

Научная статья

УДК 537.311.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>

Е.А. Бодренков¹ ✉, Н.В. Коровкин¹, Д.А. Селитреников²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ evgenii.bodrenkov@gmail.com

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТАВА МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕЕ ВХОДЕ

Аннотация. Приведена методика идентификации состава многокомпонентной нелинейной нагрузки с целью выявления в нагрузке типовых нелинейных элементов. Предложенный подход позволяет отделять линейную составляющую нагрузки от нелинейной и определять в нагрузке число нелинейных элементов каждого типа, при условии, что типы нелинейных нагрузок известны заранее. Полученная информация может использоваться при решении споров о причинении вреда оборудованию поставщика электроэнергии или потребителя при нарушении качества электроэнергии в сети. Идентификация проводится по измерениям на входе нагрузки, поэтому подход может быть использован для контроля нагрузки потребителя без вмешательства в его электрическую сеть. Исходными данными для идентификации являются гармонический состав входного тока нагрузки и характеристики нелинейных элементов. Идентификация осуществляется с использованием разложения гармонического состава входного тока по базису, состоящему из векторов входного тока различных типов нелинейной нагрузки. Приведена оценка погрешности метода при неточном измерении входного тока, а также при наличии в нагрузке нелинейных элементов с близкими вольтамперными характеристиками. Намечены возможности повышения селективности метода.

Ключевые слова: качество электроэнергии, нелинейная нагрузка, преобразование Фурье, спектральный анализ, гармоника, метод наименьших квадратов, электроэнергетика, ответственность.

Для цитирования:

Бодренков Е.А., Коровкин Н.В., Селитреников Д.А. Идентификация состава многоэлементной нелинейной нагрузки по измерениям тока и напряжения на ее входе // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 4. С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>*E.A. Bodrenkov*¹ ✉, *N.V. Korovkin*¹, *D.A. Selitrenikov*²¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;² St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia✉ evgenii.bodrenkov@gmail.com

IDENTIFICATION OF THE COMPOSITION OF MULTI-ELEMENT NON-LINEAR LOAD BY MEASURING THE CURRENT AND VOLTAGE AT ITS INPUT

Abstract. The paper presents an approach for identifying the composition of a multicomponent non-linear load with the aim of identifying its typical nonlinear elements. The proposed approach allows us to separate the linear component of the load from the nonlinear and determine the number of the non-linear elements of each type in the load given their types are known beforehand. The information obtained can be used in resolving disputes about damage caused to the equipment of the electricity supplier or the consumer in case of inappropriate power quality. The approach can be used to control the load of the consumer without interfering with their electrical facilities. Identification is based on measurements at the input of the load. The initial data are the harmonic composition of the input load current and information about the typical elements. The solution includes decomposing the harmonic composition of the input current based on the input current vectors of different types of nonlinear loads. We also estimated the method error for inaccurate measurement of the input current, as well as for the use of nonlinear elements with close current-voltage characteristics. We intend to find the possibilities of increasing the accuracy of the method.

Keywords: power quality, non-linear load, Fourier transform, spectral selectivity, harmonica, least-squares deviation method, electric-power engineering, liability.

Citation:

E.A. Bodrenkov, N.V. Korovkin, D.A. Selitrenikov, Identification of the composition of multi-element non-linear load by measuring the current and voltage at its input, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 19–29, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Одной из важных задач современной энергетики является повышение качества поставляемой электроэнергии (ЭЭ). Высшие гармоники тока и напряжения в сети могут представлять опасность для оборудования электроэнергетических сетей (ЭЭС), снижают эффективность его работы и срок безаварийной эксплуатации [1–4]. В большом числе случаев высшие гармоники тока и напряжения сети порождаются электроприёмниками с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Поэтому обнаружение таких приёмников и контроль уровня порождаемых ими помех имеет большое значение [5–7].

Ответственность за качество ЭЭ во многом ложится на поставщика. Современное российское законодательство не предусматривает непосредственной ответственности потребителя за качество электроэнергии в сети [8–11]. Поэтому в случае ухудшения качества поставляемой электроэнергии по вине потребителя, в частности, при порче оборудования другого потребителя, снабжающая организация может требовать возмещение ущерба, причиненного электрооборудованием абонента, только доказав вину последнего, что на практике вызывает большие трудности [12–16].

Предлагаемый в данной статье подход позволяет идентифицировать состав многоэлементной нагрузки. По измерениям в одном узле метод позволяет фиксировать подключение (отключение)

конкретных устройств в составе нагрузки, либо существенное изменение режима их работы без установки датчиков у каждого устройства.

Вариант решения данной задачи рассмотрен в [17]. В этой статье, являющейся основополагающей для нашего исследования, было предложено использовать дискретное преобразование Фурье для определения электроприёмников в составе нагрузки методом наложения. Нами предложен иной вариант декомпозиции входного тока, имеющий, по нашему мнению, ряд существенных преимуществ, где вместо метода перебора предполагается решать задачу методом наименьших квадратов.

Область применения и основные допущения

Предлагаемый в статье метод позволяет обнаруживать в составе нагрузки нелинейные устройства и определять их количество. Это может найти применение при разрешении споров, связанных с поставкой некачественной электроэнергии. Данный подход позволит зафиксировать факт применения потребителем устройств, снижающих качество электроэнергии в сети.

Подход может найти применение на автономных производственных линиях, где позволит оперативно обнаружить сбой на каком-либо участке. Также он может применяться для контроля работы оборудования в агрессивной среде, где установка датчиков непосредственно на оборудование может быть сложна либо затратна.

Будем исходить из достаточно общих и реализующихся, обычно, на практике предположений. Рассматривается сеть переменного тока (50 Гц). Сеть, от которой питается нагрузка, достаточно мощная и напряжение U на зажимах нагрузки можно считать синусоидальным, несмотря на то, что нагрузка нелинейна. Нагрузка состоит из несколько параллельно соединенных устройств как нелинейных, так и линейных, соединенных между собой проводниками с малым в сравнении с сопротивлением нагрузок сопротивлением. ВАХ всех нелинейных устройств, которые могут входить в нагрузку, предполагаются известными. Все измерения проводятся только в одном из узлов нагрузки. Далее мы будем предполагать для определенности, что это узел присоединения нагрузки к питающей сети, хотя это и не является обязательным.

Метод идентификации состава нагрузки

В соответствии со сделанными выше допущениями, потребитель ЭЭ (нагрузка), имеет некоторое количество устройств (электроприемников) разных типов. Все электроприемники подключены параллельно, сопротивление проводов не учитывается. В состав нагрузки входят как линейные устройства, схемы замещения которых содержат R , L , C элементы, так и пассивные (по отношению к питающей сети) нелинейные устройства: выпрямители, регуляторы напряжения, источники питания электронной аппаратуры и т.п. Количество n типов электроприёмников и их ВАХ известны заранее, но, при этом не предполагается, что в нагрузке одновременно присутствуют все типы устройств, однако возможно наличие нескольких устройств любого из типов. Предполагается также, что ВАХ всех устройств получены при синусоидальном напряжении с действующим значением U , равным напряжению питающей сети.

Задача стоит в определении состава нелинейной части нагрузки или, что то же самое, определения количеств подключенных нелинейных устройств каждого типа, а также определения эквивалентных параметров линейной части нагрузки. При этом, исходными данными являются входное напряжение и ток нагрузки.

Метод решения

В силу того, что сеть, от которой питается нагрузка, достаточно мощная, напряжение U на зажимах нагрузки можно считать синусоидальным. В соответствии сделанными выше допущениями, для электроприёмников, которые могут присутствовать в нагрузке, известны ВАХ. Зная ВАХ k -го электроприемника, можно расчетным путем или экспериментально определить постоянную

составляющую $I_{k,0}$ и комплексные амплитуды $\dot{I}_{k,q} q = \overline{1, m}$ гармоник тока устройства возникающих при его подключении к синусоидальному напряжению U [18]. Далее в качестве характеристики k -го устройства будем использовать вектор $\mathbf{I}_k = [I_{k,0}, \dot{I}_{k,1}, \dot{I}_{k,2}, \dots, \dot{I}_{k,m}]^T$.

Вектор тока, характеризующий s одинаковых параллельно включенных устройств, будет иметь вид $s\mathbf{I}_k$. Будем обозначать величины, относящиеся к линейной части нагрузки индексом L . Очевидно, что в векторе \mathbf{I}_L , составленном для любой линейной нагрузки $R + jX$, будет отличен от нуля только член, отвечающий за первую гармонику тока.

Пусть теперь нагрузка содержит неизвестное нам количество устройств, каждое из которых относится к одному из n заранее предопределенных типов *Type 1...Type n*, а также некоторую линейную составляющую, которую можно представить в виде комплексного сопротивления $R + jX$. (рис. 1). При напряжении U измерим постоянную составляющую и комплексные амплитуды входного тока $\mathbf{J}_S = [J_{S,0}, \dot{J}_{S,1}, \dots, \dot{J}_{S,m}]^T, m \geq n$.

Составим систему уравнений вида:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I_{0,1} & I_{0,2} & \dots & I_{0,n} \\ \dot{I}_{L,1} & \dot{I}_{1,1} & \dot{I}_{1,2} & \dots & \dot{I}_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dot{I}_{m,1} & \dot{I}_{m,2} & \dots & \dot{I}_{m,n} \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} S_L \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{S,0} \\ \dot{J}_{S,1} \\ \vdots \\ \dot{J}_{S,m} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_S}. \quad (1)$$

Решая (1), определим вектор \mathbf{S} , k -ый элемент которого даст количество электроприёмников k типа в составе нагрузки, что и является решением поставленной выше задачи. Что касается линейной части нагрузки, то для определения её параметров необходимо базисное значение $R + jX$, использованное при составлении первого столбца в матрице \mathbf{I} , разделить на S_L . Стоит упомянуть, что если член S_L имеет мнимую часть, это означает, что линейная часть нагрузки имеет угол φ отличный от данного параметра у элемента, принятого в качестве базисного. В общем случае R и X базисного элемента могут быть выбраны любыми, но, по мнению авторов, наиболее удобно использовать для этого активное сопротивление примерно такой же мощности, как базисные нелинейные элементы.

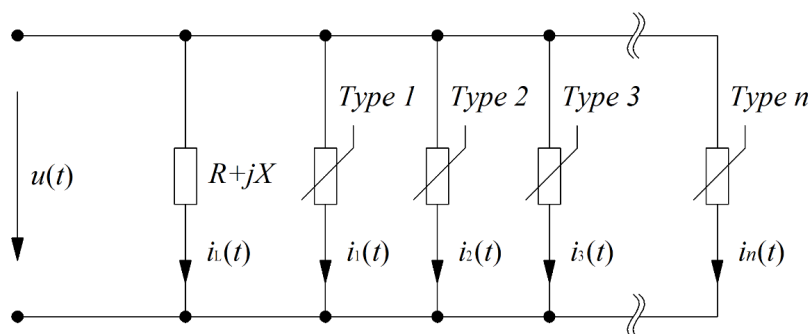


Рис. 1. Нагрузка, включающая эквивалентный линейный электроприемник – $R + jX$ и n нелинейных электроприемников различных типов

Fig. 1. Load, which includes an equivalent linear electric consumer – $R + jX$ and n non-linear electric consumers of various types

Селективность метода и обсуждение результатов

Оценим чувствительность метода к помехам в измерении входного тока. Рассмотрим нагрузку (далее, Нагрузка 1), состоящую из параллельно включенных:

- последовательные соединенных резистора (100 Ом) и диода с идеальной ВАХ – таких устройств в нагрузке два;
- нелинейного резистивного устройства с ВАХ $R_3(u) = 87.5(1 + 10^{-4}u^2)$ Ом, где u – мгновенное значение напряжения – такое устройство в нагрузке одно;
- идеального резистора с сопротивлением 200/3 Ом. В качестве базисного линейного сопротивления возьмем резистор сопротивлением 200 Ом.

Определим вектор \mathbf{J}_S , для этого мы измерим ток нагрузки (с помощью АЦП в 1024 точках на периоде промышленной частоты) и применим быстрое преобразование Фурье. Подключив устройства по очереди к напряжению $u(t) = U\sqrt{2} \sin \omega t$, определим $I_{k,0}$ и $I_{k,q}$, $q = \overline{1,7}$, $k = \overline{1,2}$ составим систему уравнений (1) для данной задачи:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0.445 & 0 \\ 0.707 & 0.701 & 0.707 \\ 0 & -0.3j & 0 \\ 0 & -1.84 \cdot 10^{-3} & 0.19 \\ 0 & -0.0598j & 0 \\ 0 & -1.05 \cdot 10^{-3} & 0.0508 \\ 0 & -0.0256j & 0 \\ 0 & -7.26 \cdot 10^{-4} & 0.0136 \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} S_L \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.89 \\ 4.23 + 0.026j \\ 7.39 \cdot 10^{-3} - 0.6j \\ 0.186 + 3.42 \cdot 10^{-3}j \\ 2.96 \cdot 10^{-3} - 0.119j \\ 0.0487 + 1.48 \cdot 10^{-3}j \\ 1.9 \cdot 10^{-3} - 0.0512j \\ 0.012 + 5.13 \cdot 10^{-4}j \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_S}. \quad (2)$$

Из (2), используя метод наименьших квадратов, найдем: $S_L = 3 + 0.02j$, $S_1 = 2 - 0.02j$, $S_2 = 1 + 0.02j$. Мнимая часть обусловлена погрешностью, связанной, в основном, с конечным числом точек в осциллограмме тока. Действительно, расчет при измерении тока нагрузки в 4096 точках дает: $S_L = 3 + 0.01j$, $S_1 = 2 - 0.006j$, $S_2 = 1 + 0.005j$. Таким образом, в составе нагрузки присутствуют два устройства типа 1, одно устройство типа 2 и линейное сопротивление $200/S_L = 200/3$ Ом, как и было задано.

Выполним исследование метода на устойчивость в погрешности измерения. Рассмотрим нагрузку с тем же составом электроприемников, что и выше (Нагрузка 1). К измеренным значениям входного тока в каждой из 1024 точек добавим величину $J_{S,1} \cdot \Delta \cdot \alpha$, где $\Delta \in [10^{-2}, 5 \cdot 10^{-1}]$ – уровень погрешности, а $J_{S,1} = 4.23$ А – амплитуда первой гармоник тока нагрузки, а α – равномерно распределенная на отрезке $[0,1]$ случайная величина. Уровень погрешности $\Delta = 5 \cdot 10^{-1}$ соответствует 50% уровню погрешности.

После этого определим, как это было описано выше вектор \mathbf{S} , возьмем действительную часть его значений и округлим до целых. Полученный таким образом вектор для элемента k -го типа обозначим $\bar{\mathbf{S}}(\Delta) = [\bar{S}_{k,1}(\Delta), \bar{S}_{k,2}(\Delta), \dots, \bar{S}_{k,m}(\Delta)]^T$. Выполним эти действия 10^3 раз при различных случайных α и для ряда значений уровня погрешности Δ и вычислим погрешность $\delta(k, \Delta)$ определения состава устройств из соотношения:

$$\delta(k, \Delta) = 10^{-3} \sum_{i=1}^{10^3} |\bar{S}_{k,i}(\Delta) - S_k| \cdot 100\%.$$

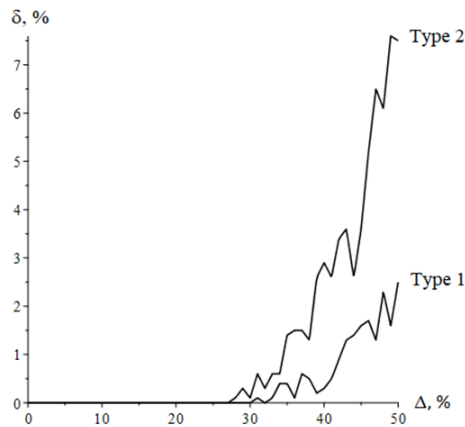


Рис. 2. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 1* и *Type 2* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 1 и Нагрузки 2
 Fig. 2. Identification error in the composition of the load of *Type 1* and *Type 2* electric receivers, depending on the noise amplitude for Load 1 and Load 2

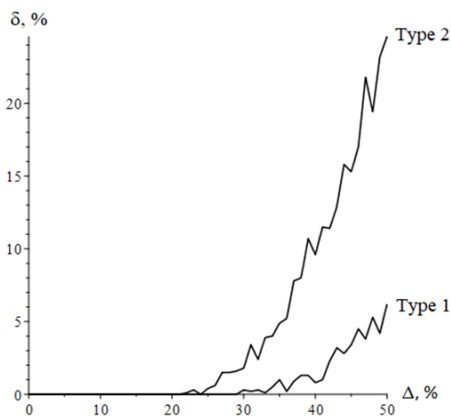


Рис. 3. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 1* и *Type 2* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 3
 Fig. 3. Identification error in the composition of the load of *Type 1* and *Type 2* electric receivers, depending on the noise amplitude for Load 3

После этого для каждого типа приёмников можем построить зависимость относительно погрешности $\delta(k, \Delta)$ определения числа устройств данного типа от уровня погрешности Δ измерения входного тока (рис. 2).

Результаты, представленные на рис. 2, показывают высокую устойчивость предложенного метода идентификации состава нагрузки к погрешности измерений. Действительно, до уровня погрешности $\Delta \sim 25\%$ погрешность в определении состава нагрузки отсутствует. Здесь важно, что уровень погрешности для современных измерительных систем составляет десятые доли процента.

Повторим проделанный опыт для нагрузки, имеющей по два приёмника каждого из перечисленных выше типов и включенное параллельно им линейное активное сопротивление 100 Ом (далее Нагрузка 2). Результаты этих расчетов полностью совпали с результатами расчетов для Нагрузки 1. Соответственно, можно сделать вывод о том, что погрешности метода слабо зависят и от состава приемников.

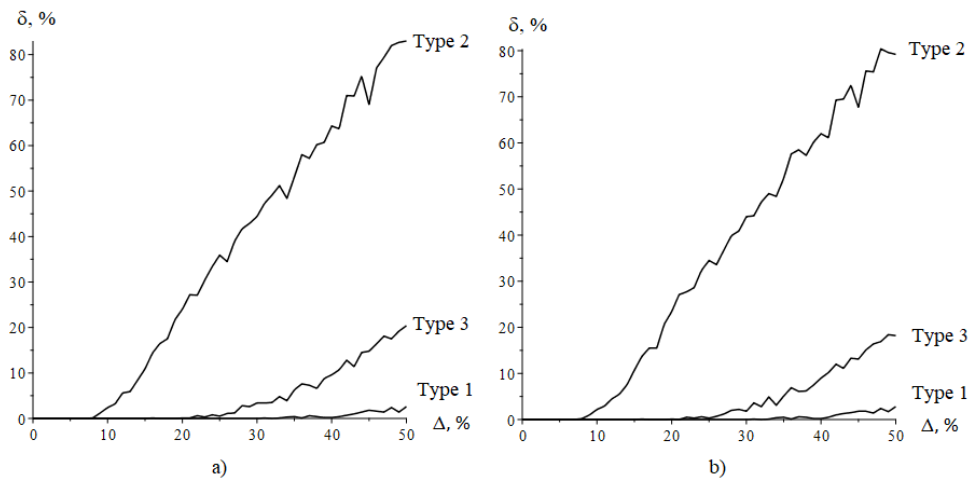


Рис. 4. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 1 – Type 3* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 4 для $m = 5$ а), и $m = 15$ – б), при числе точек измерения на периоде промышленной частоты $N = 1024$

Fig. 4. Identification error in the composition of the load of *Type 1 – Type 3* electrical receivers, depending on the noise amplitude for Load 4 for $m = 5$ а), and $m = 15$ – б), with the number of measurement points at the industrial frequency period $N = 1024$

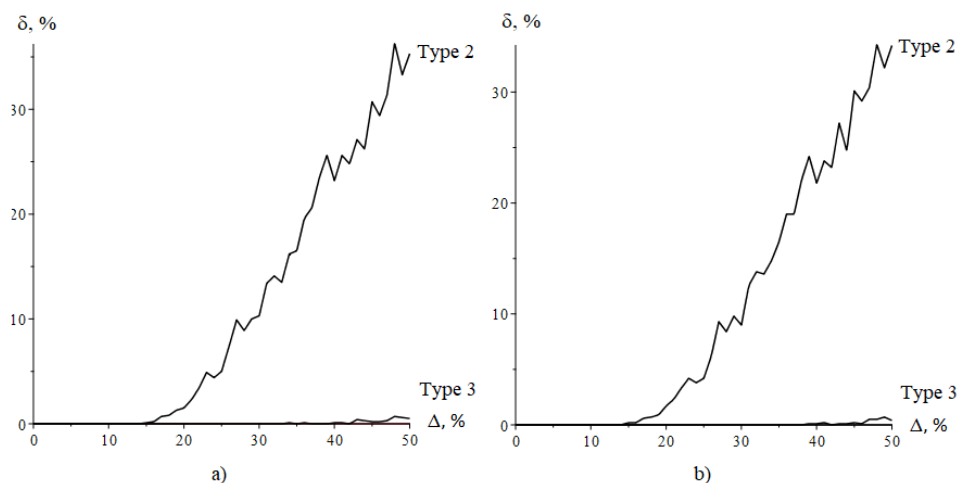


Рис. 5. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 2* и *Type 3* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 4 для $m = 5$ а), и $m = 15$ – б), при числе точек измерения на периоде промышленной частоты $N = 4096$

Fig. 5. Identification error in the composition of the load of *Type 2* and *Type 3* electric receivers, depending on the noise amplitude for Load 4 for $m = 5$ а), and $m = 15$ – б), with the number of measurement points at the industrial frequency period $N = 4096$

Покажем, что решение может также быть получено для активно-реактивной нагрузки. Возьмем два устройства типа 1, одно устройство типа 2, а вместо линейного активного сопротивления, возьмем последовательное соединение активного сопротивления $170/3$ Ом и индуктивности 30 мГн (далее Нагрузка 3). Получим новый вектор \mathbf{J}_S и подставим его в (2). Точное решение для S_L будет $3.43 - 0.57j$. Зависимость $\delta(k, \Delta)$ от Δ показана на рис. 3.

Рассмотрим далее, как число учитываемых гармоник влияет на точность идентификации состава нагрузки. Возьмем активное сопротивление $200/3$ Ом, одно устройства типа 1 и два резистивных нелинейных элемента: $R_2(u) = 127.3(1 + 4 \cdot 10^{-5}u^2)$ – тип 2 и $R_3(u) = 618(1 - 4 \cdot 10^{-5}u^2)$ – тип 3. ВАХ этих устройств ближе к линейной, чем у нелинейного элемента из предыдущего при-

мера (далее Нагрузка 4). Число точек N измерения на периоде промышленной частоты, в которых выполняется измерение тока, в данной задаче 1024. Зависимости $\delta(k, \Delta)$ от Δ при $m = 5$ и $m = 15$ для Нагрузки 4 показаны на рис. 4а и б. Как можно видеть, эти зависимости идентичны, то есть существенное увеличение m не повлияло на точность идентификации. Однако, если уменьшить количество гармоник до 4, решение получено не будет и при нулевом уровне шума.

Рассмотрим далее, как число точек, в которых выполняется измерение тока, влияет на точность идентификации состава нагрузки. Для этой же нагрузки проведем измерение тока в 4096 точках, то есть увеличим число точек в 4 раза. На рис. 5а и б показаны зависимости $\delta(k, \Delta)$ от Δ для нового числа точек (как и ранее, $m = 5$ и $m = 15$). Увеличение числа точек в осциллограмме тока позволяет значительно повысить точность идентификации состава нагрузки. При этом погрешность в определении числа устройств второго типа при уровне погрешности данных до 50% – нулевая.

Обсуждение результатов и выводы

Предложенный метод позволяет определить состав нагрузки потребителя за один период промышленной частоты. Соответственно метод позволяет вести непрерывный мониторинг состава нагрузки. Использование в расчетах входного тока и напряжения позволяет избежать установки измерительных приборов на территории потребителя.

Чувствительность метода к помехам слабо зависит от выбора базисных элементов, а также от точности измерения входного тока. Так, сравнивая рис. 4а и 5а, можно заметить, что увеличения числа N точек измерения входного тока на периоде позволило увеличить Δ начала роста погрешности $\delta(k, \Delta)$ для приёмника типа 2 примерно в два раза (с 8 до 16%). При этом в обоих случаях величина погрешности оставалась приемлемой для практики. Значение δ для этого типа электроприёмника при $\Delta = 50\%$ снизилось с 80 до 35.

Увеличение числа рассматриваемых гармоник входного тока не приводит к существенному улучшению точности измерений. В частности, рис. 4 и 5 показывают, что зависимости $\delta(k, \Delta)$ от Δ становятся отличными от нуля примерно при одном и том же значении Δ для каждого типа электроприёмников и достигает примерно одного и того же значения при $\Delta = 50\%$ при рассмотрении 5 или 15 гармоник входного тока.

Области эффективного применения метода, по мнению авторов, лежат в индикации работы отдельных электроприёмников в составе нагрузки в том случае, если это затруднительно сделать иным способом. Также метод может найти применение для контроля состава нагрузки потребителя для предотвращения использования опасных для сети типов нагрузки и разрешения споров, связанных с порчей имущества потребителей при нарушении качества поставляемой электроэнергии.

Особая благодарность

Выражаем благодарность и особую признательность РФФИ за поддержку по договору № 19-38-90316.

Научный проект № 19-38-90316 "Разработка методов управления активно-адаптивными сетями на основе оценки актуального состояния ЭЭС"

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Осинцев К.В., Алюков С.В. Математическое моделирование разрывных газодинамических течений с применением нового метода аппроксимации // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 38–52. DOI: 10.18721/JEST.26204

[2] **Абед С.А., Аль Дражи Д.Ф., Бахрами М.Р.** Гармонический анализ роторно-подшипниковой системы с единичной трещиной // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 139–152. DOI: 10.18721/JEST.240312

[3] **Solovyeva E.** A split signal polynomial as a model of an impulse noise filter for speech signal recovery // Journal of Physics: Conf. e Series (JPCS). Int. Conf. on Information Technologies in Business and Industry 2016, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation – 2017.– Vol. 803, no. 1 – 012156, pp. 1–6.

[4] **Костин В.Н., Сериков В.А.** Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 1. С. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102

[5] Технология локализации источников помех в энергосистемах Коровкин Н.В., Лысенко Г.С. 2013 Известия российской академии наук. Энергетика, с. 121–130.

[6] **Adalev A.S., Hayakawa M., Korovkin N.V.** Identification of electric circuits: Problems and methods of solution accuracy enhancement 2005 Proceedings – IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems 1464754, с. 980–983.

[7] Analysis of power line communication networks using a new approach based on scattering parameters matrix Issa F, Sartenaer T, Marthe E., (...), Duteau S., Pasaud A. 2002 IEEE Int. Symp. EMC, 90, с. 1043–104.

[8] Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник / Сысун В.И., Олещук О.В., Соболев Н.В., Тихомирова А.А. // 2019 Международный научно-исследовательский журнал, № 2 (80), с. 20–23.

[9] **P. Jonke, M. Makoschitz, S. Biswas, J. Stöckl, H. Ertl.** "Analysis and Verification of a Cascaded Advanced AC-Simulator with Non-Linear Loads," 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265769

[10] **de Oliveira T.L., Moreira L.F., Carvalho T.C.O., Xavier W.D.M., Ribeiro P.F.** "Microcontroller implementation for monitoring time-varying harmonics from non-linear loads," 2016 17th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016, pp. 896–902. DOI: 10.1109/ICHQP.2016.7783377

[11] **Gritsutenko S., Korovkin N.** (2018). Applicability of a Fast Fourier Transform for a harmonic analysis. MATEC Web of Conferences. 245.10004.10.1051/mateconf/ 201824510004

[12] **Belany P., Bolf A., Novak M., Roch M.** "The Impact of Small Non-linear Load Operation on Accuracy of the Intelligent Measurement System," 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), 2018, pp. 0247–0252. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559679

[13] **Kumar N., Kumar A.** "Analysis of distribution tariff structures in the presence of non-linear load", 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/POWERI.2018.8704359

[14] **Kamel K., Laid Z., Abdallah K.** "Mitigation Of Harmonics Current Using Different Control Algorithms Of Shunt Active Power Filter For Non-Linear Loads", 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICASS.2018.8652066

[15] **Adalev A.S., Korovkin N.V., Hayakawa M.** Identification of electric circuits de-scribed by illconditioned mathematical models 2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 53 (1), с. 78–91.

[16] **Chen C., Chu C.** "A Novel Computational Model for Non-Linear Divisible Loads on a Linear Network," in IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 1, pp. 53–65, 1 Jan. 2016. DOI: 10.1109/TC.2015.2419654

[17] Идентификация RLC параметров заземляющих устройств опор воздушных линий с тросом импульсным методом / Кривошеев С.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Нетреба К.И., Шишигин С.Л. // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. № 1 (1). С. 26–32.

[18] **Насырова О.А., Тульский В.Н.** Применение преобразования Фурье для определения состава электроприемников, вносящих искажение в форму кривой тока. Электричество, 2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОДРЕНКОВ Евгений Александрович – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: evgenii.bodrenkov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1719-5222>

КОРОВКИН Николай Владимирович – заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

СЕЛИТРЕНИКОВ Дмитрий Алексеевич – студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

E-mail: dm.selitrenikov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0992-6398>

REFERENCES

- [1] **K.V. Osintsev, S.V. Alyukov**, Matematicheskoye modelirovaniye razryvnykh gazo-dinamicheskikh techeniy s primeneniyyem novogo metoda approksimatsii // Materialovedeniye. Energetika. 2020. T. 26, № 2. S. 38–52. DOI: 10.18721/JEST.26204
- [2] **S.A. Abed, D.F. Al Drazhi, M.R. Bakhrami**, Garmonicheskiy analiz rotorno-podshipnikovoy sistemy s yedinichnoy treshchinoy // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. S. 139–152. DOI: 10.18721/JEST.240312
- [3] **E. Solovyeva**, A split signal polynomial as a model of an impulse noise filter for speech signal recovery // Journal of Physics: Conf. e Series (JPCS). Int. Conf. on Information Technologies in Business and Industry 2016, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation – 2017. – Vol. 803, no. 1 – 012156, pp. 1–6.
- [4] **V.N. Kostin, V.A. Serikov**, Kompyuternoye modelirovaniye rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya s nelineynoy nagruzkoy // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2019. T. 25, № 1. S. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102
- [5] Tekhnologiya lokalizatsii istochnikov pomekh v energosistemakh Korovkin N.V., Lysenko G.S. 2013 Izvestiya rossiysskoy akademii nauk. Energetika, s. 121–130.
- [6] **A.S. Adalev, M. Hayakawa, N.V. Korovkin**, Identification of electric circuits: Problems and methods of solution accuracy enhancement 2005 Proceedings – IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems 1464754, s. 980–983.
- [7] Analysis of power line communication networks using a new approach based on scattering parameters matrix Issa F., Sartenaer T., Marthe E., (...), Duteau S., Pacaud A. 2002 IEEE Int. Symp. EMC, 90, s. 1043–104.
- [8] Otsenka vklada nelineynoy nagruзки v vysshie garmoniki napryazheniya seti pri nalichii v pitayushchem napryazhenii vysshikh garmonik Sysun V.I., Oleshchuk O.V., Sobolev N.V., Tikhomirova A.A. 2019 Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal, № 2 (80), С. 20–23.
- [9] **P. Jonke, M. Makoschitz, S. Biswas, J. Stöckl, H. Ertl**, "Analysis and Verification of a Cascaded Advanced AC-Simulator with Non-Linear Loads," 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265769
- [10] **T.L. de Oliveira, L.F. Moreira, T.C.O. Carvalho, W.D.M. Xavier, P.F. Ribeiro**, "Microcontroller implementation for monitoring time-varying harmonics from non-linear loads," 2016 17th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016, pp. 896–902. DOI: 10.1109/ICHQP.2016.7783377
- [11] **S. Gritsutenko, N. Korovkin**, (2018). Applicability of a Fast Fourier Transform for a harmonic analysis. MATEC Web of Conferences. 245.10004.10.1051/mateconf/ 201824510004

- [12] **P. Belany, A. Bolf, M. Novak, M. Roch**, "The Impact of Small Non-linear Load Operation on Accuracy of the Intelligent Measurement System," 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), 2018, pp. 0247–0252. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559679
- [13] **N. Kumar, A. Kumar**, "Analysis of distribution tariff structures in the presence of non-linear load," 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/POWERI.2018.8704359
- [14] **K. Kamel, Z. Laid, K. Abdallah**, "Mitigation Of Harmonics Current Using Different Control Algorithms Of Shunt Active Power Filter For Non-Linear Loads," 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICASS.2018.8652066
- [15] **A.S. Adalev, N.V. Korovkin, M. Hayakawa**, Identification of electric circuits described by illconditioned mathematical models 2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 53 (1), s. 78–91.
- [16] **C. Chen, C. Chu**, "A Novel Computational Model for Non-Linear Divisible Loads on a Linear Network," in IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 1, pp. 53–65, 1 Jan. 2016. DOI: 10.1109/TC.2015.2419654
- [17] Identifikatsiya RLC parametrov zzemlyayushchikh ustroystv opor vozdushnykh liniy s trosom impulsnym metodom Krivosheyev S.I., Bocharov Yu.N., Korovkin N.V., Natreba K.I., Shishigin S.L. Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2010. № 1 (1). S. 26–32.
- [18] **O.A. Nasyrova, V.N. Tulskiy**, Primeneniye preobrazovaniya Furye dlya opredeleniya sostava elektropriyemnikov, vnosyashchikh iskazheniye v formu krivoy toka. Elektrichestvo, 2019.

THE AUTHORS

BODRENKOV Evgeniy A. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: evgenii.bodrenkov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1719-5222>

KOROVKIN Nikolay V. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

SELITRENIKOV Dmitriy A. — *St. Petersburg Electrotechnical University "LETI".*
E-mail: dm.selitrenikov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0992-6398>

Статья поступила в редакцию 07.07.2021; одобрена после рецензирования 12.07.2021; принята к публикации 23.08.2021.

The article was submitted 07.07.2021; approved after reviewing 12.07.2021; accepted for publication 23.08.2021.