

УДК 621.311

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ  
РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ MATLAB SIMULINK**

**Сергей Викторович Кириллов<sup>1,2</sup>**

кандидат технических наук, доцент

kirill\_mich@mail.ru

**Борис Сергеевич Мишин<sup>2</sup>**

кандидат технических наук, доцент

boris.sergeewitch@yandex.ru

<sup>1</sup> Проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре ОАО «РЖД»

г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

**Аннотация.** В сетях электроснабжения с нелинейными потребителями возникают искажения синусоидальной функции тока и напряжения, и появляются гармонические составляющие. В статье рассмотрены способы создания несинусоидальных режимов работы системы электроснабжения, соответствующим условиям эксплуатации реальных сетей в среде компьютерного моделирования Matlab Simulink.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, Matlab Simulink, нелинейные потребители, гармонический состав.

С развитием новых технологий в силовой электронике, электротехнике и светотехнике, значительно увеличилось количество электроприёмников с нелинейной вольтамперной характеристикой в электрических сетях. В этой связи, наблюдается рост гармонических составляющих токов и напряжений, и часть электрической энергии передаётся на частоте гармонических составляющих. Между тем, большинство электроприёмников и приборов учёта электрической энергии рассчитаны на работу в сетях, где энергия передаётся на основной частоте (первой гармоники) тока и напряжения. В этой связи, изучение причин возникновения и анализ работы электроприёмников и систем электроснабжения в условиях возникновения и воздействия гармонических составляющих является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Возникновением гармонических составляющих в спектре питающего напряжения обусловлено применением электропотребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой. Показательным примером возникновения значительных искажений напряжения, являются системы электроснабжения электрических железных дорог, где присутствует мощная однофазная нагрузка – электроподвижной состав (ЭПС) и от этой же системы получают питание различные потребители, в т.ч. сельские поселения и предприятия АПК, расположенные вблизи магистралей железных дорог. На рисунке 1 представлена схема электроснабжения электрической железной дороги системы переменного тока 25 кВ, питающей разнородную нагрузку.

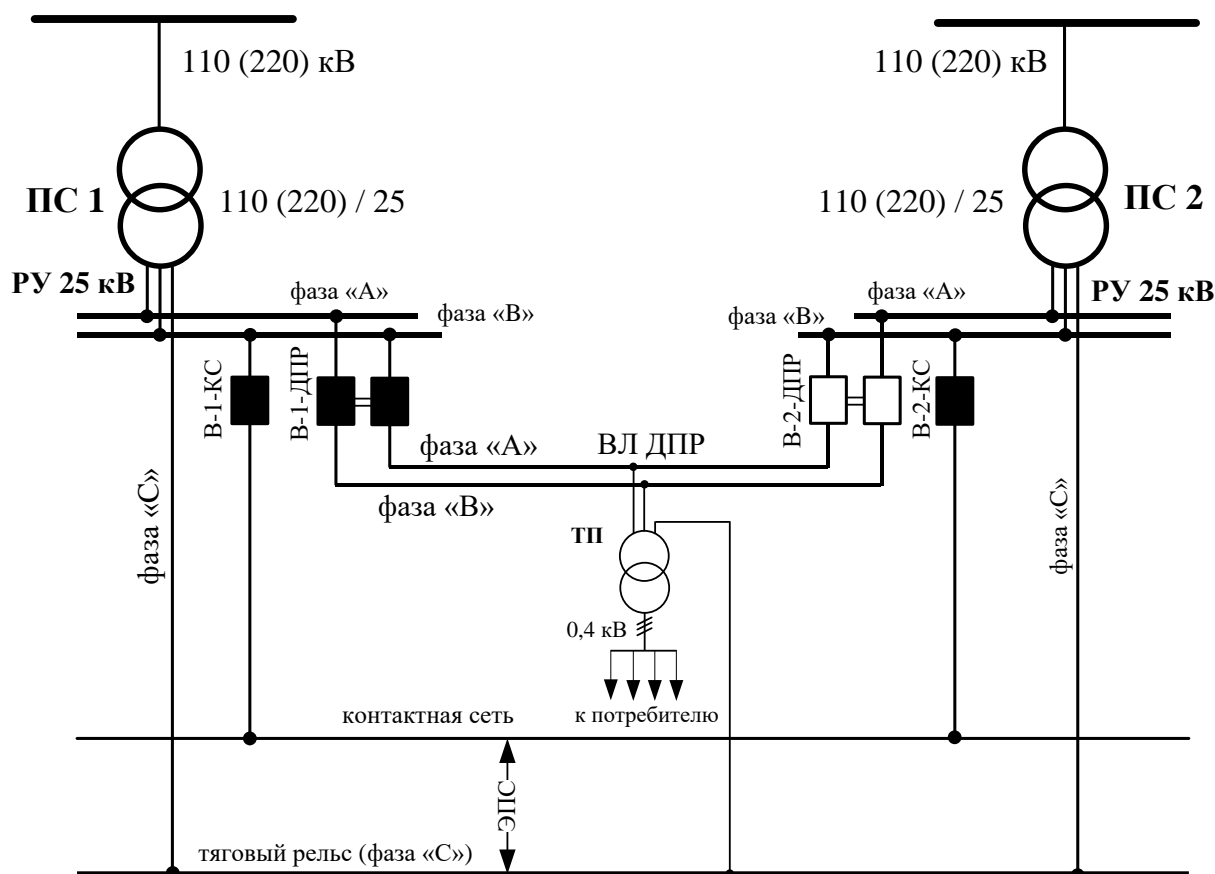


Рисунок 1 – Электрическая схема электроснабжения потребителей от системы электрической железной дороги переменного тока 25 кВ

На данной схеме представлен участок железной дороги, питаемый от двух тяговых подстанций - ПС 1 и ПС 2. Также на схеме имеется контактная сеть с мощными однофазными потребителями – электроподвижным составом, и воздушная линия питания нетяговых потребителей по системе «два дополнительных провода – рельс» (ДПР). От данной линии электропередачи получают питание сельские поселения и предприятия АПК, расположенные вблизи железнодорожных магистралей, на схеме рис. 1 – подстанция ТП 25/0,4 кВ.

На рисунке 2 изображена схема, поясняющая возникновение искажений питающего напряжения в электрических сетях [1].

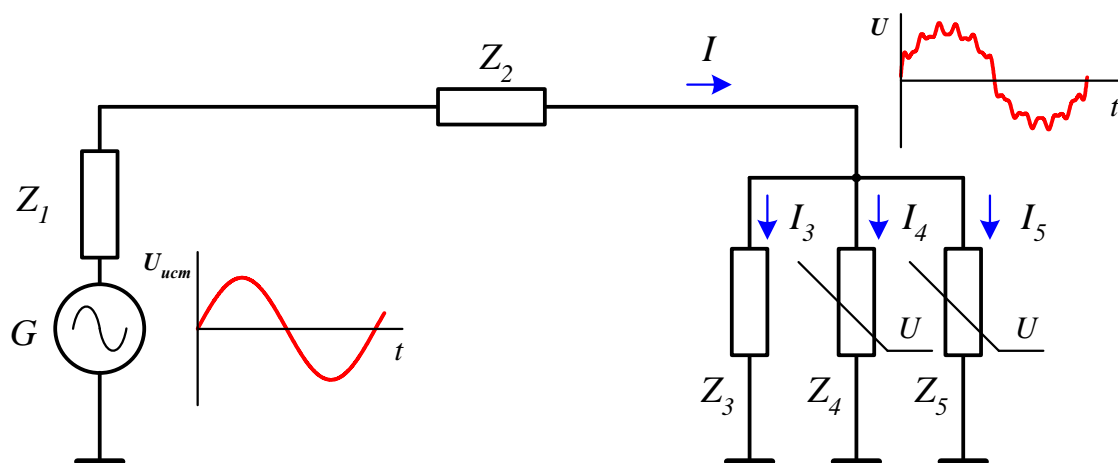


Рисунок 2 - Схема, поясняющая возникновение искажений формы питающего напряжения.

Если предположить, что сопротивление сети относительно зажимов каждого отдельного электропотребителя равно нулю, то искажения синусоидальности напряжения не существовало бы. В реальности сеть для любого электропотребителя представляет собой сопротивление -  $Z_1+Z_2$ . Несинусоидальные токи нелинейных потребителей  $I_4$  и  $I_5$ , протекая по этому сопротивлению, вызывают пропорциональное падение напряжения на нем. В результате на зажимах нелинейных электропотребителей  $Z_4$  и  $Z_5$ , а также на зажимах всех остальных электропотребителей  $Z_3$ , включенных параллельно им, появляются искажения функции напряжения. И соответственно, наибольшие искажения функции напряжения будут в местах подключения одного или нескольких мощных нелинейных электропотребителей при наибольшем сопротивлении источника питания и линий электропередачи. Таким образом, возникает ситуация, когда отдельные нелинейные потребители, потребляя несинусоидальный ток, могут вносить искажения в функцию напряжения, которое используется для питания других электроприемников [1].

В существующих постулатах электротехники, активная мощность электрического ток  $P$  обусловлена только первой (основной) гармоникой тока. Данная мощность идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую и др.). Дополнительно в сетях имеются другие виды мощностей, которые отличаются от активной мощности,

и оказывают свое влияние на работу электрических сетей и электрического оборудования, и приборов [2].

Несинусоидальные периодические ЭДС, токи и напряжения можно разложить в тригонометрический ряд (Эйлера – Фурье) одна из форм записи которого следующая [3]:

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} F_k \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (1)$$

где  $F_0$  – постоянная составляющая;

$k$  – номер гармонической составляющей;

$F_k$  – амплитуда  $k$ -гармоники ряда Фурье;

$\omega$  – угловая частота первой (основной) гармоники;

$\psi_k$  – угол начальной фазы  $k$ -й гармоники.

Были проведены исследования гармонического состава токов и напряжений различных присоединений (фидеров) тяговой подстанции электрической железной дороги системы переменного тока 25 кВ. Более подробно результаты данного исследования изложены в [1, 4-5]. На рисунках 3 – 6 приведены осциллограммы токов и напряжений различных присоединений (фидеров) тяговой подстанции электрической железной дороги системы переменного тока 25 кВ – ввод 25 кВ, фидер контактной сети, фидер системы электроснабжения ДПР, фидер районной нагрузки 0,23 кВ.

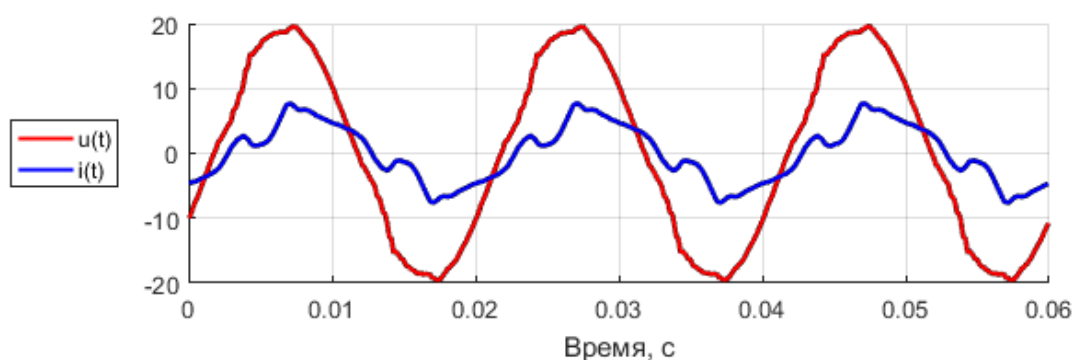


Рисунок 3 – Осциллограммы тока и напряжения на вводе 25 кВ тяговой подстанции

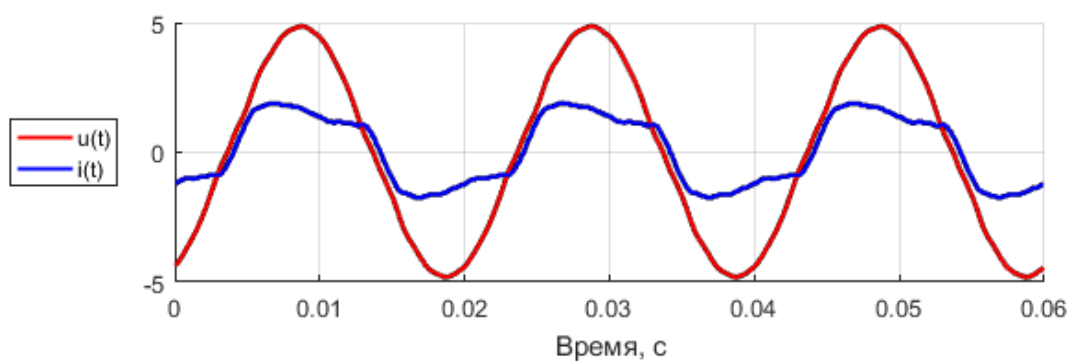


Рисунок 4 – Осциллограммы тока и напряжения фидера контактной сети 25 кВ

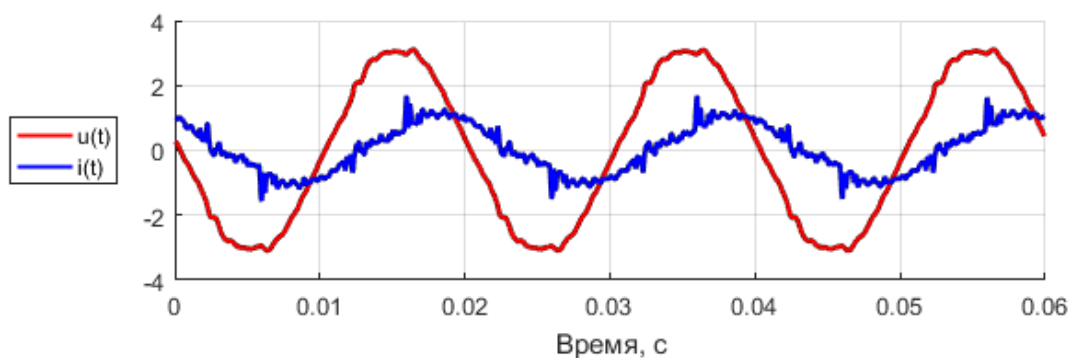


Рисунок 5 – Осциллограммы тока и напряжения фидера ДПР тяговой подстанции.

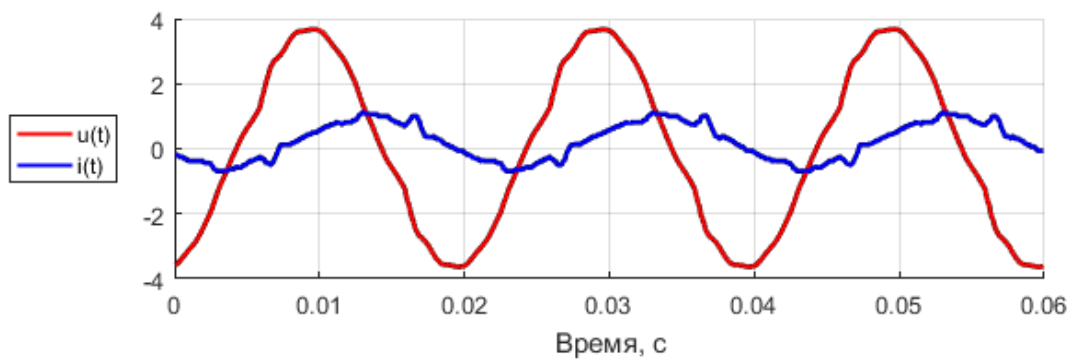


Рисунок 6 – Осциллограммы тока и напряжения фидера районной нагрузки 0,23 кВ тяговой подстанции.

Для дальнейшего изучения процессов, происходящих в системе электроснабжения, с преобладающей нелинейной нагрузкой, и от которой получают питание различные потребители, возникла необходимость создания цифровых математических моделей, с помощью которых можно реализовать различные режимы работы данной системы, соответствующие условиям реальной эксплуатации. Для моделирования была выбрана среда создания

компьютерных моделей - Matlab Simulink. Данная среда прошла апробацию для создания моделей электротехнических устройств и систем электроснабжения, что показано в работах [6-7] и других исследованиях.

**Результаты и обсуждение.** В результате исследования [1] установлено, что мощная нелинейная нагрузка является генератором гармонических составляющих. Получая энергию от источника энергии по каналу первой (основной) гармоники, она частично преобразует её в энергию высших гармоник, которая возвращается обратно в сеть и распределяется между другими потребителями. На основании этого, было предложено, заменить мощную нелинейную нагрузку в системе электроснабжения, эквивалентным источником электрической энергии, с необходимым набором гармоник, которые имеют амплитудные значения и фазовые сдвиги гармоник, согласно выражению (1), Данные значения были получены в результате исследований действующей электроустановки [1, 5].

Реализация эквивалентного источника электрической энергии возможна двумя способами:

1. С использованием функции MATLAB Function, которая формирует выходной сигнал, используя массив данных, содержащий мгновенные значения тока и/или напряжения, полученные в ходе исследования действующей электроустановки.

2. Создание эквивалентного источника электрической энергии, путём соединения источников синусоидального тока или напряжения заданной частоты и заданными амплитудными значениями и фазовыми сдвигами по отношению к основной гармонике.

На рисунке 7. Представлена схема SIMULINK модели создания несинусоидального сигнала с использованием MATLAB Function.

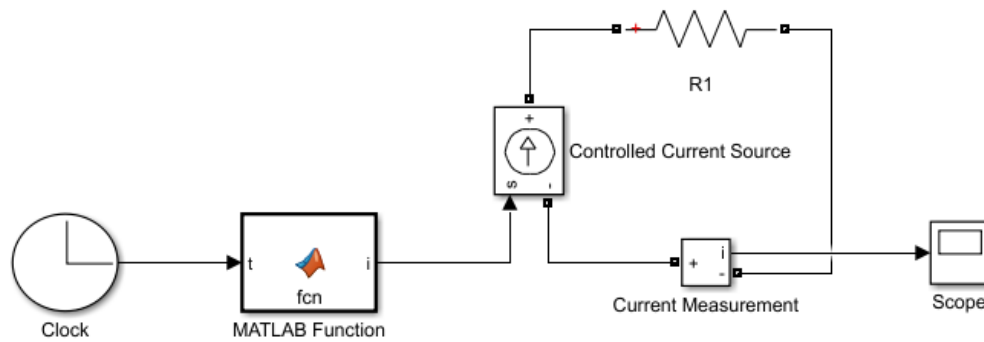


Рисунок 7 – SIMULINK модель создания несинусоидального сигнала с использованием MATLAB Function.

Реализация эквивалентного несинусоидального источника электрической энергии возможна путём параллельного соединения источников синусоидального тока заданной частоты, амплитудными значениями и фазовыми сдвигами по отношению к основной гармонике. На рисунке 8 приведена модель такого несинусоидального источника электрической энергии. Она включает в себя набор параллельно соединённых источников синусоидального тока частотой от 50 до 2500 Гц (50 гармонических составляющих).

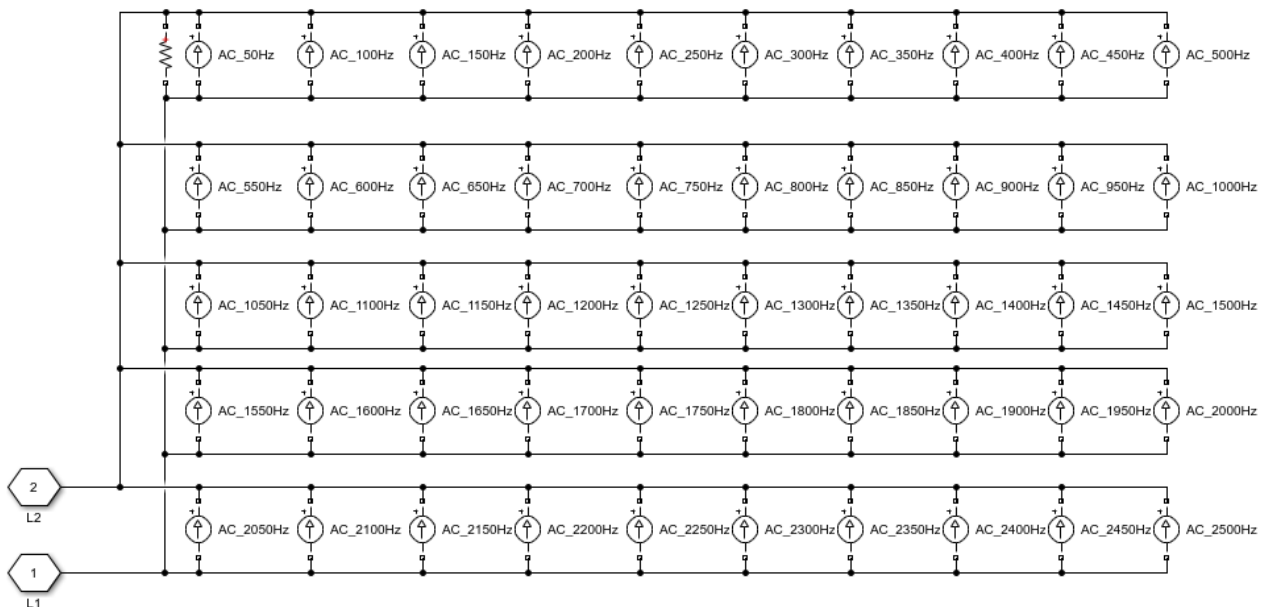


Рисунок 8 – SIMULINK модель источника несинусоидального тока.

На рисунке 9 представлена SIMULINK модель источника несинусоидального тока и нагрузки R1.

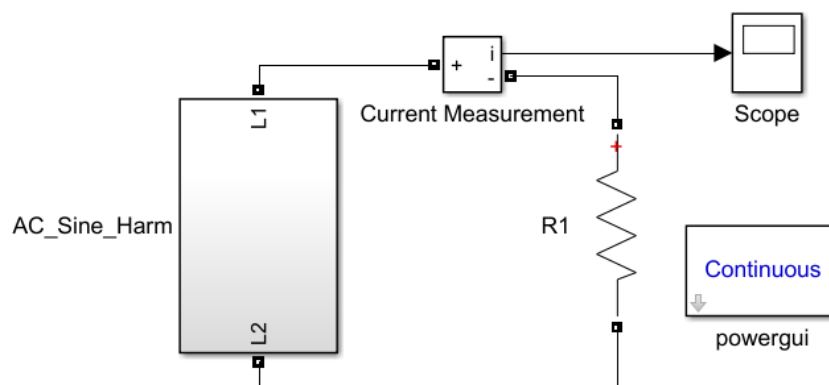


Рисунок 9 – SIMULINK модель создания несинусоидального тока с использованием MATLAB Function.

На рисунке 10 представлена осциллограмма несинусоидального напряжения, полученного с использованием SIMULINK модели на активной нагрузке.

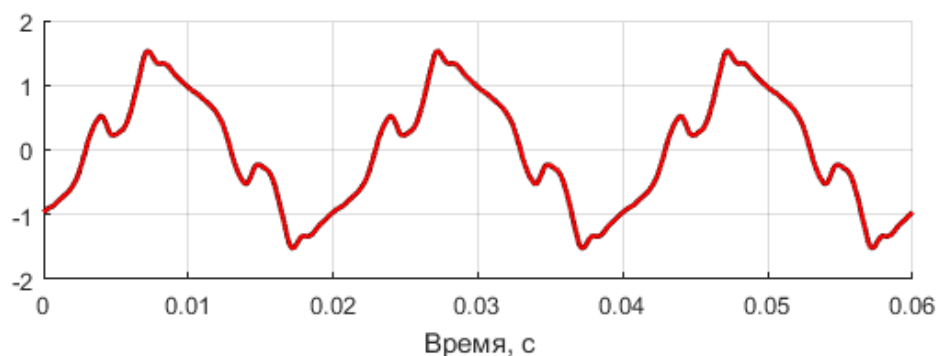


Рисунок 10 – Осциллограмма тока, полученного с помощью модели работы источника несинусоидального тока на активной нагрузке.

Дальнейшим развитием данного исследования стало создание системы электроснабжения сельских потребителей в среде Matlab Simulink с заменой мощной нелинейной нагрузки, которой является электроподвижной состав эквивалентным источником электрической энергии, в результате чего в системе электроснабжении имеются токи и напряжения, соответствующие условиям реальной эксплуатации – рис. 3-б.

На рисунке 11 представлена модель системы электроснабжения, в которой мощная нелинейная нагрузка, оказывающая влияние на токи и напряжения в данной систем, заменена источником энергии.

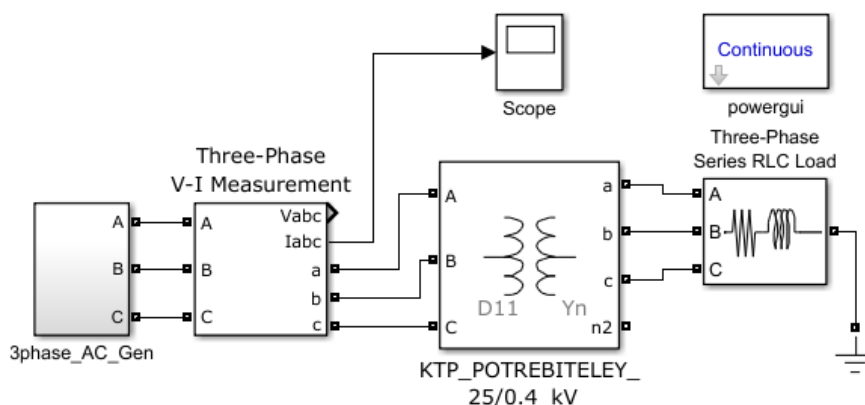
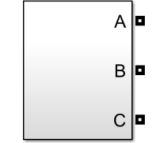
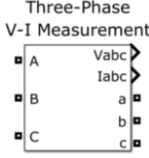
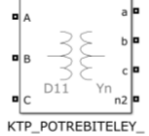
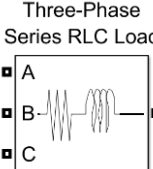
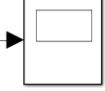


Рисунок 11 – Модель системы электроснабжения с использованием подсистемы создания несинусоидального тока методом суммирования гармонических составляющих

В таблице 1 приведено описание блоков, которые используются в Simulink модели системы электроснабжения рисунка 12.

Таблица 1

Блоки, используемые в Simulink модели системы электроснабжения.

 <p>Зphase_AC_Gen</p>	<p><b>Зphase_AC_Gen</b> – источник электроснабжения, генерирующий несинусоидальные токи и напряжения</p>
 <p>Three-Phase V-I Measurement</p>	<p><b>Three-Phase V-I Measurement</b> - предназначены для измерения мгновенных значений трёхфазных напряжений и токов в электрической цепи. При последовательном подключении к трёхфазным элементам они возвращают: напряжения «фаза–земля» или «фаза–фаза» (пиковые значения), токи в линиях.</p>
 <p>KTP_POTREBITELEY_25/0.4_kV_</p>	<p><b>KTP_POTREBITELEY_25/0.4_kV</b> – КТП сельскохозяйственных потребителей, реализованная с использованием элемента библиотеки SimPowerSystems Three-Phase Transformer (Two Winding) T-1-POTR</p>
 <p>Three-Phase Series RLC Load</p>	<p><b>Three-Phase Series RLC Load</b> - моделирует трёхфазную сбалансированную нагрузку как последовательную комбинацию элементов RLC (резистора, индуктивности и конденсатора). На заданной частоте нагрузка демонстрирует постоянный импеданс. Активные и реактивные мощности, поглощаемые нагрузкой, пропорциональны квадрату приложенного напряжения.</p>
 <p>Scope</p>	<p><b>Scope</b> - блок для визуализации сигналов во время симуляции модели. Отображает входные сигналы относительно времени симуляции.</p>

На рисунке 12 представлены осциллограммы токов, системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей от сетей электрических железных дорог, полученные с помощью Simulink модели, в которой несинусоидальные режимы получены с помощью эквивалентного источника электрической энергии (модель рисунка 9).

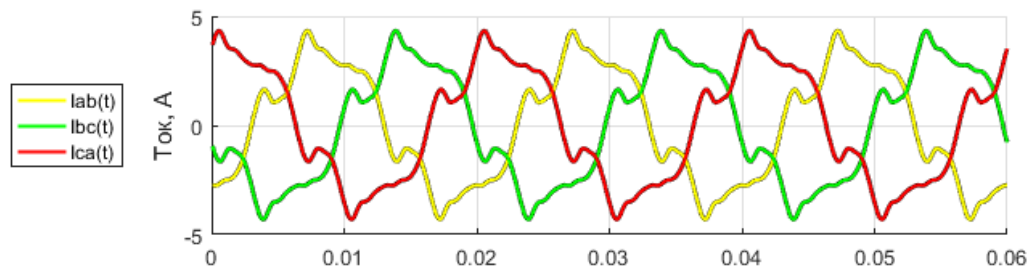


Рисунок 12 – Осциллограмма токов, системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей от сетей электрических железных дорог, полученные с помощью SIMULINK модели создания несинусоидального сигнала методом суммирования гармонических составляющих токов

**Выводы.** В трёхфазной системе электроснабжения, питающей разнородную нагрузку и в которой присутствуют мощные нелинейные потребители, возникают искажения синусоидальности тока и напряжения.

При моделировании несинусоидальных режимов в системе электроснабжения в среде Matlab-Simulink возможна замена нелинейной нагрузки источником несинусоидального напряжения или тока с заданными значениями частот, амплитудами и фазовыми сдвигами, что позволяет получить токи и напряжения с управляемыми значениями амплитуд и фазовых сдвигов отдельных гармонических составляющих.

### Список литературы:

1. Кириллов С.В. Снижение погрешности учета электроэнергии в системах электроснабжения с преобладающей нелинейной нагрузкой: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кириллов Сергей Викторович. Мичуринск, 2006. 154 с. EDN NOCDFH.

2. Кириллов С.В. Причины искажения синусоидальности тока и напряжения в электрических сетях и мощность несинусоидального тока // Наука и Образование. 2025. Т. 8, № 2. EDN HMMMMHQ.

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп.: Учебник для энергетических и электротехнических вузов. М.: Высшая школа, 1973. 752 с.

4. Кириллов С.В., Виноградов А. В. Анализ проблем электроснабжения сельских потребителей, получающих питание от электрических сетей железных дорог // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 3(86). С. 67-77. DOI 10.53914/issn2071-2243\_2025\_3\_67. – EDN VKTPLY.

5. Кириллов С.В., Шемякин В.Н., Шарипов И.К. Гармонический состав тока и напряжения при электроснабжении сельских потребителей от электросетей железных дорог // Сельский механизатор. 2025. № 7. С. 26-29. DOI 10.47336/0131-7393-2025-7-26-27-28-29. EDN OMSDPA

6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Учебное пособие / Москва: ДМК Пресс, 2007. 288 с. ISBN 5-94074-395-1. EDN RAZCGT.

7. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Компьютерное моделирование режимов работы электрической сети 0,4 кВ с устройством сетевого секционирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2025. Т. 25, № 2. С. 5-16. DOI 10.14529/power250201. EDN BQXEFC.

**UDC 621.311**

**MODELING OF NON-SINUSOIDAL  
REGIMES IN POWER SUPPLY SYSTEMS  
USING MATLAB SIMULINK**

**Sergey V. Kirillov<sup>1,2</sup>**

candidate of technical sciences, associate professor

kirill\_mich@mail.ru

**Boris S. Mishin<sup>2</sup>**

candidate of Technical Sciences, associate Professor

<sup>1</sup>Design and Engineering Bureau for Infrastructure of

JSCo «RZD»

Moscow, Russia

<sup>2</sup>Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

**Annotation.** In power supply networks with nonlinear loads, distortions of the sinusoidal function of current and voltage occur, and harmonic components appear. The article examines methods for creating non-sinusoidal operating modes of the power supply system, corresponding to the operating conditions of real networks, within the Matlab Simulink computer modeling environment.

**Key words:** power supply system, Matlab Simulink, nonlinear consumers, harmonic content.

Статья поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 31.03.2026.

The article was submitted 25.02.2026; approved after reviewing 20.03.2026; accepted for publication 31.03.2026.