УДК 621.3.011.7+621.3.049+621.3.06
DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-33-39

В. З. КОВАЛЁВ[1]
А. Г. ЩЕРБАКОВ[1]
О. В. АРХИПОВА[1]
С. В. ЛАНГРАФ[2]
Д. С. БУНЬКОВ[3]
С. С. ЕСИН[4]

[1]Югорский государственный университет, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, г. Ханты-Мансийск

[2]ООО «НПФ Мехатроника-Про», Томская область, г. Томск

[3]АО «ЭлеСи», Томская область, г. Томск

[4]АО «ЮТЭК — Региональные сети», г. Ханты-Мансийск

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ПРИ ИХ ГЛУБОКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

В статье предлагается методика идентификации параметров математических моделей электротехнических комплексов и систем. Методика предназначена для создания системы мониторинга влияния нелинейных компонентов электротехнических комплексов и систем при их глубоком взаимодействии на качество электрической энергии в узле нагрузки. Обосновывается применение коэффициента вариации параметров в качестве критерия оценки достоверности идентификации параметров математических моделей. В качестве исходной информации используются оцифрованные данные напряжения в точке общего присоединения и токи отдельных компонентов анализируемого комплекса. Математический аппарат идентификации строится на базе модификации метода Марквардта. Серия вычислительных экспериментов подтверждает основные теоретические положения статьи. Показана возможность идентификации параметров моделей компонент комплекса при существенно нелинейной форме напряжения в точке общего присоединения.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, точка общего присоединения, качество электрической энергии, оптимизация, метод Марквардта, идентификация параметров математических моделей.

Введение. Один из важнейших вопросов функционирования электротехнических комплексов и систем (ЭТКС) — исследования работоспособности и качества функционирования ЭТКС в различных режимах работы, при разнообразных внешних воздействиях. Указанная задача обостряется в том числе такими практическими проблемами, как оценка качества электрической энергии в точке общего присоединения (ТОП), поскольку показатели качества электрической энергии (ПКЭ) существенно варьируются при наличии в ЭТКС нелинейных взаимодействующих компонентов. Среди таких компонентов как правило присутствуют компоненты генерирования электрической энергии и компоненты электропривода, электроснабжения, электрооборудования и реализуемых электротехнологий. Решению указанных выше вопросов посвящён ряд работ [1–6]. Сформулированная проблема может рассматриваться также и как экономическая: за снижение качества ЭЭ для виновников предусматриваются различного рода штрафы и санкции. Виновник снижения качества ЭЭ в ТОП может быть определён путём сравнения его допустимого и фактического вклада в снижение показателей качества. Как правило, к ТОП подключается несколько потребителей ЭЭ. На сегодняшний день качество ЭЭ нормируется согласно [7], в котором приводятся основные и дополнительные показатели качества. Тогда следует сформулировать вопрос о долевом вкладе каждого потребителя в управление показателями качества ЭЭ в ТОП.

Согласно [8], а также монографии [9]: «...качество электроэнергии оценивается по технико-экономическим показателям, учитывающим технологический и электромагнитный ущербы, причиняемые народному хозяйству». Под технологическим ущербом принято понимать: ухудшение качества продукции или возможную её порчу с последующей вынужденной утилизацией; серьёзные сбои или полное расстройство технологических процессов; падение уровня производительности труда. Под электромагнитным ущербом принято понимать: повреждение электрооборудования, дополнительные потери при передаче электрической энергии, сбои и ложные срабатывания при функционировании автоматики и телемеханики...

Среди показателей качества ЭЭ [7] присутствует суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U, характеризующий отклонение формы напряжения сети от синусоидальной. Причины появления несинусоидальности напряжения определяются в основном наличием нелинейных потребителей в ЭТКС [1–6] и усугубляются их взаимодействием и взаимным влиянием. Кроме суммарного коэффициента гармонических составляющих K_U, среди всех показателей качества ЭЭ, согласно [7], интерес представляет также коэффициент n-й гармонической составляющей $K_{U(n)}$, $n=1,...,40$. Другие показатели качества ЭЭ в ТОП, например отклонение напряжения δU и частоты Δf, в рамках данной статьи не рассматриваются, поскольку на большинство из них воздействовать может только электроснабжающая организация, не входящая в структуру анализируемой ЭТКС.

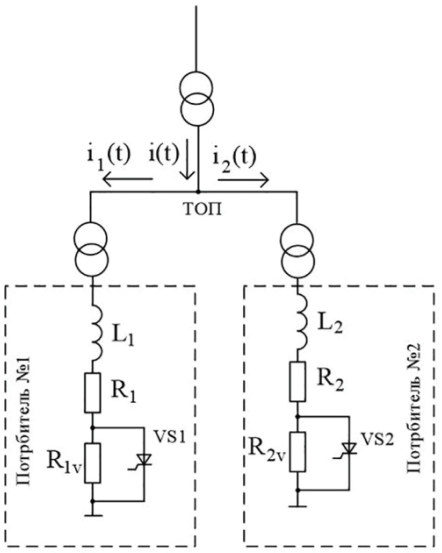

Рис. 1. Схема замещения модели системы электроснабжения с двумя потребителями

Теория. Данная формулировка задачи, так же как и формулировка задач, решение которых рассматривается в [1–4, 10–15], может быть сведена к использованию математического моделирования сложных ЭТКС и идентификации параметров и характеристик математических моделей данных ЭТКС в реальном масштабе времени. Рассмотрим схему замещения некоторого ЭТКС (рис. 1), включающего в свой состав электроснабжающую организацию и два потребителя ЭЭ, подключенных к ТОП. Электроснабжающая организация, в данном случае, моделируется источником ЭДС, в общем случае, закон изменения которого может быть любой. В качестве допущения в рамках данной работы предполагаем, что электроснабжающая организация осуществляет снабжение исследуемого ЭТКС электрической энергией, содержащей только основную гармонику напряжения. Элементы R и L моделируют соответственно наличие активного сопротивления и индуктивности в канале передачи электрический энергии к ТОП. Согласно исследованиям [16], более 50 % всей вырабатываемой электрической энергии преобразуется двигателями в механическую работу, следовательно, значительная часть потребителей ЭЭ может рассматриваться как активно-индуктивная нагрузка. Таким образом, первый потребитель ЭЭ моделируется последовательным включением активного сопротивления R^*_1 и индуктивности L_1. Второй потребитель — последовательным включением активного сопротивления R^*_2 и индуктивности L_2. Предполагается, что в рамках развиваемой в данной работе теории для учёта нелинейности характеристик первого и второго потребителей ЭЭ активные сопротивления R^*_1 и R^*_2 будут изменяться следующим образом:

$$\begin{cases} R_1^* = R_1 \text{ при } t \in \left[t_{VS1}^{(0)}, t_{VS1}^{(1)}\right] \\ R_1^* = R_1 + R_{1V} \text{ при } t \in \left]t_{VS1}^{(0)}, t_{VS1}^{(1)}\right[\end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_2^{\cdot} = R_2 \text{ при } t \in \left[t_{VS2}^{(0)}, t_{VS2}^{(1)}\right] \\ R_2^{\cdot} = R_2 + R_{2V} \text{ при } t \in \left]t_{VS2}^{(0)}, t_{VS2}^{(1)}\right[\end{cases}, \quad (2)$$

где $t_{VS1}^{(0)}, t_{VS1}^{(1)}$ — соответственно время отпирания и запирания вентиля $VS1$; $t_{VS2}^{(0)}, t_{VS2}^{(1)}$ — соответственно время отпирания и запирания вентиля $VS2$.

Другими словами, нелинейность первого и второго потребителей ЭЭ в рассматриваемой схеме (рис. 1) моделируется присутствием в их составе полупроводниковых вентилей $VS1$ и $VS2$, коммутирующих дополнительные сопротивления R_{1v} и R_{2v}. Вентили $VS1$ и $VS2$ считаем идеальными, сопротивлением вентилей пренебрегаем.

Таким образом, для рассматриваемой схемы замещения ЭТКС (рис. 1) будет справедлива следующая система уравнений, записанная на основании законов Кирхгофа:

$$\begin{cases} i(t) = i_1(t) + i_2(t) \\ R \cdot i(t) + L \cdot \dfrac{di(t)}{dt} + R_2^{\cdot} \cdot i_2(t) + L_2 \cdot \dfrac{di_2(t)}{dt} = e(t) \\ R_2^{\cdot} \cdot i_2(t) + L_2 \cdot \dfrac{di_2(t)}{dt} - R_1^{\cdot} \cdot i_1(t) - L_1 \cdot \dfrac{di_1(t)}{dt} = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Преобразуем систему (3) к следующему виду:

$$\begin{cases} L \cdot \dfrac{di_1(t)}{dt} + (L + L_2) \cdot \dfrac{di_2(t)}{dt} = e(t) - \left(R \cdot i(t) + R_2^{\cdot} \cdot i_2(t)\right) \\ -L_1 \cdot \dfrac{di_1(t)}{dt} + L_2 \cdot \dfrac{di_2(t)}{dt} = R_1^{\cdot} \cdot i_1(t) - R_2^{\cdot} \cdot i_2(t) \end{cases}. \quad (4)$$

Обозначим правые части последней системы уравнений как:

$$\begin{cases} B_1(t) = e(t) - \left(R \cdot i(t) + R_2^{\cdot} \cdot i_2(t)\right) \\ B_2(t) = R_1^{\cdot} \cdot i_1(t) - R_2^{\cdot} \cdot i_2(t) \end{cases}. \quad (5)$$

При этом исходную систему (3) можно будет представить в матричной форме записи:

$$\begin{vmatrix} L & (L + L_2) \\ -L_{1\cdot} & L_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dfrac{di_1(t)}{dt} \\ \dfrac{di_2(t)}{dt} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Преобразуем систему уравнений (6) к нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \dfrac{di_1(t)}{dt} = \dfrac{\Delta_1(t)}{\Delta(t)} \\ \dfrac{di_2(t)}{dt} = \dfrac{\Delta_2(t)}{\Delta(t)} \end{cases}. \quad (7)$$

В последней системе уравнений:

$$\Delta_1(t) = \begin{vmatrix} B_1(t) & (L + L_2) \\ B_2(t) & L_2 \end{vmatrix} = B_1(t) \cdot L_2 - B_2(t) \cdot (L + L_2), \quad (8)$$

$$\Delta_2(t) = \begin{vmatrix} L & B_1(t) \\ -L_1 & B_2(t) \end{vmatrix} = L \cdot B_2(t) + L_1 \cdot B_1(t), \quad (9)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} L & (L + L_2) \\ -L_{1\cdot} & L_2 \end{vmatrix} = L \cdot L_2 + L_1 \cdot (L + L_2). \quad (10)$$

Система уравнений (7) и дополнительные условия (1) и (2), соответствующие схеме замещения на рис. 1, могут рассматриваться как математическая модель рассматриваемого ЭТКС, включающего в свой состав электроснабжающую организацию, передающую линию и два нелинейных потребителя ЭЭ, подключённых к ТОП, взаимно влияющих друг на друга.

Как было сказано выше, анализ системы уравнений (7) и условий (1) и (2), при известных значениях параметров системы уравнений (7) и условий (1) и (2), при известном законе изменения ЭДС $e(t)$, даёт возможность определить вклад каждого нелинейного потребителя ЭЭ в искажение показателей качества ЭЭ в ТОП. Для выполнения этой задачи требуется найти решение системы уравнений (7) относительно токов, которое бы учитывало условия (1) и (2). Система уравнений (7), преобразованная к нормальной форме Коши, совместно с дополнительными условиями (1) и (2) представляет собой нелинейную систему дифференциальных уравнений. Для её решения, в некоторых случаях, необходимо применение специализированных численных методов [9].

Согласно результатам работы [16], достоверность определения доли вклада каждого потребителя ЭЭ в показатели качества ЭЭ в ТОП на основании системы (7) определяется достоверностью идентификации параметров математических моделей каждого из потребителей, подключённых к ТОП. Таким образом, задача идентификации всех параметров, входящих в математическую модель (7), является достаточно значимой частью в методике оценки доли вклада каждого потребителя ЭЭ в изменение показателей качества ЭЭ в ТОП. В данной работе предлагается методика идентификации параметров математических моделей потребителей ЭЭ. Согласно данным теоретическим положениям, процесс идентификации параметров математической модели (5) может быть сформулирован в качестве задачи оптимизации. В ходе решения задачи оптимизации будет осуществляться поиск минимума некоторой целевой функции. Целевая функция в неявном виде будет зависеть от искомых параметров математической модели потребителя ЭЭ. Если ввести обозначения для рассматриваемой целевой как Z ($R^{\cdot}_k$, L_k), где k — индекс потребителя ЭЭ, тогда для каждого из потребителей в рассматриваемой схеме замещения СЭС (рис. 1) может быть записана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial R_k^{\cdot}}{\partial \tau} = -\dfrac{\partial Z\left(R_k^{\cdot}, L_k\right)}{\partial R_k^{\cdot}} \\ \dfrac{\partial L_k}{\partial \tau} = -\dfrac{\partial Z\left(R_k^{\cdot}, L_k\right)}{\partial L_k} \\ R_k^{\cdot} \in \left[R_{k\min}^{\cdot}, R_{k\max}^{\cdot}\right] \\ L_k \in \left[L_{k\min}, L_{k\max}\right] \end{cases}. \quad (11)$$

$$k = 1,2$$

В системе уравнений (11) $\left[R_{k\min}^{\cdot}, R_{k\max}^{\cdot}\right]$, $\left[L_{k\min}, L_{k\max}\right]$ диапазон допустимых значений $R^{\cdot}$ и L k-го потребителя ЭЭ, подключённого к ТОП, $k = 1,2$.

Система уравнений (11) описывает процесс идентификации параметров потребителей ЭЭ как некоторый переходный процесс, протекающий с течением фиктивного времени τ. Данная система,

как и система уравнений (5), является нелинейной системой дифференциальных уравнений, для решения которой требуется применение специализированных численных методов [9]. В рассматриваемом случае предлагается использовать модифицированный метод Марквардта [17–20], формула которого будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} R_k^{\cdot} \\ L_k \end{bmatrix}^{j+1} = \begin{bmatrix} R_k^{\cdot} \\ L_k \end{bmatrix}^{j} + \begin{bmatrix} h^j & 0 \\ 0 & h^j \end{bmatrix} \times$$
$$\times \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - a \cdot \begin{bmatrix} h^j & 0 \\ 0 & h^j \end{bmatrix} \cdot A_f \right]^{-1}, \quad (12)$$

где j — номер текущей итерации; $\begin{bmatrix} R_k^{\cdot} \\ L_k \end{bmatrix}^{j}$ — значения искомых параметров математической модели k-го потребителя ЭЭ на j-м шаге итерации; h^j — шаг интегрирования на j-й итерации; a — параметр метода Марквардта, равный единице; A_f — матрица Якоби, соответствующая матрице Гессе в методе Марквардта:

$$A_f = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 Z(R_k^{\cdot}, L_k)}{(\partial R_k^{\cdot})^2} & \dfrac{\partial Z(R_k^{\cdot}, L_k)}{\partial R_k^{\cdot} \partial L_k} \\ \dfrac{\partial Z(R_k^{\cdot}, L_k)}{\partial L_k \partial R_k^{\cdot}} & \dfrac{\partial^2 Z(R_k^{\cdot}, L_k)}{(\partial L_k)^2} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

В целом стратегия модифицированного метода Марквардта будет заключаться в поиске некоторого количества векторов $x^j = \left[(R_k^{\cdot})^j \quad (L_k)^j \right]^T$, где $j = 1, 2, 3, \ldots$ при соблюдении следующего:

$$Z(x^{j+1}) < Z(x^j) . \quad (14)$$

В последнем неравенстве:

x^j — предыдущий набор искомых параметров потребителя ЭЭ. Набор параметров потребителя ЭЭ, соответствующий началу расчёта $x^{(0)}$, определяется пользователем;

x^{j+1} — последующий набор искомых параметров потребителя ЭЭ, вычисляемый по правилу (12).

Предполагается, что процесс идентификации параметров потребителя ЭЭ будет остановлен в случае выполнения следующего:

1) $j \geq M$, где M — заранее заданное, максимально возможное количество итераций;

2) $\left\| \nabla Z(x^j) \right\| < \varepsilon$, где ε — заранее заданное, малое по значению положительное число, косвенно содержащее допустимую погрешность определения искомых параметров математических моделей потребителей ЭЭ;

$\nabla Z(x^{(k)})$ — вектор градиента целевой функции, определяемый следующим образом:

$$\nabla Z\left((R_k^{\cdot})^j, (L_k)^j \right) = \left[\frac{\partial Z(R_k^{\cdot}, L_k)}{\partial R_k^{\cdot}} \quad \frac{\partial Z(R_k^{\cdot}, L_k)}{\partial L_k} \right]^T. \quad (15)$$

Используемая в процессе идентификации параметров математических моделей потребителей ЭЭ целевая функция $Z(R^{\cdot}_k, L_k)$ не зависит в явном виде от искомых параметров потребителей и определяется как:

$$Z\left((R_k^{\cdot})^j, (L_k)^j \right) = \alpha \sum_{k1=0}^{N} \left(i_{Э,k1} - i_{P,k1} \right)^{\beta}. \quad (16)$$

В последнем выражении:

α — весовой коэффициент, определяемый на основе экспериментов, для решения рассматриваемой в статье задачи он составляет 1,053;

β — показатель степени, так же определяемый на основании экспериментов, в рассматриваемом случае он равен 2,1;

$i_{Э,k1}$ — значение тока, получаемое из измерительного эксперимента;

$i_{P,k1}$ — значение тока, получаемое расчётным путём;

N — количество точек на интервале измерения.

Предполагается, что для получения целевой функции (16) необходимо произвести серию измерений напряжения, подаваемого на потребителя ЭЭ в ТОП и тока, потребляемого при этом рассматриваемым потребителем ЭЭ. Серию, состоящую из N измерений тока и напряжения, следует выполнять через заданный, достаточно короткий интервал времени, составляющий менее 0,0001 сек. Значение тока, получаемого расчётным путём $i_{P,k1}$ $k1 = 0, \ldots, N$, может быть выполнено с использованием математической модели (5) при текущих значениях $R^{\cdot}_k$, и L_k на каждом j-м шаге идентификации параметров, осуществляемой с помощью выражения (12). При вычислении значения $i_{P,k1}$ $k1 = 0, \ldots, N$ с помощью системы уравнений (5) значения времени t_{k1} и $u_{ab,k1}$ $k1 = 0, \ldots, N$ должны соответствовать аналогичным значениям, определяемым из измерительного эксперимента. В данной работе вводится предположение, что для потребителей ЭЭ, не снижающих качество ЭЭ в ТОП, условия (9)–(10) будут записаны в следующем виде:

$$R_1^{\cdot} = R_1 \text{ при } t \in [0, \infty] , \quad (17)$$

$$R_2^{\cdot} = R_2 \text{ при } t \in [0, \infty] . \quad (18)$$

Поэтому для таких потребителей ЭЭ при вычислении целевой функции (16) с использованием системы дифференциальных уравнений (5) и дополнительных условий (17)–(18) конечное значение целевой функции (16) будет близким к нулю. В противном случае, когда условия (17)–(18) не выполняются, конечное значение целевой функции (16) будет отлично от нуля, что позволяет сделать вывод о сложном характере изменения $R_1^{\cdot}$ и $R_2^{\cdot}$ с течением времени. Последнее обстоятельство потребует повторение процесса идентификации параметров с помощью выражения (12), но при вычислении целевой функции (16) и системы уравнений (5) дополнительные условия (9)–(10) будут иметь более сложный характер.

В ходе выполнения данной работы на языке Object Pascal в среде Delphi был разработан программный продукт Set_RL, реализующий предлагаемую методику определения вклада потребителя ЭЭ в снижение показателей качества ЭЭ в ТОП. Программный продукт также позволяет провести оценку качества предлагаемой в работе методики на основании вычислительного эксперимента с использованием математической модели (5) и дополнительных условий (9)–(10). Была проведена серия вычислительных экспериментов, в ходе выполнения которых предполагалось, что потребитель № 2 представляет собой линейную нагрузку. Для этих целей угол отпирания тиристора *VS*2 в ходе выполнения всех экспериментов принимался равным нулю. Потребитель № 1 рассматривался как нелинейный,

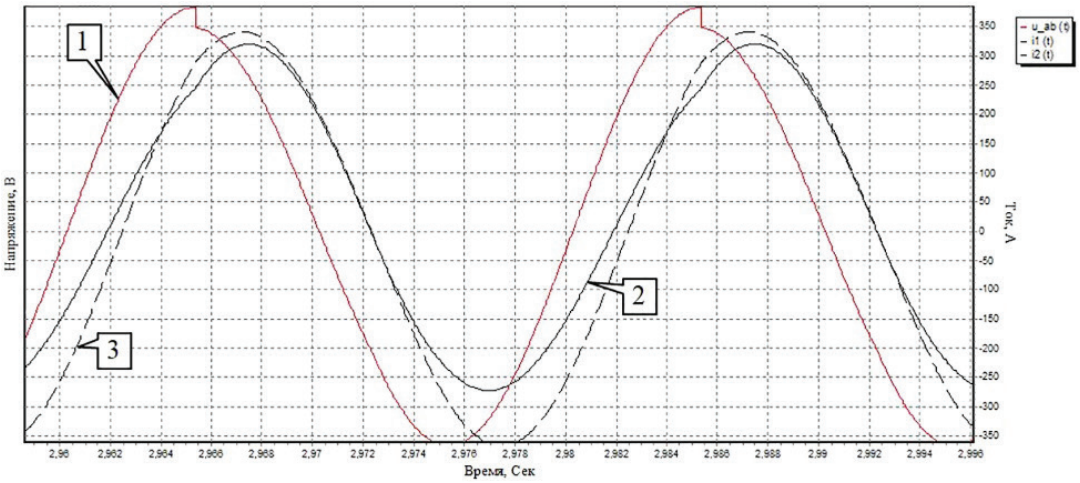

Рис. 2. Осциллограммы напряжения в ТОП и токов потребителей ЭЭ № 1 и № 2 для схемы рис. 1 (угол отпирания тиристора *VS*1=90°, значение R_{1v}=0,4•R_1):
1 — изменение мгновенных значений напряжения в ТОП;
2 — изменение мгновенных значений тока потребителя № 1;
3 — изменение мгновенных значений тока потребителя № 2

Таблица 1

Результаты процесса идентификации параметров потребителя ЭЭ № 2 (угол отпирания тиристора *VS*1=90°, заданное значение R_2=0,4 Ом, заданное значение L_2=1 мГн)

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R_{1v}	$0\cdot R_1$	$0{,}1\cdot R_1$	$0{,}2\cdot R_1$	$0{,}25\cdot R_1$	$0{,}3\cdot R_1$	$0{,}35\cdot R_1$	$0{,}4\cdot R_1$	$0{,}5\cdot R_1$	$0{,}7\cdot R_1$	$0{,}8\cdot R_1$	$0{,}9\cdot R_1$
K_U, %	0	0,757	1,772	2,145	2,272	2,616	3,188	3,584	4,931	5,424	5,882
R_2, Ом	0,404	0,405	0,398	0,398	0,405	0,405	0,398	0,405	0,398	0,398	0,398
L_2, мГн	0,989	0,987	1,016	1,016	0,987	0,986	1,017	0,987	1,017	1,017	1,017

Таблица 2

Результаты процесса идентификации параметров потребителя ЭЭ № 1 (угол отпирания тиристора *VS*1=90°, заданное значение R_1=0,4 Ом, заданное значение L_1=1 мГн)

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R_{1v}	$0{,}1\cdot R_1$	$0{,}2\cdot R_1$	$0{,}25\cdot R_1$	$0{,}3\cdot R_1$	$0{,}35\cdot R_1$	$0{,}4\cdot R_1$	$0{,}5\cdot R_1$	$0{,}6\cdot R_1$	$0{,}7\cdot R_1$	$0{,}8\cdot R_1$	$0{,}9\cdot R_1$
K_U, %	0,757	1,798	2,145	2,272	2,616	3,188	3,584	4,164	4,931	5,424	5,882
R_1, Ом	0,427	0,441	0,452	0,469	0,479	0,481	0,507	0,526	0,535	0,552	0,568
L_1, мГн	1,002	1,058	1,074	1,057	1,075	1,130	1,139	1,189	1,281	1,341	1,405

при этом глубина его нелинейности определялась путём изменения угла отпирания тиристора *VS*1 (рис. 1) в диапазоне 0°÷90° и величины активного сопротивления R_{1v} в диапазоне (0,1−0,9) R_1. Нелинейность потребителя 1 приводила к появлению несинусоидального напряжения в ТОП, степень несинусоидальности которого оценивалась с помощью суммарного коэффициента гармонических составляющих K_U согласно [7]. С помощью программы Set_RL были получены осциллограммы изменения напряжения в ТОП и токов потребителей 1 и 2. Осциллограммы напряжения и токов рассматривались в качестве исходных данных для выполнения процесса идентификации параметров математических моделей потребителей № 1 и № 2 на основе уравнений (11), (12). Примеры осциллограмм напряжения в ТОП и токов потребителей 1 и 2 представлены на рис. 2, фрагменты результатов процесса идентификации параметров математических моделей потребителей 1 и 2 представлены в табл. 1 и 2.

Для оценки качества результатов идентификации параметров математических моделей потребителей 1 и 2, приводимых в табл. 1, 2, использованы средства статистической обработки результатов исследований: были определены значения математического ожидания $M[X]$, дисперсии D, размаха R,

Таблица 3

Результаты статистической обработки данных идентификации параметров потребителя ЭЭ № 2

	$M[X]$, Ом	$D\times10^{-5}$, Ом^2	R, Ом	$\sigma\times10^{-2}$, Ом	V, %	O, %	$T1(X)$, Ом	$T2(X)$, Ом
R_2	0,401	1,30	0,01	0,36	0, 89	1,845	0,399	0,403
	$M[X]$, мГн	$D\times10^{-5}$, мГн^2	R, мГн	$\sigma\times10^{-2}$, мГн	V, %	O, %	$T1(X)$, мГн	$T2(X)$, мГн
L_2	1,003	23,74	0,03	1,54	1,54	3,090	0,994	1,012

Таблица 4

Результаты статистической обработки данных идентификации параметров потребителя ЭЭ № 1

	$M[X]$, Ом	$D\times10^{-5}$, Ом^2	R, Ом	$\sigma\times10^{-2}$, Ом	V^2, %	O, %	$T1(X)$, Ом	$T2(X)$, Ом
R_1	0,494	218,59	0,14	4,68	9,46	28,613	0,467	0,522
	$M[X]$, Ом	$D\times10^{-5}$, Ом^2	R, Ом	$\sigma\times10^{-2}$, Ом	V^2, %	O, %	$T1(X)$, Ом	$T2(X)$, Ом
L_1	1,159	1702,00	0,40	13,05	11,25	34,766	1,082	1,236

среднеквадратического отклонения σ, коэффициентов вариации V и осцилляции O, нижняя $T1(X)$ и верхняя $T2(X)$ граница доверительного интервала. Данные статистической обработки результатов идентификации параметров математических моделей потребителей 1 и 2 приводятся в табл. 3 и 4.

Обсуждение результатов исследования. Как следует из анализа данных, приводимых в табл. 1 – 4, для потребителя № 2, имеющего линейные параметры математической модели, показатели статистической обработки результатов экспериментов выше: например, при идентификации параметров потребителя № 2 коэффициент вариации V для активного сопротивления составляет 0,9 % и 1,54 % для индуктивности, что позволяет сделать вывод о фактической линейности параметров его математической модели и на этом основании — об отсутствии существенного вклада потребителя № 2 в изменение показателей качества электрической энергии в ТОП. Для потребителя № 1, активное сопротивление которого в эксперименте изменяется нелинейно, показатели статистической обработки результатов экспериментов ниже: коэффициент вариации V составляет 9,46 % для активного сопротивления и 11,25 % — для индуктивности. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о неадекватности модели (5) – (8), предполагающей линейность параметров математической модели потребителя № 1. Следовательно, математическая модель (5) – (8) должна быть изменена таким образом, чтобы нелинейность параметров математической модели потребителя № 1 в ней учитывалась бы. Критерием адекватности модели (5) – (8) должны быть высокие показатели статистической обработки результатов экспериментов для всех потребителей, входящих в рассматриваемую математическую модель (5) – (8).

Серия экспериментов по идентификации параметров математических моделей потребителей электрической энергии проводилась при несинусоидальном напряжении питания потребителей от ТОП. Степень несинусоидальности напряжения оценивалась, согласно [7], с помощью суммарного коэффициента гармонических составляющих K_U. Из экспериментов следует, что форма питающего напряжения в ТОП не влияет на точность идентификации параметров математических моделей потребителей электрической энергии.

В дальнейшем методика идентификации параметров математических моделей электротехнических комплексов, на основе которой основана предлагаемая в данной работе методика определения вклада отдельных нелинейных потребителей в изменение показателей качества электрической энергии в ТОП, может быть применена также для решения следующих задач:

— мониторинг технического состояния как отдельного электротехнического оборудования, так и электротехнического комплекса в целом. Предполагаются дополнительные исследования, позволяющие выявлять взаимосвязь уровня развития отдельных типовых дефектов электротехнического оборудования со значением параметров его математических моделей;

— корректировка настроек релейной защиты и автоматики, позволяющая более точно учитывать характер и величину изменения токов и напряжений, соответствующих аварийным режимам работы электрических сетей, что снижает величину ложных срабатываний релейной защиты;

— прогнозирование режимов работы энергоснабжающих организаций с учетом фактического технического состояния электротехнического оборудования, непосредственно влияющего на величину потребляемой электрической энергии как в течение суток, так и в течение года;

— более детально планировать мероприятия по компенсации реактивной мощности и повышению показателей качества электрической энергии в ТОП в зависимости от числа и характера подключаемых к ТОП потребителей электрической энергии.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства ХМАО – Югры в рамках научного проекта № 18-47-860017.

Библиографический список

1. Харлов Н. Н., Бурлыга Л. Л. Моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками по данным измерений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 99—107.

2. Алюнов А. Н. Идентификация параметров схем замещения электрических систем по данным регистраторов аварийных процессов: дис. ... канд. техн. наук. Вологда, 2004. 226 с.

3. Портнягин Н. Н., Ершов М. С., Барбасов П. Ю. [и др.]. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 1. С. 61—66.

4. Ожегов А. Н., Дерендяева Л. В., Суворова И. А. [и др.]. Применение эквивалентирования при расчетах частотных характеристик сопротивлений узлов электрических нагрузок: сб. ст. 2-е изд., испр. и доп. Киров: Изд-во Вятского гос. ун-та, 2016. С. 2089—2093.

5. Jahromi M. Gh., Mitchell S. D., Mirzaeva G. [et al.]. A New Method for Power System Load Modeling Using a Nonlinear System Identification Estimator // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52, Issue. 4. P. 3535—3542. DOI: 10.1109/TIA.2016.2539125.

6. Глазырин А. С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей, регулируемых электроприводов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2017. 40 с.

7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014—07—1. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

8. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1995. 416 с.

9. Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Ковалёв А. Ю. Идентификация параметров и характеристик математических моделей электротехнических устройств: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 108 с.

10. Bolovin E. V., Glazyrin A. S., Brendakov V. N. The Influence of the Design Method for Induction Motor with Stationary Rotor on Identification of Its Parameters // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. SIBCON 2015 — Proceedings. 2015. 7147006. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147006.

11. Карташев И. И., Пономаренко И. С., Сыромятников С. Ю. Определение виновника ухудшения качества электроэнергии при расчётах за электроэнергию // Энергоменеджер. 2000. № 19. С. 10—12.

12. Jahromi M. Gh., Mitchell S. D., Mirzaeva G. [et al.]. A New Method for Power System Load Modeling Using a Nonlinear System Identification Estimator // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52, Issue 4. P. 3535—3542. DOI: 10.1109/TIA.2016.2539125.

13. Гамазин С. И., Петрович В. А. К вопросу об определении фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии // Электрика. 2002. № 7. С. 18—21.

14. Щербаков А. Г. Методика идентификации параметров асинхронных двигателей // Омский научный вестник. 2011. № 1 (97). С 112—116.

15. Kovalev V. Z., Arhipova O. V., Esin S. S., Scherbakov A. G., Tatevosyan A. A. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260, Issue 5. 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.

16. Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Петухова О. А., Зябкин А. А. Влияние отклонения параметров асинхронной машины на её статические характеристики при вентиляторной нагрузке // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С 116—125.

17. Ковалёв Ю. З., Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Чертов Р. А. Идентификация параметров математических моделей электротехнических комплексов. М.: ВНТИЦ, 2001. № 50200100259.

18. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высш. школа, 2002. 840 с. ISBN 5-06-004020-8.

19. Летова Т. А., Пантелеев А. В. Экстремум функций в примерах и задачах. М.: Изд-во МАИ, 1998. 376 с. ISBN 5-7035-1996-9.

20. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 690 с.

КОВАЛЁВ Владимир Захарович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор института нефти и газа Югорского государственного университета (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск.
SPIN-код: 4571-7212
AuthorID (РИНЦ): 345037
ORCID: 0000-0002-4512-6868
AuthorID (SCOPUS): 57206660845
ResearcherID: K-6022-2012
Адрес для переписки: vz_kovalev@mail.ru

ЩЕРБАКОВ Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент института нефти и газа ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.
SPIN-код: 9742-0660
AuthorID (РИНЦ): 485664
AuthorID (SCOPUS): 57211265015
Адрес для переписки: scherbacov@yandex.ru

АРХИПОВА Ольга Владимировна, старший преподаватель института нефти и газа ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.
SPIN-код: 1764-6163
AuthorID (РИНЦ): 637176
ORCID: 0000-0002-8773-8846
AuthorID (SCOPUS): 57211266487
ResearcherID: G-5205-2012
Адрес для переписки: arkh82@mail.ru

ЛАНГРАФ Сергей Владимирович, кандидат технических наук, руководитель сектора разработки встроенного ПО, ООО «НПФ Мехатроника-Про», г. Томск.
SPIN-код: 6451-6448
AuthorID (РИНЦ): 170885
AuthorID (SCOPUS): 14834355600
Адрес для переписки: sergeylgrf@gmail.com

БУНЬКОВ Дмитрий Сергеевич, инженер-программист АО «ЭлеСи», г. Томск.
AuthorID (SCOPUS): 57193768200
Адрес для переписки: bunkovds@tpu.ru

ЕСИН Станислав Сергеевич, ведущий инженер производственно-технического отдела, АО «ЮТЭК — Региональные сети», г. Ханты-Мансийск.
Адрес для переписки: esin.stanislav@bk.ru

Для цитирования

Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Архипова О. В., Лангграф С. В., Буньков Д. С., Есин С. С. Идентификация параметров математических моделей нелинейных компонентов электротехнических комплексов и систем при их глубоком взаимодействии // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 33—39. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-33-39.

Статья поступила в редакцию 28.10.2020 г.

© В. З. Ковалёв, А. Г. Щербаков, О. В. Архипова, С. В. Лангграф, Д. С. Буньков, С. С. Есин