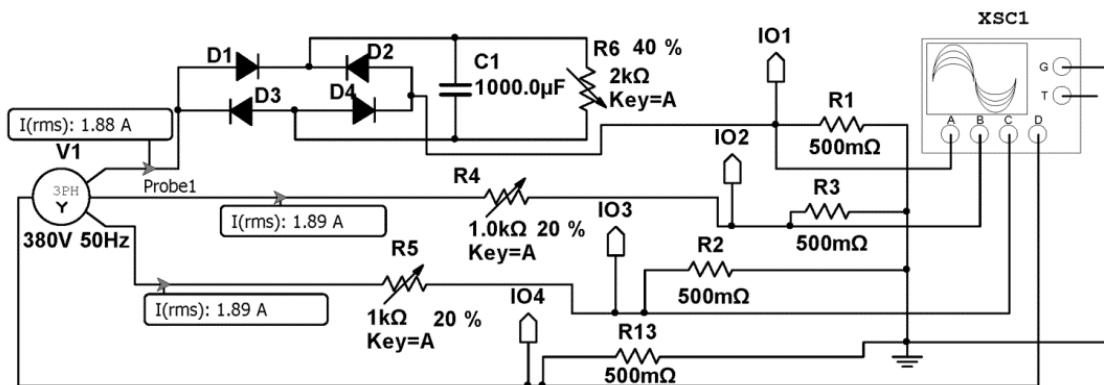


Рис. 7. Схема в NI Multisim с нелинейной нагрузкой в фазе A

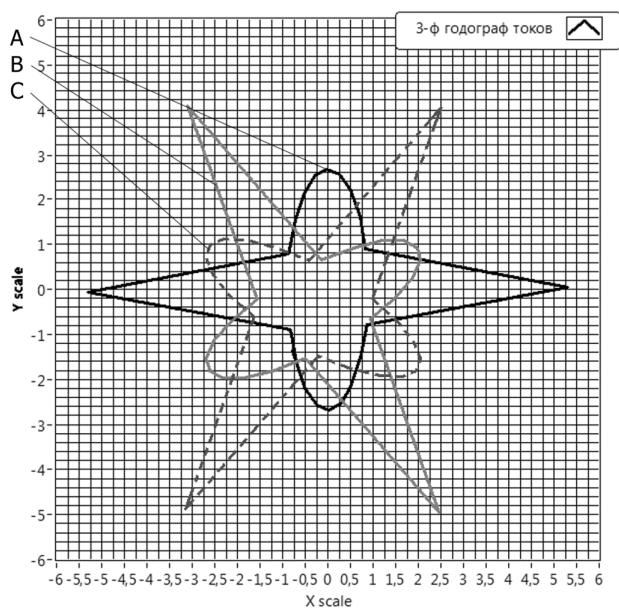


Рис. 8. Трехфазный годограф токов при добавлении импульсной нагрузки в фазу A (кривая A), в фазу B (кривая B) и фазу C (кривая C)

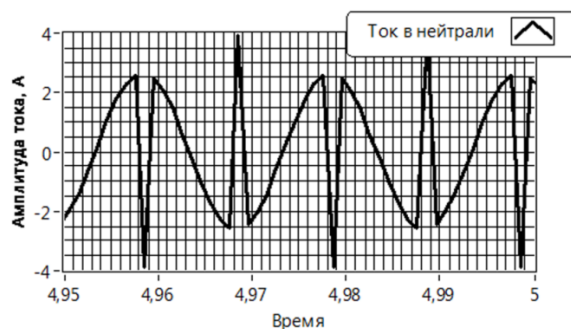


Рис. 9. Форма тока в нейтральном проводнике при импульсной нагрузке в одной из фаз

Эксперимент 1.5. Моделируется сеть, в которой все фазы работают симметрично с потребителями, имеющими смешанный тип нагрузки. В роли нелинейных потребителей выступают двухполупериодные выпрямители с активно-емкостной нагрузкой. Параллельно каждому выпрямителю подключены резистор и катушка индуктивности, имитирующие активно-реактивную нагрузку (рис. 10). Токи всех фаз выравнены по действующему значению.

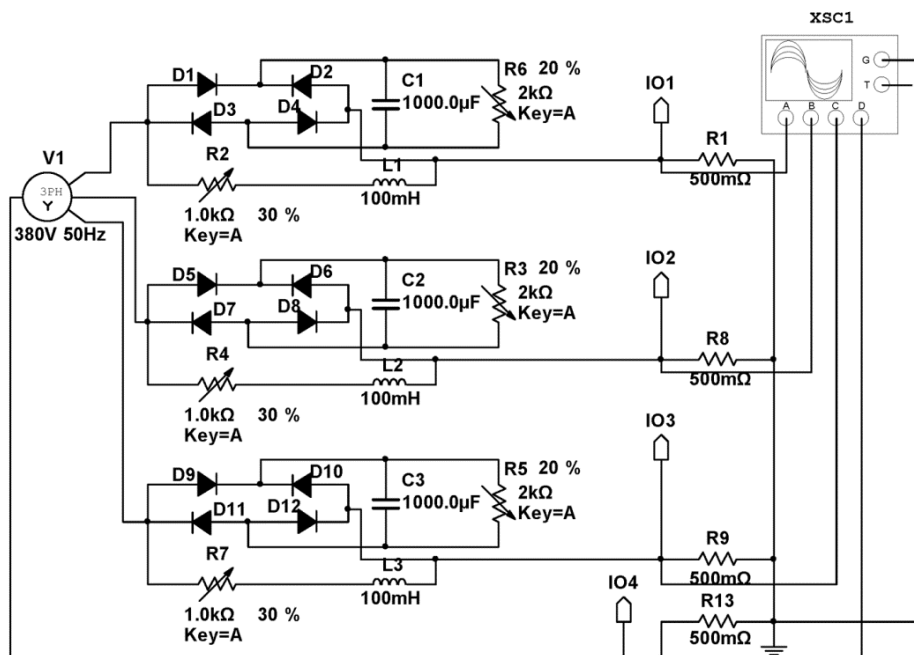


Рис. 10. Схема моделирования сети со смешанной нагрузкой

По фазным токам построен годограф, остроугольная форма которого указывает на явное преобладание нелинейных потребителей (рис. 11).

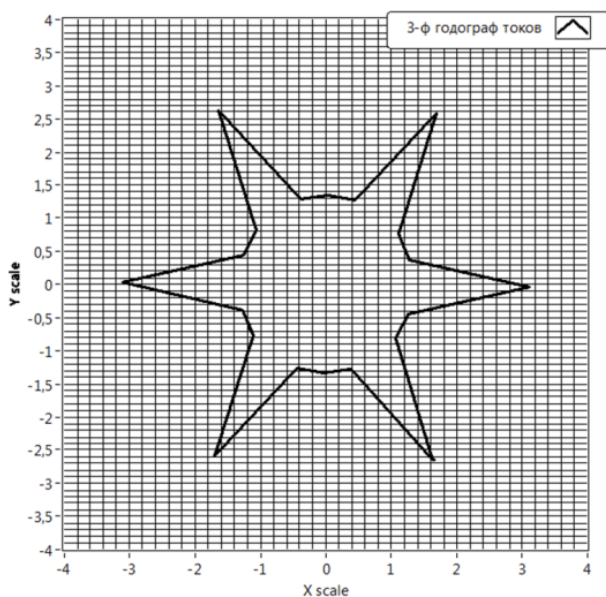


Рис. 11. Трехфазный годограф токов сети с преобладанием нелинейных потребителей

Форма тока в нейтральном проводе также имеет несинусоидальную форму, действующее значение $I_{rms} = 1,3A$ сравнимо со значением тока в фазных проводниках $I_{rms} = 1,5A$, а пиковое значение тока превышает фазное и равно $I_{p-p} = 2,1A$ (рис. 12).

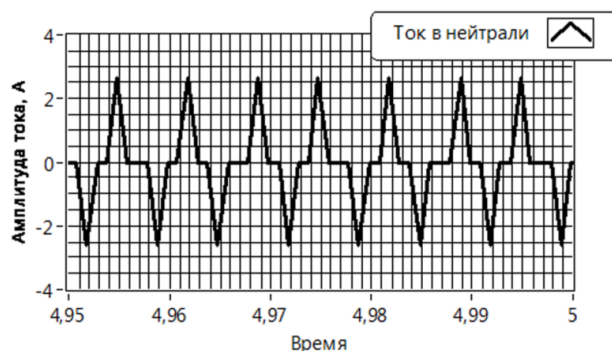


Рис. 12. Форма тока в нейтральном проводнике

Серия экспериментов 1.1–1.5 позволила промоделировать работу трехфазной электрической сети и наглядно просмотреть влияние всех типов потребителей на форму тока сети. В этой модели используется генератор идеального трехфазного напряжения, имеющий бесконечную мощность. В реальной распределенной сети при увеличении доли нелинейных потребителей их суммарная мощность возрастает и оказывает влияние на форму напряжения, которая приходит с подстанции. Таким образом, форма напряжения искажается во всей распределенной сети и потребители изначально получают несинусоидальное напряжение. При моделировании работы трехфазной сети необходимо учитывать несинусоидальное напряжение источника, в этом случае получаемые результаты более достоверны и близки к реальным. Для этого в программе схемотехнического моделирования NI LabVIEW была построена схема замещения генератора – источника несинусоидального напряжения, и подключение элементов производилось уже к этому эквивалентному генератору.

Эксперимент 2.1. Подключение нелинейной нагрузки к эквивалентному генератору несинусоидального напряжения. Схема замещения генератора расположена в левой части рис. 13 и состоит из источника идеального трехфазного синусоидального

напряжения $V1$ и подключенной к нему нелинейной нагрузки, которая позволяет на выходе получить искаженное несинусоидальное трехфазное напряжение. Уровень искажения задается параметрами RC -цепи в нагрузке диодных мостов $D1-D4, D9-D12, D17-D20$.

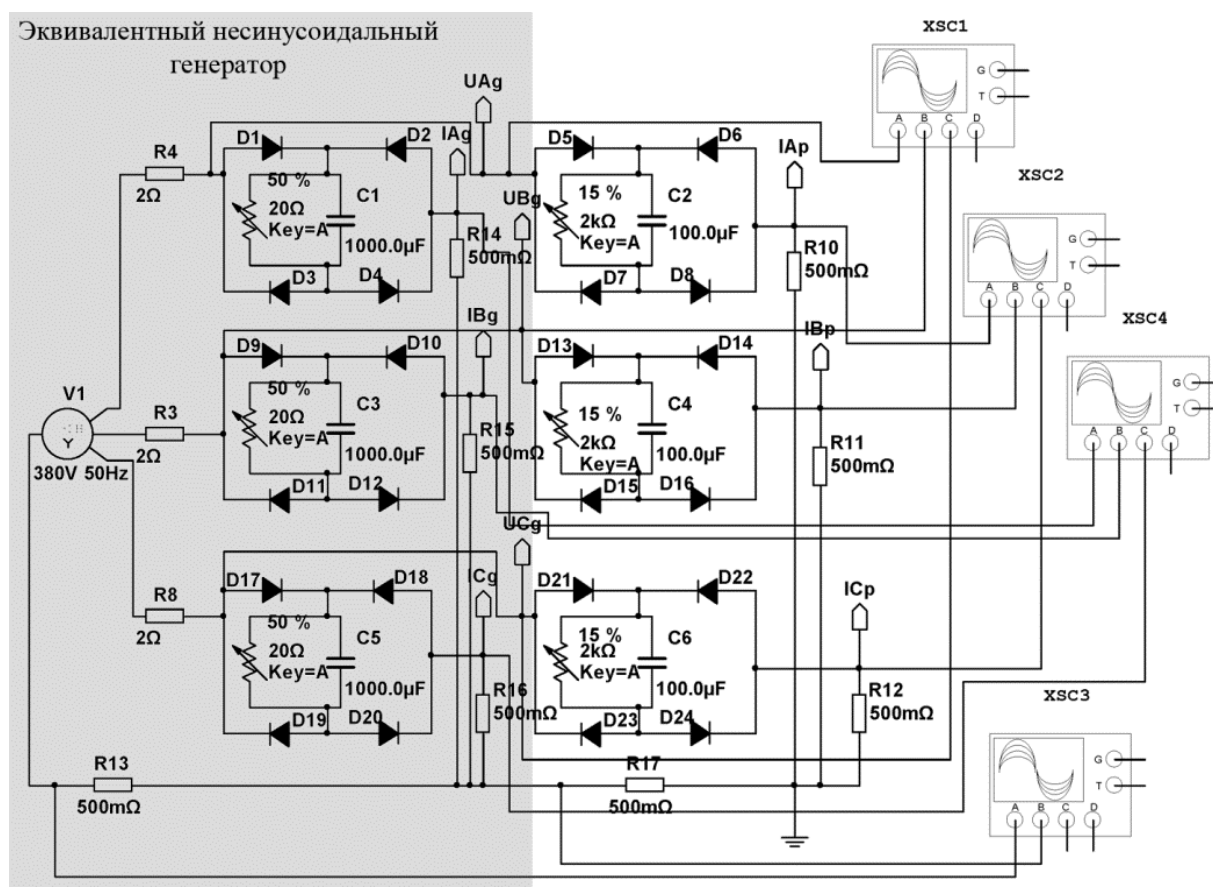


Рис. 13. Схема моделирования работы нелинейной нагрузки с использованием эквивалентного генератора несинусоидального напряжения

Для построения годографа трехфазных напряжений и токов (рис. 14) данные через коннекторы из NI Multisim передаются в NI LabVIEW. Коннекторы IA_g, IB_g, IC_g передают токи эквивалентного генератора фазы A, B и C , соответственно, коннекторы UA_g, UB_g, UC_g – напряжения эквивалентного генератора фазы A, B и C , а коннекторы IA_p, IB_p, IC_p – токи потребителей фазы A, B и C .

По результатам эксперимента видно, что годограф напряжения эквивалентного генератора отличен от окружности вследствие искажений, внесенных работой двухполупериодных выпрямителей, включенных в схему для добавления несинусоидальности. Форма годографа тока конечных потребителей содержит явно выраженные пиковые участки, которые сигнализируют о большой доле нелинейных потребителей в каждой фазе, а дополнительные искажения вносятся за счет несинусоидальности генератора.

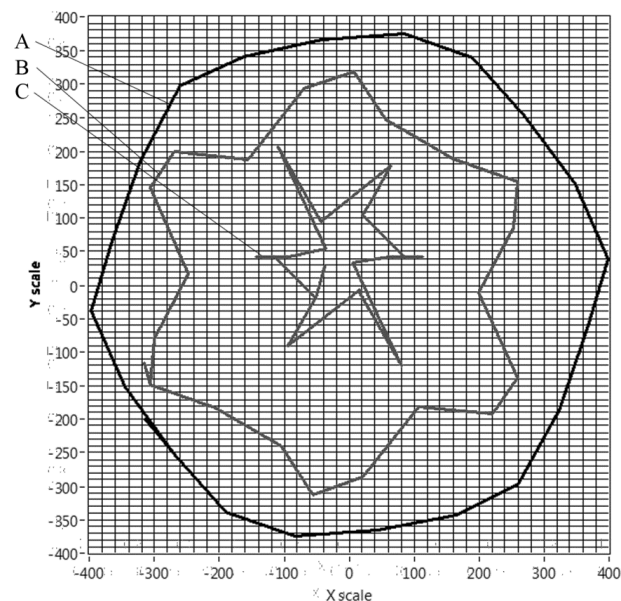


Рис. 14. Трехфазный годограф напряжений (кривая A), токов (кривая B) эквивалентного генератора несинусоидального напряжения и тока нелинейных потребителей (кривая C)

Моделирование в эксперименте 2.1 позволяет получить более адекватные данные в сравнении с экспериментами 1.1–1.5, поскольку конечные потребители получают на входе уже несинусоидальное напряжение, как это происходит в реальных электрических сетях.

Использование математической модели эквивалентного несинусоидального генератора позволяет вносить искажение формы напряжения, но получить форму напряжения, идентичную реальной, очень сложно, из-за этого в конечном результате появляются погрешности. Для уменьшения погрешности в

схеме моделирования возможно использование оператора LabVIEW LVM Voltage, который позволяет подавать на схему заранее записанный сигнал, содержащий реальное трехфазное напряжение. Сигнал записывался в одной из научно-исследовательских лабораторий первого корпуса ИжГТУ.

Эксперимент 3.1. Моделирование работы трехфазной электрической сети с использованием в качестве генератора записанного ранее реального сигнала напряжения и резисторов в качестве активной линейной нагрузки (рис. 15).

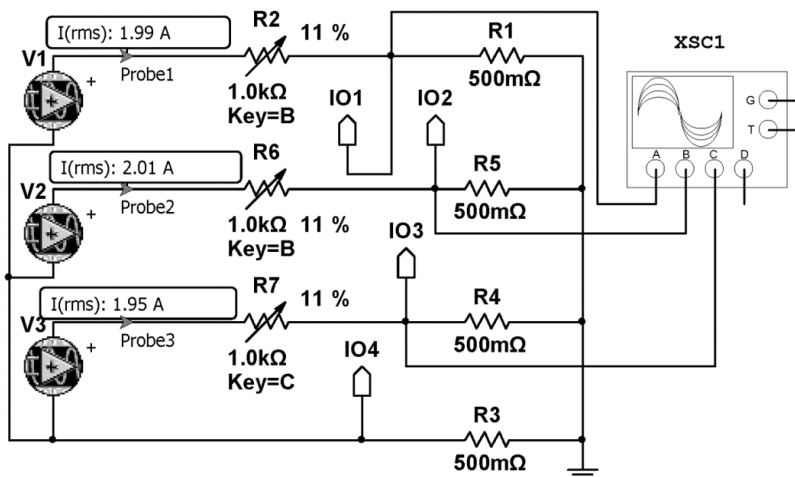


Рис. 15. Схема моделирования работы трехфазной сети с использованием реального сигнала

Для постройки годографа тока выравниваем токи в каждой фазе по действующему значению и передаем данные через коннекторы IO1, IO2, IO3 в программу NI LabVIEW. Поскольку в схеме используется линейная нагрузка, форма годографа тока (рис. 16) будет повторять форму годографа напряжения.

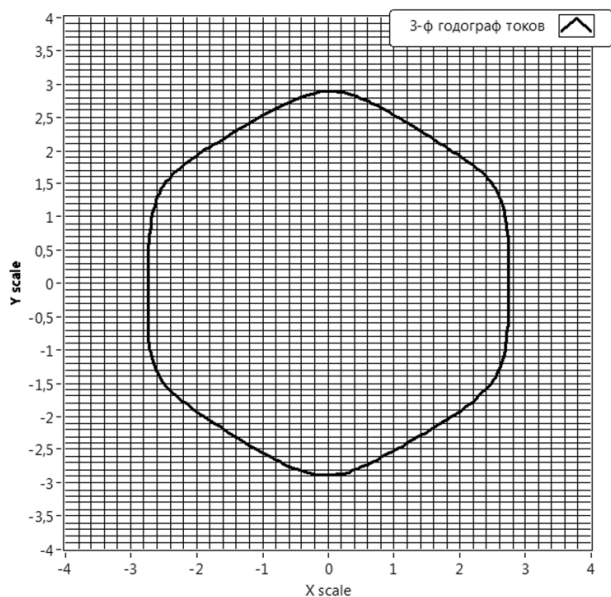


Рис. 16. Трехфазный годограф токов с использованием реального сигнала

Эксперимент 3.2. Моделирование работы сети с использованием в одной из фаз нелинейной нагрузки. Схема моделирования аналогична схеме из эксперимента 1.4, за исключением добавления в качестве генератора напряжения, записанного из реальной сети. Трехфазный годограф токов (рис. 17) похож на годограф в эксперименте 1.4, при этом добавились искажения, связанные с несинусоидальностью генератора.

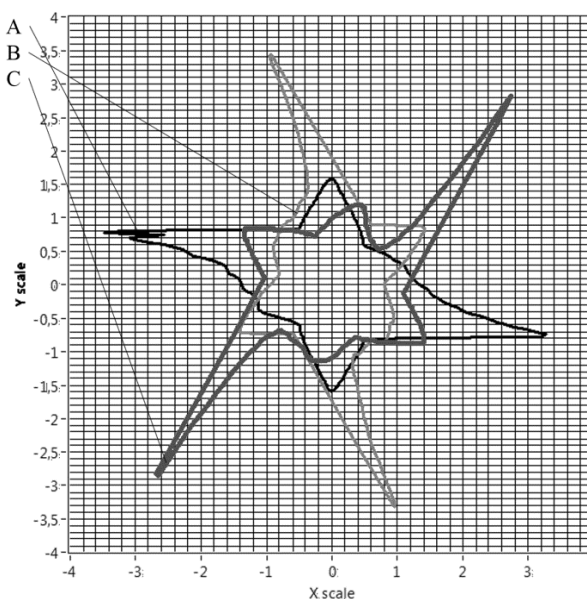


Рис. 17. Трехфазный годограф токов при нелинейной нагрузке в фазе A (кривая A), в фазе B (кривая B) и фазе C (кривая C)

Эксперимент 3.3. Моделирование работы электрической сети со смешанной нагрузкой во всех фазах. Схема выполнялась по аналогии со схемой в эксперименте 1.5, в качестве источника напряжения – записанный сигнал реальной сети. Трехфазный годограф токов (рис. 18) имеет неровную форму с явно выраженными пиками потребления тока и искажениями, внесенными несинусоидальной формой напряжения источника.

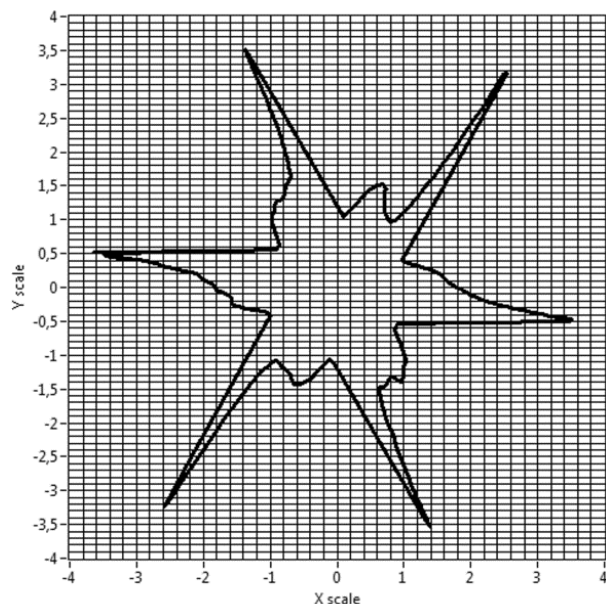


Рис. 18. Трехфазный годограф тока при использовании смешанной нагрузки во всех фазах

Эксперименты 1.1–1.5 показывают влияние различных типов нагрузки на форму тока и напряжения в сети, при этом использование идеального генератора трехфазного синусоидального напряжения позволило исключить искажение питающей сети и по-

строить годограф, форма которого искажена только влиянием потребителей.

В эксперименте 2.1 предпринималась попытка внести искажение в форму напряжения источника, питающего электрическую схему. При этом повышается адекватность полученных результатов, но повторить форму реального напряжения сети очень сложно.

Эксперименты 3.1–3.3 имеют самые близкие к реальности результаты за счет использования в качестве источника питания модуля LabVIEW LVM, который использует параметры напряжения, записанного в реальной электрической сети. Это позволило увидеть реальные искажения, вносимые в трехфазную электрическую сеть нелинейными потребителями.

Все эксперименты проводились в рамках одного пакета программ моделирования и обработки сигналов, при этом использование различных методов дало широкий спектр результатов, проанализировав которые был выбран метод, дающий наиболее близкий к действительности результат. Это позволит в дальнейшем при моделировании электрической сети использовать самый адекватный метод в качестве основного.

Библиографические ссылки

1. Новоселов М. Л., Барсуков В. К. Моделирование работы трехфазной сети с нелинейной нагрузкой // Федоровские чтения – 2014 : материалы XLIV Международной научно-практической конференции (Москва, 12–14 ноября 2014 г.) / под общей ред. Б. И. Кудрина и Ю. В. Матюниной. – М. : Издательство МЭИ, 2014. – 184 с.

2. Новоселов М. Л., Барсуков В. К. Трехфазный годограф в электрических сетях с нелинейными потребителями // Федоровские чтения – 2015 : XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 11–13 ноября 2015 г.) / под общей ред. Б. И. Кудрина, Ю. В. Матюниной. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 308 с.

Novoselov M. L., Post-graduate, Kalashnikov ISTU
Barsukov V. K., PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

Methods for modeling the operation of a three-phase circuit with various types of loads

The paper considers the methods for developing a mathematical model of operation of a three-phase circuit with various types of loads by means of software NI Multisim and NI LabVIEW. The adequacy of the method is analyzed when varying the principle of obtaining the supply voltage in the circuit and plotting the image of the three-phase system of currents and voltages at the complex plane in order to get the hodograph demonstrating the pattern variation and characterizing the generator load.

Keywords: three-phase hodograph, unsinusoidality, non-linear consumers, distortion of the supply net pattern.

Получено: 09.03.16