

УДК 621.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ УЗЛОВ НАГРУЗКИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛЬТАМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

Харлов Николай Николаевич¹,
rcr@tpu.ru

Булыга Леонид Леонидович¹,
rcr@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы заключается в совершенствовании методов моделирования несинусоидальных и несимметричных режимов сложных электрических сетей. Расчет режимов сложных электрических сетей проводится с учетом распределенности параметров линий электропередач, геометрии подвески проводов, нелинейных свойств узловых нагрузок. Это в значительной мере усложняет задачу, но в то же время обеспечивает получение новых, более точных сведений о режимах, в частности определение вклада той или иной нелинейной нагрузки в формирование показателей качества напряжения и добавочных потерь электроэнергии от несинусоидальности токов. Существующее разнообразие методов и подходов к моделированию нагрузок, отраженных в статье, указывает на актуальность данного вопроса и значительный научный интерес к их развитию.

Цель исследования: разработка нового подхода к моделированию нелинейных нагрузок.

Методы исследования. В качестве исходных данных для идентификации промышленного узла нагрузки используются временные диаграммы напряжения и тока, полученные при инструментальном обследовании. Временные диаграммы напряжения и тока шестипульсного преобразователя получены по известным аналитическим соотношениям. При разработке модели и алгоритма идентификации использован известный подход к моделированию нелинейных систем. Данные измерений нагрузки получены Региональным центром ресурсосбережения ТПУ при проведении инструментального обследования.

Результаты. Предложена функциональная модель нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками и необходимые расчетные соотношения, обеспечивающие математическое моделирование в установившихся режимах. Предложен алгоритм идентификации нелинейных нагрузок. В качестве примера приводятся результаты идентификации нагрузки в виде шести-пульсного вентильного преобразователя и нагрузки общепромышленного узла сети 110 кВ.

Ключевые слова:

Временная диаграмма напряжения, временная диаграмма тока, математическая модель, нелинейная нагрузка, идентификация, высшие гармонические составляющие тока и напряжения, нелинейная вольтамперная характеристика, функциональная модель.

Введение

При решении различных инженерных задач, таких как расчеты и оценивание установившихся режимов, потерь электрической энергии и мощности при ее транспорте, показателей качества напряжения, возникает проблема моделирования узловых нагрузок электрической сети. Наиболее остро эта проблема имеет место при нелинейных и несимметричных нагрузках, спектры токов которых в значительной степени определяются спектрами напряжения на их зажимах, заранее, как правило, неизвестных и подлежащих определению. В ряде случаев возникает проблема оценивания вклада той или иной нагрузки в искажение и несимметрию напряжения в узлах сети, вызванные нелинейностями нагрузок. Задача в значительной степени усложняется при расчетах режимов сложных электрических сетей, где для получения адекватных результатов необходимо учитывать распределенность и несимметрию параметров линий [1]. Как показано в [2, 3], наличие в составе нагрузки емкостных элементов, а также емкостных проводимостей линий часто приводит к возникновению резонансных явлений со значительным искажением узловых напряжений и токов сети. Значительную роль в данном случае

играют нелинейные свойства узловых нагрузок. Основы концепции системного моделирования несинусоидальных и несимметричных режимов сложных электрических систем и сетей рассмотрены в [4–9]. В рамках данной концепции предполагается наличие моделей нелинейных узловых нагрузок. В опубликованных работах по вопросам моделирования нагрузок рассматриваются различные подходы, основанные на раскрытии внутренних взаимосвязей элементов, входящих в нагрузку [10–13], эквивалентировании отдельных нагрузок [14, 15] и основанные на использовании так называемого «метода черного ящика» [16–19]. Существуют способы идентификации нагрузок, основанные на данных, полученных в ходе измерений параметров режимов [20, 21]. С учетом изложенного, получение сведений о нелинейных свойствах нагрузок, которые могли бы использоваться при моделировании режимов электрических систем и сетей, представляется актуальной проблемой.

В настоящей статье предлагается решение данного вопроса путем пофазного моделирования вольтамперных характеристик нагрузок, получаемых на основе осциллографирования фазных напряжений и фазных токов на их зажимах.

Модель нагрузки

Напряжение и ток питающей сети в общем случае принимаются несинусоидальными и для фазы i записывается в форме ряда Фурье (1), (2):

$$u_i(t) = \sum_{n=1}^N U'_{i,n} \cos(n\omega t) + U''_{i,n} \sin(n\omega t), \quad (1)$$

$$i_i(t) = \sum_{n=1}^N I'_{i,n} \cos(n\omega t) + I''_{i,n} \sin(n\omega t), \quad (2)$$

где $U'_{i,n}$, $U''_{i,n}$, $I'_{i,n}$, $I''_{i,n}$ – косинусные и синусные составляющие разложения соответствующих кривых фазных напряжения и тока; N – число гармонических составляющих, учитываемых в расчете.

В комплексной форме гармонические составляющие напряжения и тока имеют вид:

$$u_i(t) = \sum_{n=-N}^N \dot{U}_{i,n} e^{jn\omega t},$$

$$i_i(t) = \sum_{n=-N}^N \dot{I}_{i,n} e^{jn\omega t},$$

где $\dot{U}_{i,n}$ – комплексные амплитуды:

$$\dot{U}_{i,n} = (U'_{i,n} - jU''_{i,n}) / 2; \quad \dot{U}_{i,k,-n} = (U'_{i,-n} + jU''_{i,-n}) / 2;$$

$$U'_{i,n} = U'_{i,-n}; \quad U''_{i,n} = -U''_{i,-n}; \quad \dot{I}_{i,n} = (I'_{i,n} - jI''_{i,n}) / 2;$$

$$\dot{I}_{i,k,-n} = (I'_{i,-n} + jI''_{i,-n}) / 2; \quad I'_{i,n} = I'_{i,-n}; \quad I''_{i,n} = -I''_{i,-n}.$$

В действующих электроустановках информация о схемах и режимах электроприемников, как правило, является недостаточно полной или, вообще, отсутствует. Нагрузка в этом случае представляется в виде параллельных активного и реактивного элементов, проводимости которых в установленном режиме изменяются периодически с периодом основной частоты. Типовая структурная схема узла нелинейной нагрузки общего вида, включающей большое количество электроприемников, представлена (в расчете на одну фазу с номером i) на рис. 1.

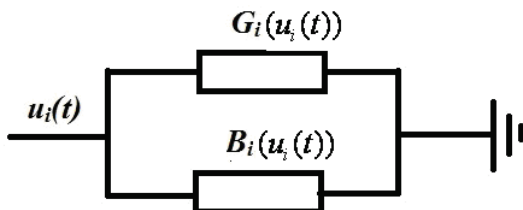


Рис. 1. Типовая структура узла нагрузки общего вида (в расчете на одну фазу)

Fig. 1. Typical structure of the load node of general form (per one phase)

Узел нагрузки фазы i с нелинейной вольтамперной характеристикой представляется нелинейной активной и реактивной проводимостями $G_i(t)$, $B_i(t)$, которые в установленном периодическом режиме также изменяются периодически в соответствии со своими нелинейными свойствами и частотой напряжения питающей сети.

Для получения функциональной и математической моделей нелинейной нагрузки воспользуемся подходом, изложенным в [22], для чего аппроксимируем зависимости проводимостей нагрузки от напряжения полиномами n -й степени (3), (4):

$$G_i(u_i(t)) = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} u_i(t)^k; \quad (3)$$

$$B_i(u_i(t)) = j \sum_{k=0}^{\infty} b_{i,k} u_i(t)^k, \quad (4)$$

где $g_{i,k}$, $b_{i,k}$ – коэффициенты с размерностью A/A^{k+1} , подлежащие определению.

В установившемся режиме степень напряжения $u_i(t)^k$ раскладывается в ряд Фурье (5):

$$u_i(t)^k = U_{i,k,0} / 2 + \sum_{n=1}^{N_k} U'_{i,k,n} \cos(n\omega t) + U''_{i,k,n} \sin(n\omega t). \quad (5)$$

Здесь при нечетных значениях степени k постоянная составляющая $U_{i,k,0} = 0$; N_k – максимальное число гармонических составляющих, учитываемых в расчете при разложении в ряд Фурье напряжения $u_i(t)^k$; $U'_{i,k,n}$, $U''_{i,k,n}$ – амплитуды n -х косинусных и синусных гармонических составляющих напряжения степени $u_i(t)^k$ с размерностью B^k .

В комплексной форме выражение (5) имеет вид (6):

$$u_i(t)^k = \sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k,n} e^{jn\omega t}, \quad (6)$$

где

$$\dot{U}_{i,k,0} = U_{i,k,0} / 2; \quad \dot{U}_{i,k,n} = (U'_{i,k,n} - jU''_{i,k,n}) / 2;$$

$$\dot{U}_{i,k,-n} = (U'_{i,k,-n} + jU''_{i,k,-n}) / 2.$$

Проводимости нагрузки фазы i в соответствии с (1), (2) определяются по формулам (7), (8)

$$G_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k,n} e^{jn\omega t} \right); \quad (7)$$

$$B_i(t) = j \sum_{k=0}^{\infty} b_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k,n} e^{jn\omega t} \right). \quad (8)$$

Активная и реактивная составляющие тока нагрузки определяются по формулам:

$$i_{i,a}(t) = u_i(t) G_i(t) = u_i(t) \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} u_i(t)^k = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} u_i(t)^{k+1};$$

$$i_{i,\theta}(t) = u_i(t) B_i(t) = u_i(t) j \sum_{k=0}^{\infty} b_{i,k} u_i(t)^k = \sum_{k=0}^{\infty} j b_{i,k} u_i(t)^{k+1}.$$

После разложения периодических зависимостей $i_{i,a}(t)$, $i_{i,\theta}(t)$, $u_i(t)^{k+1}$ в ряд Фурье полученные выражения в комплексной форме приобретают вид:

$$\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{I}_{i,a,n} e^{jn\omega t} = \sum_{k=0}^{\infty} g_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t} \right);$$

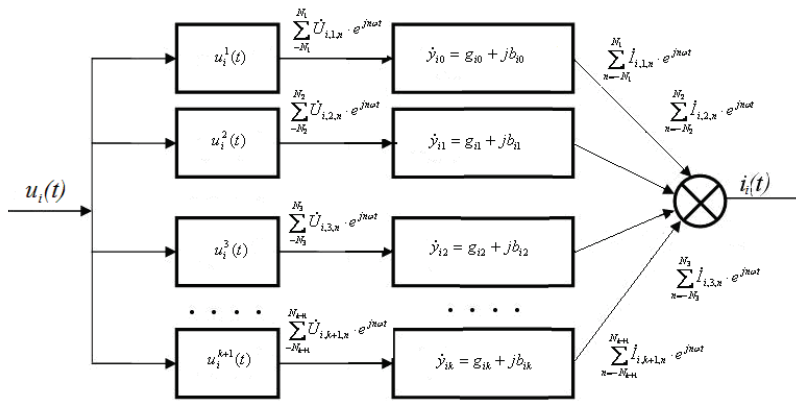


Рис. 2. Функциональная модель узла нагрузки в расчете на одну фазу

Fig. 2. Functional model of load node per one phase

$$\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{I}_{i,\delta,n} e^{jn\omega t} = \sum_{k=0}^{\infty} j b_{i,k} \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t} \right).$$

Данные выражения соответствуют функциональной модели нагрузки (рис. 2), на входе которой действует сигнал $u_i(t)$.

Функциональная модель состоит из бесконечного количества параллельных каналов с номерами k .

В пределах каждого k -го канала имеется степенной блок с характеристикой $u_i(t)^{k+1}$. На выходе каждого k -го степенного блока действует сигнал:

$$u_i(t)^{k+1} = \sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t}.$$

Последовательно со степенным блоком k -го канала включен блок с линейными проводимостями $\dot{y}_{i,k} = g_{i,k} + j b_{i,k}$. На входе линейного блока k -го канала действует сигнал

$$u_i(t)^{k+1} = \sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t}.$$

На выходе n -го линейного блока k -го канала действует сигнал

$$\dot{i}(t)_{i,k} = \left(\sum_{n=-N_k}^{N_k} \dot{U}_{i,k+1,n} e^{jn\omega t} \right) (g_{i,k} + j b_{i,k}),$$

представляющий собой сумму элементарного активного и реактивного токов, комплексные составляющие которых определяются как

$$\begin{aligned} \dot{I}_{i,a,k,n} &= (U'_{i,k+1,n} - j U''_{i,k+1,n}) g_{i,k}, \\ \dot{I}_{i,p,k,n} &= (U'_{i,k+1,n} - j U''_{i,k+1,n}) j b_{i,k}. \end{aligned}$$

В соответствии с данной функциональной моделью, на выходе модели фазы i действует сигнал, равный сумме элементарных токов:

$$\dot{I}_i = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=-N_k}^{N_k} (\dot{I}_{i,a,k,n} + \dot{I}_{i,p,k,n}) e^{jn\omega t},$$

или, переходя к временной форме ряда Фурье, получаем:

$$\dot{I}_{i,a}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{N_k} (\dot{I}'_{i,a,k,n} \cos(n\omega t) + \dot{I}''_{i,a,k,n} \sin(n\omega t));$$

$$\dot{I}_{i,p}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{N_k} (\dot{I}'_{i,p,k,n} \cos(n\omega t) + \dot{I}''_{i,p,k,n} \sin(n\omega t)).$$

Идентификация (определение параметров) нагрузки

Идентификация (определение параметров) узлов нагрузки сводится к определению значений $\dot{y}_{i,k} = g_{i,k} + j b_{i,k}$ и выполняется в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Задается максимальное количество каналов $K_{\max}$ и максимальное количество гармонических составляющих, учитываемых в канале $K_{\max}$, равным $N_{K_{\max}}$. Выбор количества каналов $K_{\max}$ производится в следующем порядке: при синусоидальном питающем напряжении, поскольку степень k гармонической функции содержит высшие гармоники с максимальным номером также k , $K_{\max}$ принимается равным $N_{K_{\max}}$, где $N_{K_{\max}}$ равно максимальному числу известных гармонических составляющих переменного тока нелинейной нагрузки. При искаженном питающем напряжении $K_{\max}$ принимается наибольшим из $N_{\max u}$ и $N_{\max i}$. Выполненное исследование показывает, что влияние высших гармонических составляющих в спектре исходной функции $u_i(t)$ на спектр степенной функции $u_i(t)^k$ и, соответственно, их влияние на режим нелинейной нагрузки с увеличением k быстро снижается.

В качестве примера на рис. 3. приведены осциллограммы фазных напряжений и токов и значения модулей гармонических составляющих напряжения и тока промышленного узла нагрузки. На рис. 4 приведены модули гармонических составляющих напряжения $u_i(t)^k$ для различных k . Поскольку с ростом номера гармонических составляющих функции $u_i(t)^k$ их значения достаточно быстро убывают для всех k , то значение k может быть ограничено (как правило, также $N_{\max i}$).

2. Определение $\dot{y}_{i,k} = g_{i,k} + j b_{i,k}$ начинается с $\dot{y}_{i,N_{\max}} = g_{i,N_{\max}} + j b_{i,N_{\max}}$. Для этого для $k=N_{\max}$ выбирается комплексное значение гармоники тока нагрузки $\dot{I}_{i,N_{\max}} = \dot{I}'_{i,N_{\max}} + j \dot{I}''_{i,N_{\max}}$ и комплексное значение гармоники напряжения k -го канала $U_{i,N_{\max}+N_{\max}} = U'_{i,N_{\max}+N_{\max}} + j U''_{i,N_{\max}+N_{\max}}$. Значение $\dot{I}_{i,N_{\max}}$ будет элементарным током канала $N_{\max}$ с номером гармонической составляющей $N_{\max}$, т. е. принимается $\dot{I}_{i,N_{\max}+N_{\max}} = \dot{I}_{i,N_{\max}}$. Значение проводимости канала $N_{\max} - \dot{y}_{i,N_{\max}} = g_{i,N_{\max}} + j b_{i,N_{\max}}$ определится по формуле:

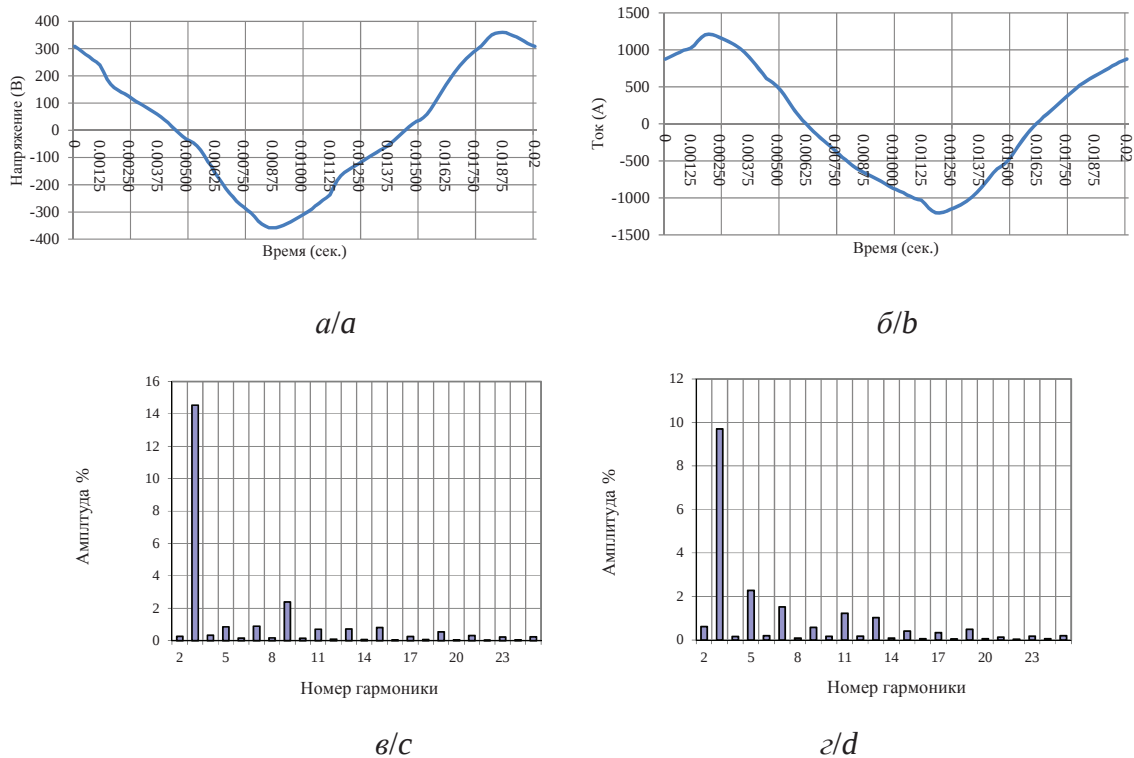


Рис. 3. Фазные напряжение (а) и ток (б) на шинах 0,4 кВ промышленного узла нагрузки; спектры фазных напряжения (в) и тока (г)

Fig. 3. Phase voltages (a) and current (b) on 0,4 kV buses of the industrial load node; spectra of phase voltages (c) and current (d)



Рис. 4. Спектры степенной функции $u_i(t)^k$ для различных значений k

Fig. 4. Spectra of the power function $u_i(t)^k$ for various values of k

$$\dot{y}_{i,N_{\max}} = \dot{I}_{i,N_{\max}} / \dot{U}_{i,N_{\max},N_{\max}}.$$

Остальные гармонические составляющие канала $N_{\max}$ определяются по формуле:

$$\dot{I}_{i,N_{\max},n} = \dot{U}_{i,N_{\max},n} y_{i,N_{\max}}, \quad n < N_{\max}.$$

- После вычисления гармонических составляющих элементарных токов канала $N_{\max}$, определяется остаточный ток нагрузки, как $i_{i_{\text{ост}}}(t) = i_i(t) - i_{i,N_{\max}}(t)$ и его гармонические составляющие. Количество гармонических составляющих в остаточном токе будет $N_{\max(N_{\max}-1)} = N_{\max} - 1$.

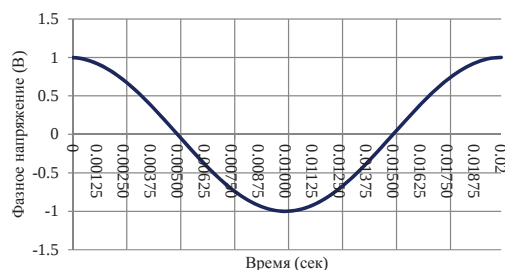
- Выполняется переход к каналу $k = N_{\max} - 1$ и пп. 2, 3 повторяются с той лишь разницей, что вместо $i_i(t)$ принимается $i_{i_{\text{ост}}}(t)$.

Данный процесс продолжается, пока k не будет равно 0.

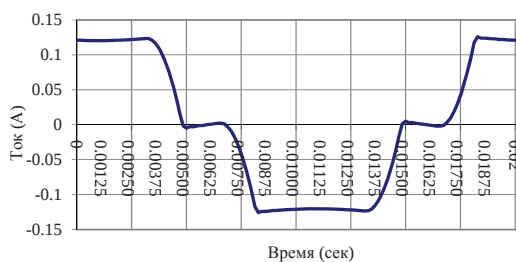
Ниже в качестве примера рассматривается моделирование и определение параметров нагрузки, представляющей собой шестипульсный мостовой выпрямитель, получающий питание от источника с симметричным синусоидальным напряжением единичной амплитуды и работающий с углом управления $\alpha = 0^\circ$, углом коммутации $\gamma = 30^\circ$, которым соответствуют $U_d = 1,543$, $I_d = 0,116$. Расчет осциллограмм переменного напряжения и тока, а также гармонический состав переменного тока в процентах от основной гармоники выполнен в соответствии с [23]. Соответствующие графики, полученные восстановлением по рядам Фурье, приведены на рис. 5, 6.

На рис. 7, 8 приведены проводимости активного и реактивного элементов, их токи и соответствующие мощности, а на рис. 9. – их вольтамперные характеристики.

Вольтамперная характеристика активного элемента схемы замещения преобразователя нелинейная и симметричная по отношению к положительной и отрицательной полуwave питающего напряжения и проходит через начало координат. Вольтамперная характеристика реактивного элемента по отношению к положительной и отрица-



a/a



б/б

Рис. 5. Фазное напряжение (а) и фазный ток (б) на зажимах преобразователя

Fig. 5. Phase voltage (a) and phase current (b) at converter terminals

тельной полуволне питающего напряжения также симметрична, но имеет петлеобразный вид.

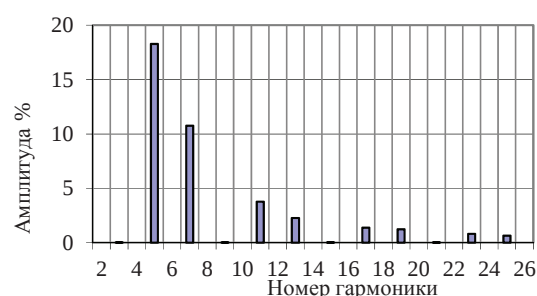
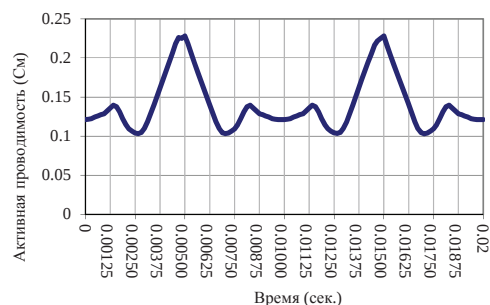


Рис. 6. Гармонический состав переменного тока преобразователя

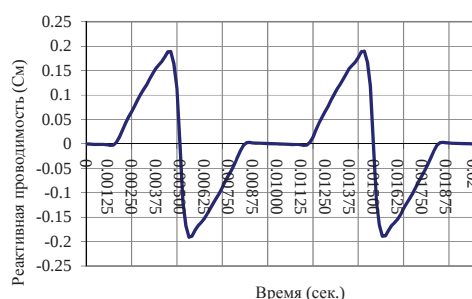
Fig. 6. Harmonic composition of alternating current converter

На рис. 10 приведены результаты определения параметров режима для одной из фаз промышленного узла нагрузки, осциллограммы фазного напряжения и фазного тока которой приведены на рис. 3, а, а на рис. 11 – вольтамперные характеристики активного и реактивного элементов.

Обращает на себя внимание петлеобразный характер вольтамперной характеристики активного элемента и несовпадение моментов перехода через ноль фазного напряжения на его зажимах и фазного тока. Такой вид вольтамперной характеристики активного элемента характерен для узлов нагрузки промышленных электрических сетей и свидетельствует о сдвиге активного тока относительно приложенного напряжения. Величина данного сдвига составляет для рассматриваемого узла на-



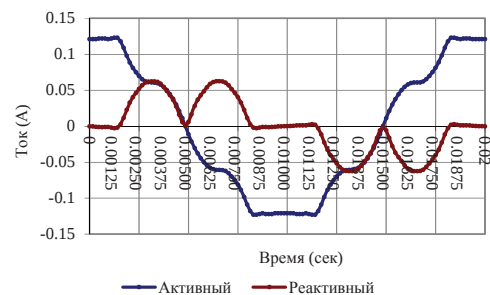
a/a



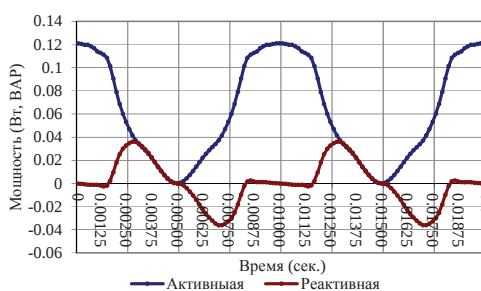
б/б

Рис. 7. Проводимости: а) активного элемента; б) реактивного элемента схемы замещения преобразовательной нагрузки

Fig. 7. Conductivity of: a) active element; b) reactive element of the converter load substitution circuit



a/a



б/б

Рис. 8. а) токи; б) мощности активного и реактивного элементов схемы замещения преобразовательной нагрузки

Fig. 8. a) current; b) power of active and reactive elements of the converter load equivalent circuit

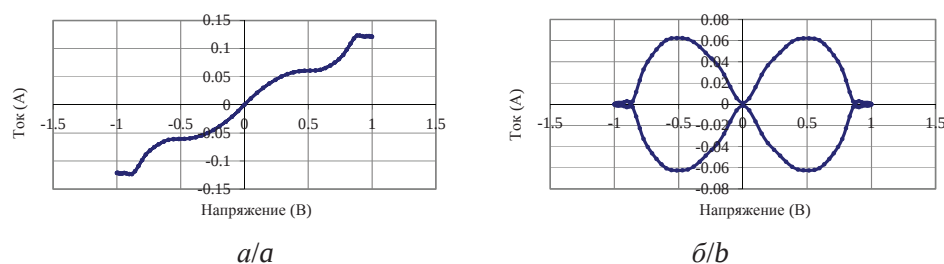


Рис. 9. Вольтамперные характеристики активного (а) и реактивного (б) элементов преобразовательной нагрузки

Fig. 9. Volt-ampere characteristics of active (a) and reactive (b) elements of the converter load

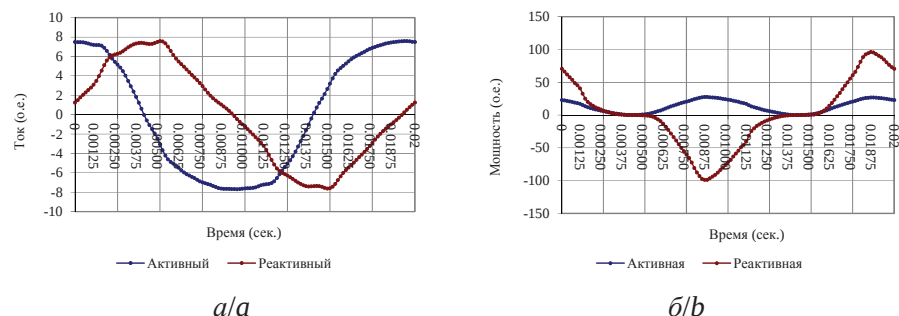


Рис. 10. а) токи; б) мощности активного и реактивного элементов схемы замещения нагрузки

Fig. 10. a) current; b) power of active and reactive elements of the load replacement circuit

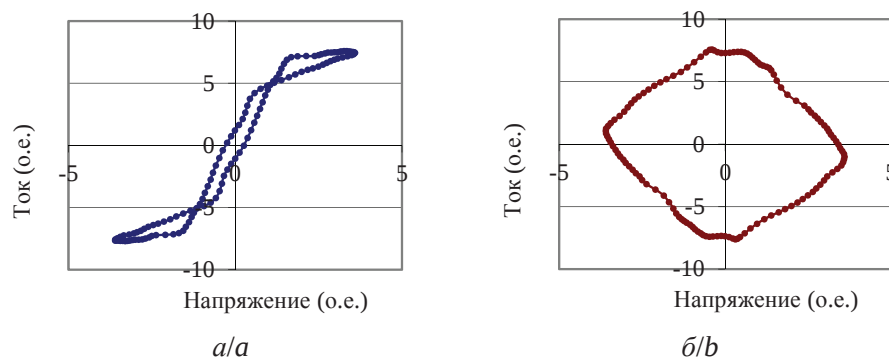


Рис. 11. Вольтамперные характеристики активного (а) и реактивного (б) элементов нагрузки фазы промышленного узла

Fig. 11. Volt-ampere characteristics of active (a) and reactive (b) load cells of the industrial node phase

грузки 5,5–8,5 эл. градусов. Причиной данного сдвига являются активные потери в элементах системы электроснабжения, вызванные наведенными токами (токи намагничивания, вихревые токи, токи, вызывающие поверхностный эффект в проводниках, и пр.).

Выводы

1. Предложенная функциональная модель нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками обеспечивает математическое моделирование нагрузок в установившихся режимах.
2. Предложенный алгоритм идентификации нелинейных нагрузок по результатам измерения их временных диаграмм фазных напряжений и токов позволяет определять частичные проводимости каналов функциональной модели, по-

строение вольтамперных характеристик активного и реактивного элементов, оценивать влияние наведенных токов в элементах системы электроснабжения.

3. Полученные математические модели нелинейных нагрузок могут использоваться при моделировании несинусоидальных, несимметричных режимов электрических систем и сетей с нелинейными нагрузками, показателей качества напряжения, основных и добавочных потерь электрической энергии и оценивании вклада той или иной нелинейной нагрузки сложной электрической сети в отклонения показателей качества напряжения от нормативных значений.
3. На основе предложенного алгоритма возможно построение нелинейных эквивалентов отдельных подсистем сложной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харлов Н.Н., Боровиков В.С. Моделирование установившихся режимов сложных электрических сетей с нелинейными и несимметричными нагрузками // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: Материалы Всероссийской конференции. – Иркутск, 2015. – С. 229–236.
2. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Харлов Н.Н., Боровиков В.С. Итоги обследования режимов распределительных электрических сетей Сибири и юга России // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: Материалы Всероссийской конференции. – Иркутск, 1–3 сентября 2015. – С. 183–188.
4. Kharlov N.N. About the Concept of System Modeling of Electric Energy Quality // The Second International Forum on Strategic Technology. – Mongolia, 2007. – P. 448–505.
5. Добуш В.С. Математическое моделирование электрической сети при наличии в ней нелинейной нагрузки // Апробация. – 2014. – № 5. – С. 10–12.
6. Development of calculation methods for additional electrical losses during transportation / N.N. Kharlov, T.V. Acimzhanov, V.S. Borovikov, V.Ya. Ushakov // Conference Digest the 9th International Forum on Strategic Tecnology. – Bangladesh, 2014. – P. 351–354.
7. Использование метода гармонического баланса для расчета не-синусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения / Л.А. Кучумов, Н.Н. Харлов, Н.Ю. Карташиди, А.В. Пахомов, А.А. Кузнецов // Электричество. – 1999. – № 12. – С. 10–20.
8. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н. Портягин, М.С. Ершов, П.Ю. Барбасов, М.Ю. Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 61–66.
9. Load modeling for wide area power systems / P. Ju, C. Qin, F. Wu, H. Xie, Y. Ning // Electrical Power Energy System. – 2014. – V. 33. – P. 909–917.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Идентификация асинхронной нагрузки // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2. – С. 56–61.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Шульгин М.С. Параметрическая идентификация элементов электроэнергетических систем. – Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. – 126 с.
12. Применение эквивалентирования при расчетах частотных характеристик сопротивлений узлов электрических нагрузок / А.Н. Ожегов, Л.В. Дерендяева, И.А. Суворова, А.А. Закалата // Сборник статей. 2-е издание, исправленное и дополненное. – Киров: Изд-во Вятского государственного университета, 2016. – С. 2089–2093.
13. Arash Miranian, Kumars Rouzbehi. Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks // IEEE Transactions on Power Systems. – 2013. – V. 28. – № 3. – P. 2872–2881.
14. Knyazkin V., Cañizares C., Soder L. On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads // IEEE Transactions on Power Systems. – 2004. – V. 19. – № 2. – P. 1023–1031.
15. Идентификация параметров узла нагрузки с эквивалентным электроприемником / А.О. Кашканов, М.Н. Охотников, А.С. Плехов, А.В. Серебряков // Главный энергетик. – 2015. – № 9. – С. 58–62.
16. A New Method for Power System Load Modeling Using a Nonlinear System Identification Estimator / M.Gh. Jahromi, S.D. Mitchell, G. Mirzaeva, D. Gay // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – V. 27. – P. 3535–3542.
17. Karlsson D., Hill D.J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power system // IEEE Transactions on Power Systems. – 1994. – V. 15. – P. 157–166.
18. Wang Y.-J., O'Connell R.M., Brownfield G. Modeling and prediction of distribution system voltage distortion caused by nonlinear residential loads // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – V. 7. – P. 744–751.
19. Харлов Н.Н. Математическое моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными электроприемниками // Электричество. – 2006. – № 2. – С. 7–12.
20. Power system load modeling by learning based on system measurements / J. Wen, L. Jiang, Q. Wu, S. Cheng // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – V. 18. – № 2. – P. 264–270.
21. Определение параметров элементов электроэнергетических систем по данным измерений / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.А. Кушов, М.С. Шульгин // Системы. Методы. Технологии. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2015. – 184 с.
22. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Н.П. Петров, Б.Л. Шмульян. – М.: Энергия, 1976. – 440 с.
23. Глинтерник С.Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. – Л.: Наука, 1968. – 308 с.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Харлов Н.Н., кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер Регионального центра ресурсосбережения Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Булыга Л.Л., аспирант кафедры электрических сетей и электротехники, инженер Регионального центра ресурсосбережения Энергетического института, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.3

MODELING AND IDENTIFICATION OF LOAD NODES WITH NONLINEAR CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS BASED ON MEASUREMENT DATA

Nikolay N. Kharlov¹,

rcr@tpu.ru

Leonid L. Bulyga¹,

rcr@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research consists in improving the methods of modeling non-sinusoidal and asymmetric modes of complex electrical networks. The modes of complex electrical networks are calculated taking into account the distribution of the parameters of transmission lines, geometry of wire suspension, nonlinear properties of node loads. This significantly complicates the task, but at the same time provides new, more accurate information on the modes, in particular, the determination of contribution of this or that nonlinear load to formation of voltage quality indicators and additional losses of electricity from current unsinusoidality. The existing variety of methods and approaches to modeling loads, reflected in the article, points to the relevance of the issue and significant scientific interest in their development.

The main aim is to develop a new approach to simulation of nonlinear loads.

The methods of the research. The time diagrams of voltage and current, obtained by instrumental examination, are used as the initial data to identify the industrial load node. The time diagrams of voltage and current of a six-pulse converter were obtained from the known analytical relationships. The authors have used the well-known approach to modeling nonlinear systems when developing the model and identification algorithm. The data of load measurements were obtained by the Regional center of resource saving TPU during the instrumental survey.

The results. The authors proposed the functional load model with nonlinear volt-ampere characteristics and necessary design relationships, providing mathematical modeling in steady-state modes, and the algorithm for identifying nonlinear loads. The paper introduces the results of load identification in the form of a six-pulse converter and the load of a common industrial node of the 110 kV network as an example.

Key words:

Voltage time diagram, current time diagram, mathematical model, nonlinear load, identification, higher harmonic components of current and voltage, nonlinear current-voltage characteristic, functional model.

REFERENCES

1. Kharlov N.N., Borovikov V.S. Modelirovanie ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskikh setey s nelineynymi i nesimmetricheskimi nagruzkami [Steady-state modes modeling of complex electric networks with nonlinear and asymmetric loads]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in the 21st Century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 229–236.
2. Arlilaga J., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.
3. Kharlov N.N., Borovikov V.S. Itogi obsledovaniya rezhimov raspredelitelnykh elektricheskikh setey Sibiri i yuga Rossii [Results of the survey of electrical distribution networks modes in Siberia and southern Russia]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Energetika Rossii v XXI veke. Innovatsionnoye razvitiye i upravleniye* [Proc. of the All-Russian Conference. Energy of Russia in the 21st Century. Innovative development and management]. Irkutsk, 2015. pp. 183–188.
4. Kharlov N.N. About the Concept of System Modeling of Electric Energy Quality. *The Second International Forum on Strategic Technology*. Mongolia, 2007. pp. 448–505.
5. Dobush V.S., Matematicheskoe modelirovanie elektricheskoy seti pri nalichii v ney nelineynoy nagruзки [Mathematical modeling of an electrical network at nonlinear load in it]. *Aprobatsiya*, 2014, no. 5, pp. 10–12.
6. Kharlov N.N., Acimzhanov T.V., Borovikov V.S., Ushakov V.Ya. Development of calculation methods for additional electrical losses during transportation. *Conference Digest the 9th International Forum on Strategic Technology*. Bangladesh, 2014. pp. 351–354.
7. Kuchumov L.A., Kharlov N.N., Kartasidi N.Yu., Pakhomov A.V., Kuznetsov A.A. Ispolzovaniye metoda garmonicheskogo balansa dlya rascheta nesinusoidalnykh i nesimmetrichnykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya [Use of harmonic balance method to calculate non-sinusoidal and asymmetric modes in power supply systems]. *Electrical Technology Russia*, 1999, no. 12, pp. 10–20.
8. Portnyagin N.N., Ershov M.S., Barbasov P.Yu., Chernev M.Yu. Modelirovanie vliyaniya velichiny nelineynoy nagruзки na kachestvo elektroenergii promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem [Simulation of nonlinear load influence on the quality of electric power of industrial electrotechnical systems]. *Russian Electromechanics*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 61–66.
9. Ju P., Qin C., Wu F., Xie H., Ning Y. Load modeling for wide area power systems. *Electric Power Energy Systems*, 2014, vol. 33, pp. 909–917.
10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Kong Zan. Identifikatsiya asinkhronnoy nagruзки [Identification of asynchronous load]. *Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2, pp. 56–61.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shulgin M.S. *Parametricheskaya identifikatsiya elementov elektroenergeticheskikh sistem* [Parametric identification of elements in electric power systems]. Saarbrücken, LAP LAMBERT, 2013. 126 p.
12. Ozhegov A.N., Derendayeva L.V., Suvorova I.A., Zakalata A.A. Primenenie ekvivalentirovaniya pri raschetakh chastotnykh kharakteristik soprotivleniy uzlov elektricheskikh nagruzek [Use of equivalence in calculation of frequency characteristics of resi-

- stances in nodes of electrical loads]. *Obshchestvo, Nauka, Innovatsii. Sbornik statey* [Society, Science, Innovation. Articles] Kirov, Vyatsky gosudarstvenny universitet, 2016. pp. 2089–2093.
13. Arash Miranian, Kumars Rouzbehi. Nonlinear Power System Load Identification Using Local Model Networks. *IEEE transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, no. 3, pp. 2872–2881.
 14. Knyazkin V., Cañizares C., Soder L. On the parameter estimation and modeling of aggregate power system loads. *IEEE Transaction Power System*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 1023–1031.
 15. Kashkanov A.O., Okhotnikov M.N., Plekhov A.S., Serebryakov A.V. Identifikatsiya parametrov uzla nagruzki s ekvivalentnym elektropriyemnikom [Identification of load node parameters with an equivalent electrical receiver]. *Glavny energetik*, 2015, no. 9, pp. 58–62.
 16. Jahromi M.G., Mitchell S.D., Mirzaeva G., Gay D. A New Method for Power System Load Modeling Using a Nonlinear System Identification Estimator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 27, pp. 3535–3542.
 17. Karlsson D., Hill D.J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, vol. 15, pp. 157–166.
 18. Wang Y.-J., O'Connell R.M., Brownfield G. Modeling and prediction of distribution system voltage distortion caused by nonlinear residential loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, vol. 7, pp. 744–751.
 19. Kharlov N.N. Matematicheskoe modelirovanie i identifikatsiya uzlov nagruzki s nelineynymi elektropriemnikami [Mathematical modeling and identification of load nodes with nonlinear electrical receivers]. *Electrical Technology Russia*, 2006, no. 2, pp. 7–12.
 20. Wen J., Jiang L., Wu Q., Cheng S. Power system load modeling by learning based on system measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 264–270.
 21. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kushov A.A., Shulgin M.S. Opredelenie parametrov elementov elektroenergeticheskikh sistem po dannym izmereniy [Determination of the parameters of elements in electric power systems based on measurement data]. *Systems. Methods. Technologies*. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2015. 184 p.
 22. Popkov Yu.S., Kiselev O.N., Petrov N.P., Shmulyan B.L. Identifikatsiya i optimizatsiya nelineynykh stokhasticheskikh system [Identification and optimization of nonlinear stochastic systems]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 440 p.
 23. Glinternik S.R. Elektromagnitnye protsessy i rezhimy moshchnykh staticheskikh preobrazovateley [Electromagnetic processes and modes of powerful static converters]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 308 p.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Nikolay N. Kharlov, Cand. Sc., associate professor, chief engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Leonid L. Bulyga, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.