

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2752765

СПОСОБ ОЦЕНКИ ВКЛАДА НЕЛИНЕЙНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Шклярский Ярослав Элиевич (RU), Скамьин Александр Николаевич (RU), Добуш Юлия Владимировна (RU), Шпенст Вадим Анатольевич (RU)*

Заявка № 2020140768

Приоритет изобретения 10 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 03 августа 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 10 декабря 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01R 23/20 (2021.05)

(21)(22) Заявка: 2020140768, 10.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.12.2020

Дата регистрации:
03.08.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.12.2020

(45) Опубликовано: 03.08.2021 Бюл. № 22

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2,
Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Шклярский Ярослав Элиевич (RU),
Скамьин Александр Николаевич (RU),
Добуш Юлия Владимировна (RU),
Шпенст Вадим Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет» (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете

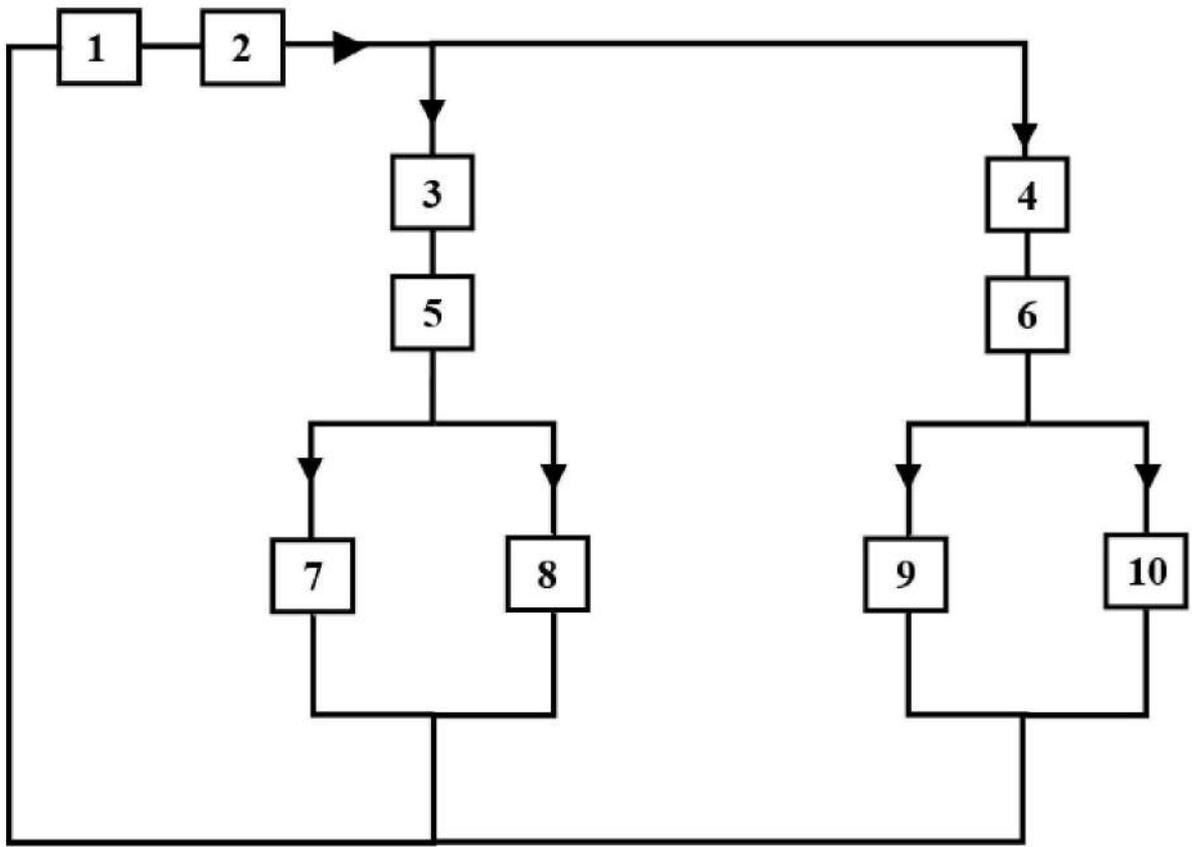
о поиске: RU 2364875 C1, 20.08.2009. RU
2236016 C2, 10.09.2004. RU 2627195 C1,
03.08.2017. CN 110320407 A, 11.10.2019. WO
2009028763 A1, 05.03.2009. WO 1994011744 A1,
26.05.1994. CN 105866585 B, 11.12.2018.

(54) СПОСОБ ОЦЕНКИ ВКЛАДА НЕЛИНЕЙНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электроэнергетики, в частности к способам определения влияния нелинейных потребителей электроэнергии на несинусоидальность напряжения в точке общего присоединения (ТОП). Сущность: измеряют амплитуды и фазы токов высших гармоник потребителей, подключенных к узлу общего присоединения, и амплитуды и фазы токов высших гармоник системы электроснабжения. На основании измеренных данных для каждой гармоники

отдельно для всех потребителей рассчитывают вклад потребителя в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения как отношение проекции вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники системы электроснабжения к току высшей гармоники системы электроснабжения по соответствующей формуле. Технический результат: оценка вклада каждого потребителя электроэнергии в искажения напряжения в ТОП в процентном соотношении. 2 ил.



Фиг. 1

RU 2752765 C1

RU 2752765 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11)**2 752 765**⁽¹³⁾ **C1**(51) Int. Cl.
G01R 23/20 (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(52) CPC
G01R 23/20 (2021.05)(21)(22) Application: **2020140768, 10.12.2020**(24) Effective date for property rights:
10.12.2020Registration date:
03.08.2021

Priority:

(22) Date of filing: **10.12.2020**(45) Date of publication: **03.08.2021 Bull. № 22**

Mail address:

**199106, Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, d. 2,
Patentno-litsenziionnyj otdel**

(72) Inventor(s):

**Shkliarskii Iaroslav Elievich (RU),
Skamin Aleksandr Nikolaevich (RU),
Dobush Iuliia Vladimirovna (RU),
Shpenst Vadim Anatolevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia «Sankt-Peterburgskii gornyi
universitet» (RU)**(54) **METHOD FOR ESTIMATING CONTRIBUTION OF NONLINEAR CONSUMERS TO VOLTAGE DISTORTION AT POINT OF COMMON CONNECTION**

(57) Abstract:

FIELD: power distribution.

SUBSTANCE: invention relates to the field of electric power engineering, in particular to methods for determining the influence of nonlinear electric power consumers on the non-sinusoidal voltage at the point of common connection (PCC). The amplitudes and phases of the currents of the higher harmonics of consumers connected to the general connection node, and the amplitudes and phases of the currents of the higher harmonics of the power supply system are measured. Based on the measured data for each harmonic separately for all consumers, the consumer's

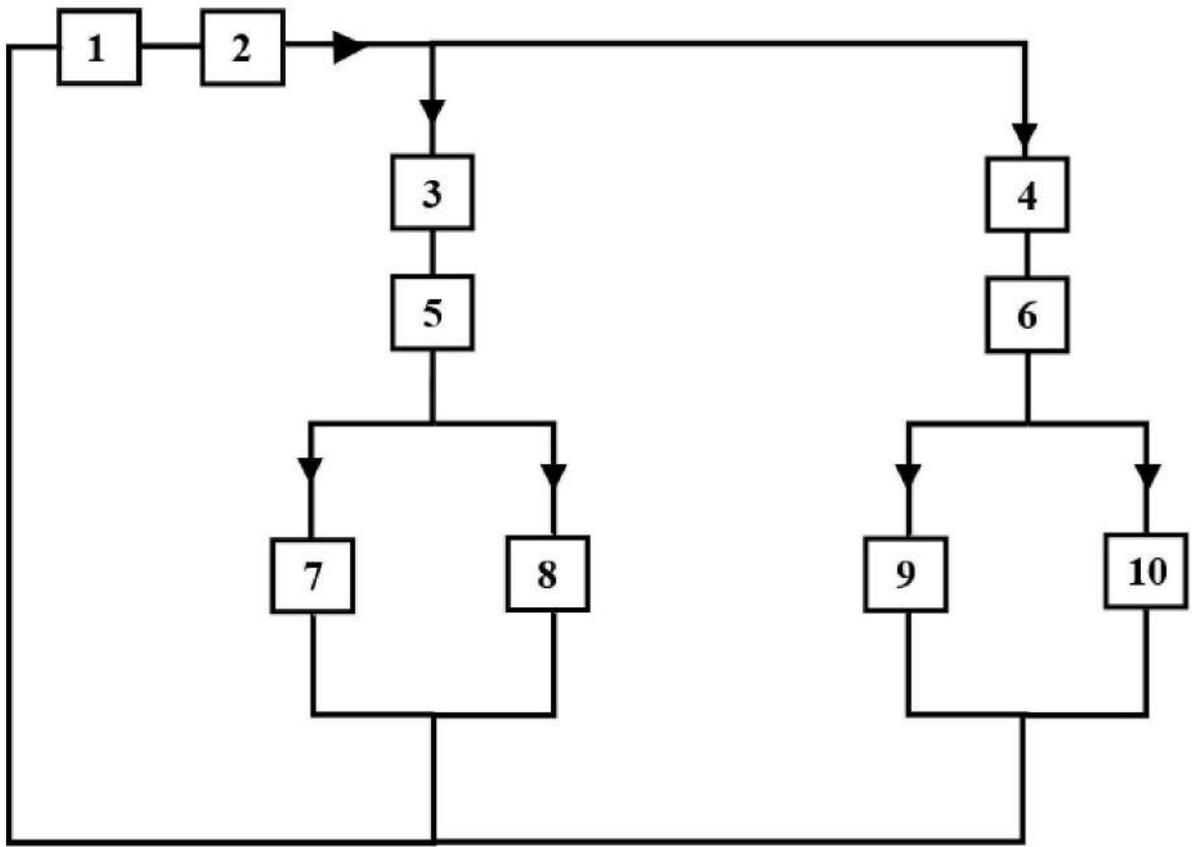
contribution to the distortion of voltage and current at the point of common connection is calculated as the ratio of the projection of the current vector of the consumer's higher harmonic on the current vector of the higher harmonic of the power supply system to the current of the higher harmonic of the power supply system according to the corresponding formula.

EFFECT: assessment of the contribution of each electricity consumer to voltage distortions in the PCC as a percentage ratio.

1 cl, 2 dwg

RU 2 752 765 C1

RU 2 752 765 C1



Фиг. 1

RU 2752765 C1 2752765 C1

RU 2752765 C1

Изобретение относится к области электроэнергетики, в частности к способам определения влияния нелинейных потребителей электроэнергии на несинусоидальность напряжения в точке общего присоединения (ТОП). Данное изобретение может быть использовано для регулирования коммерческих отношений между поставщиком
5 электроэнергии и потребителями в вопросе оценки вклада каждого из потребителей в ухудшения качества напряжения в ТОП в процентном соотношении.

Известен способ определения потребителя, искажающего показатели качества электрической энергии в узле энергоснабжающей организации, и его вклада в искажение (патент РФ № 2244313, опубл. 10.01.2005). Данный способ предполагает расчет
10 сопротивлений неискажающих нагрузок и расчет токов искажений искажающих нагрузок каждого потребителя. После чего полученные значения токов соотносят с суммарными значениями.

Недостатком способа является тот факт, что за суммарное значение токов искажений авторы принимают алгебраическую сумму токов потребителей, аргументируя это тем,
15 что такое допущение не повлияет на значение долевых вкладов. Однако очевидно, что векторная сумма токов будет значительно отличаться от алгебраической, так как взаимное расположение векторов токов каждой из ветвей может быть любым.

Известен способ определения долевых частей нагрузки и энергосистемы в изменении качества напряжения (патент РФ № 2307364, опубл. 27.09.2007), который включает
20 измерение и определение интегральных составляющих аномальных напряжений ветвей с ЭДС и аномальных составляющих токов ветвей нагрузки, на основе чего рассчитываются долевые участия каждого энергообъекта.

Недостатком способа является значительное количество исходных данных, касающихся как системы электроснабжения (мгновенные значения ЭДС системы), так
25 и потребителей (индуктивность L). Для корректной оценки долевых частей каждого энергообъекта необходимо постоянно определять вышеуказанные величины.

Известен способ выявления фактического вклада субъектов электрических сетей в искажение качества электрической энергии в точке общего присоединения в электрической сети (патент РФ № 2364875, опубл. 20.08.2009). Согласно данному
30 способу, вклад каждого субъекта энергосистемы определяется на основании действующего значения напряжения обратной волны, при этом напряжение каждой гармоники в ТОП разлагают на составляющие прямой и обратной волн при помощи Т-преобразования.

Недостатками является необходимость определения в реальном времени волнового
35 сопротивления сети на каждой гармонике, так как его значение непрерывно меняется и зависит от режима работы каждого из субъектов энергосистемы.

Известен способ выявления источника высших гармоник (патент РФ № 2573706, опубл. 27.01.2016), в котором источник высших гармоник определяется по зависимости
40 тока высших гармоник системы электроснабжения от активного сопротивления фильтрокомпенсирующего устройства, установленного параллельно одной из нагрузок.

Недостатком способа является то, что данный способ позволяет лишь определить, является ли источником искажения потребитель или система электроснабжения, но не позволяет оценить вклад каждого из них в общие искажения в процентном соотношении.

Известен способ оценки влияния потребителя на искажение напряжения в точке
45 общего присоединения (патент РФ № 2627195, опубл. 03.08.2017), который включает определение параметров автономного напряжения для каждого потребителя в отдельности, расчет коэффициента его влияния на искажения напряжения и сравнение расчетных параметров с допустимыми.

Недостатком способа является необходимость расчета параметров схемы замещения, таких как проводимость каждого потребителя, что вносит дополнительную погрешность в окончательный результат. Авторы отмечают, что относительная погрешность определения параметров схемы замещения при использовании предлагаемого способа не превышает 7%, что является значительной величиной. Кроме того, в результате определяется не вклад потребителя в общие искажения, а лишь сравнивается его влияние с допустимой величиной и делается вывод о допустимости или недопустимости такого режима работы потребителя.

Известен способ является способ определения фактического вклада источников искажений в значения показателей качества электроэнергии в точке общего присоединения (патент РФ № 2236016, опубл. 10.09.2004) принятый за прототип. Фактический вклад каждого субъекта-источника искажений считается прямо пропорциональным проекции тока субъекта-источника искажений на суммарный ток всех субъектов-источников искажений.

Недостатком способа является то, что все субъекты делятся на источники и потребители искажений, в то время как в реальных энергетических системах большинство потребителей представляют собой набор различных линейных и нелинейных нагрузок. Такие нагрузки, согласно данному способу, результируются в исключительно в субъект-источник или субъект-потребитель. В таком случае упускается вклад субъектов-потребителей искажений, в то время как они также содержат источники высших гармоник. Кроме того, принадлежность субъекта к источникам или потребителям искажений определяется по фазовым углам сдвига между напряжением искажений и соответствующим током высших гармоник. Иными словами - по знаку мощности искажения на каждой из гармоник. Однако напряжение искажения в узле электрической сети является результатом совместной работы всех источников искажения, подключенных к ТОП. При существенном расхождении по фазе между токами искажения потребителей один или несколько искажающих потребителей будут иметь положительные мощности искажения и восприниматься как неискажающие.

Техническим результатом является точная оценка вклада каждого потребителя электроэнергии в искажения напряжения и тока в ТОП в процентном соотношении.

Технический результат достигается тем, что измеряют амплитуды и фазы токов высших гармоник системы электроснабжения, на основании измеренных данных для каждой гармоники отдельно для всех потребителей рассчитывают вклад потребителя в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения как отношение проекции вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники системы электроснабжения к току высшей гармоники системы электроснабжения по формуле

$$K_{Dn}^{(h)} = \frac{I_n^{(h)} \cos \varphi_{n0}^{(h)}}{I_0^{(h)}}$$

где, $K_{Dn}^{(h)}$ - вклад n -ого потребителя в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения на гармонике h ,

$I_n^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h n -ого потребителя,

$\cos \varphi_{n0}^{(h)}$ - косинус угла между фазой вектора тока высшей гармоники n -ого потребителя и вектора тока высшей гармоники системы электроснабжения,

$I_0^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h системы электроснабжения, затем производят сравнение рассчитанных вкладов потребителей в искажение напряжения

и тока в точке общего присоединения на гармонике h и производят компенсацию токов высших гармоник потребителей с наибольшими вкладами.

Способ поясняется следующими фигурами:

5 фиг. 1 - схема замещения двух потребителей, подключенных к одной системе электроснабжения;

фиг. 2 - зависимость вклада потребителя в искажения напряжения в ТОП от процента генерируемого тока по отношению к общему генерируемому току в системе, и от процента мощности потребителя по отношению к общей мощности потребителей в системе;

- 10 1 - комплексное сопротивление СЭС;
 2 - измеритель тока СЭС;
 3 - измеритель тока первого потребителя;
 4 - измеритель тока второго потребителя;
 5 - комплексное сопротивление первой линии;
 15 6 - комплексное сопротивление второй линии;
 7 - нелинейная нагрузка первого потребителя;
 8 - линейная нагрузка первого потребителя;
 9 - нелинейная нагрузка второго потребителя;
 10 - линейная нагрузка второго потребителя.

20 Способ осуществляется следующим образом. В энергетической системе рассматриваемой на каждой гармонике h в отдельности устанавливается измеритель тока СЭС 2, определяющий амплитуды и фазы токов высших гармоник СЭС, протекающих по комплексному сопротивлению СЭС1, устанавливается измеритель тока первого потребителя 3, определяющий амплитуды и фазы токов высших гармоник,
 25 протекающих по комплексному сопротивлению первой линии 5, устанавливается измеритель тока второго потребителя 4, определяющий амплитуды и фазы токов высших гармоник, протекающих по комплексному сопротивлению второй линии 6. нелинейной нагрузки первого потребителя 7.

30 При отклонении качества электрической энергии в точке общего присоединения от установленных стандартами норм выполняются следующие действия.

Для каждой гармоники h рассчитываются углы между векторами токов потребителей и токов СЭС по формулам (1) и (2):

$$\varphi_{10}^{(h)} = \psi_1^{(h)} - \psi_0^{(h)} \quad (1)$$

$$35 \quad \varphi_{20}^{(h)} = \psi_2^{(h)} - \psi_0^{(h)} \quad (2)$$

где

40 $\psi_1^{(h)}$ - фаза вектора тока гармоники h , определенная измерителем тока первого потребителя 3;

$\psi_2^{(h)}$ - фаза вектора тока гармоники h , определенная измерителем тока второго потребителя 4;

$\psi_0^{(h)}$ - фаза вектора тока гармоники h , определенная измерителем тока СЭС 2;

45 $\varphi_{10}^{(h)}$ - угол между фазами $\psi_1^{(h)}$ и $\psi_0^{(h)}$;

$\varphi_{20}^{(h)}$ - угол между фазами $\psi_2^{(h)}$ и $\psi_0^{(h)}$.

Затем для каждой гармоники h рассчитываются проекции векторов токов

потребителей на вектор тока СЭС по формулам (3) и (4):

$$I_{1pr}^{(h)} = I_1^{(h)} \cos \varphi_{10}^{(h)} \quad (3)$$

$$I_{2pr}^{(h)} = I_2^{(h)} \cos \varphi_{20}^{(h)} \quad (4)$$

где

$I_1^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h , определенная измерителем тока первого потребителя 3;

$I_2^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h , определенная измерителем тока второго потребителя 4;

$I_0^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h , определенная измерителем тока СЭС 2;

$I_{1pr}^{(h)}$ - проекция амплитуды вектора $I_1^{(h)}$ на амплитуду вектора $I_0^{(h)}$;

$I_{2pr}^{(h)}$ - проекция амплитуды вектора $I_2^{(h)}$ на амплитуду вектора $I_0^{(h)}$;

Далее рассчитывается вклад каждого потребителя в искажения тока и напряжения в ТОП по выражению (5):

$$K_{Dn}^{(h)} = \frac{I_n^{(h)} \cos \varphi_{n0}^{(h)}}{I_0^{(h)}} \quad (5)$$

где:

$K_{Dn}^{(h)}$ - вклад n -ого потребителя в искажение напряжения и тока в ТОП на гармонике h ;

$I_n^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h n -ого потребителя;

$\varphi_{n0}^{(h)}$ - угол между фазами вектора тока гармоники h n -ого потребителя $\psi_n^{(h)}$ и $\psi_0^{(h)}$.

Обоснованность использования данного подхода подтверждается следующим. Из схемы на фиг. 1 видно, что несинусоидальное напряжение сети \dot{U}_0 пропорционально векторной сумме токов первого и второго потребителя при условии постоянства сопротивления сети Z_0 по формуле (6):

$$\dot{U}_0^{(h)} = \dot{i}_0^{(h)} \cdot Z_0^{(h)} = (\dot{i}_1^{(h)} + \dot{i}_2^{(h)}) \cdot Z_0^{(h)} \quad (6)$$

где

$\dot{U}_0^{(h)}$ - напряжение гармоники h в ТОП;

$Z_0^{(h)}$ - величина комплексного сопротивления СЭС 1.

В ходе аналитического определения токов $I_0^{(h)}$, $I_1^{(h)}$, $I_2^{(h)}$ использовались следующие коэффициенты (7-11), характеризующие структуру рассматриваемой системы электроснабжения:

$$\dot{A} = \frac{n_1^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \quad (7)$$

$$\dot{B} = \frac{n_2^{(h)}}{(n_{10}^{(h)} + n_1^{(h)} + 1) \cdot (n_{20}^{(h)} + n_2^{(h)} + 1) - 1} \quad (8)$$

$$\dot{C} = \frac{\dot{n}_1^{(h)} \cdot \dot{n}_2^{(h)}}{(\dot{n}_{10}^{(h)} + \dot{n}_1^{(h)} + 1) \cdot (\dot{n}_{20}^{(h)} + \dot{n}_2^{(h)} + 1) - 1} \quad (9)$$

$$\dot{C}_1 = - \frac{\dot{n}_1^{(h)} \cdot \dot{n}_{20}^{(h)}}{(\dot{n}_{10}^{(h)} + \dot{n}_1^{(h)} + 1) \cdot (\dot{n}_{20}^{(h)} + \dot{n}_2^{(h)} + 1) - 1} \quad (10)$$

$$\dot{C}_2 = - \frac{\dot{n}_2^{(h)} \cdot \dot{n}_{10}^{(h)}}{(\dot{n}_{10}^{(h)} + \dot{n}_1^{(h)} + 1) \cdot (\dot{n}_{20}^{(h)} + \dot{n}_2^{(h)} + 1) - 1} \quad (11)$$

где

$\dot{n}_1^{(h)}$ - коэффициент, показывающий во сколько раз комплексное сопротивление линейной нагрузки первого потребителя 8 больше комплексного сопротивления СЭС на гармонике h ;

$\dot{n}_2^{(h)}$ - коэффициент, показывающий во сколько раз комплексное сопротивление линейной нагрузки второго потребителя 10 больше комплексного сопротивления СЭС на гармонике h ;

$\dot{n}_{10}^{(h)}$ - коэффициент, показывающий во сколько раз комплексное сопротивление первой линии 5 больше комплексного сопротивления СЭС на гармонике h ;

$\dot{n}_{20}^{(h)}$ - коэффициент, показывающий во сколько раз комплексное сопротивление второй линии 6 больше комплексного сопротивления СЭС на гармонике h ;

Тогда выражения для тока, протекающего в линии системы электроснабжения (12), и токов первого (13) и второго (14) потребителя принимают следующий вид:

$$\dot{i}_0^{(h)} = \dot{C} \cdot (\dot{i}_{1nl}^{(h)} + \dot{i}_{2nl}^{(h)}) + \dot{C}_1 \cdot \dot{i}_{1nl}^{(h)} + \dot{C}_2 \cdot \dot{i}_{2nl}^{(h)} \quad (12)$$

$$\dot{i}_1^{(h)} = \dot{C} \cdot \dot{i}_{1nl}^{(h)} + \dot{C}_1 \cdot \dot{i}_{1nl}^{(h)} + (\dot{A} \cdot \dot{i}_{1nl}^{(h)} - \dot{B} \cdot \dot{i}_{2nl}^{(h)}) \quad (13)$$

$$\dot{i}_2^{(h)} = \dot{C} \cdot \dot{i}_{2nl}^{(h)} + \dot{C}_2 \cdot \dot{i}_{2nl}^{(h)} + (-\dot{A} \cdot \dot{i}_{1nl}^{(h)} + \dot{B} \cdot \dot{i}_{2nl}^{(h)}) \quad (14)$$

где

$\dot{i}_{1nl}^{(h)}$ - ток, генерируемый нелинейной нагрузкой первого потребителя 7;

$\dot{i}_{2nl}^{(h)}$ - ток, генерируемый нелинейной нагрузкой второго потребителя 9.

По составляющим $\dot{A} \cdot \dot{i}_{1nl}^{(h)}$ и $\dot{B} \cdot \dot{i}_{2nl}^{(h)}$ видно, что генерируемый ток высших гармоник потребителей распределяется как в систему, так и на другого потребителя. Однако, они несут информацию о структуре всей системы электроснабжения в целом, а значит считать их за погрешность способа ошибочно, так как в данном случае рассматривается взаимное влияние всех объектов друг на друга, а не каждый объект в отдельности.

В итоге производится сравнение рассчитанных вкладов потребителей в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения на гармонике h в процентном соотношении, далее токи высших гармоник потребителей с наибольшими вкладами компенсируются в первую очередь любым из разработанных способов компенсации тока высших гармоник, например используя пассивные или активные фильтры высших гармоник.

Способ поясняется следующими примерами. Проведен расчет несинусоидального режима для системы электроснабжения, представленной на фиг. 1. Параметры схемы

представлены в таблице 1.

Таблица 1			
Исходные данные для расчета схемы замещения			
5	Сопротивление системы электроснабжения	$Z_0^{(1)} = X_0^{(1)} =$	0,435 Ом
10	Сопротивление линии от первого потребителя до ТОП	$R_{01}^{(h)}$ $R_{01}^{(h)}$ =	0,380 Ом
10	Индуктивность линии от первого потребителя до ТОП	L_{01} L_{01} =	0,430 мГн
15	Сопротивление линии от второго потребителя до ТОП	$R_{02}^{(h)}$ $R_{02}^{(h)}$ =	0,380 Ом
15	Индуктивность линии от второго потребителя до ТОП	L_{02} L_{02} =	0,430 мГн
20	Суммарная активная мощность двух потребителей	$P_{сум}$ $P_{сум}$ =	4 МВт
25	Суммарная реактивная мощность двух потребителей	$Q_{сум}$ $Q_{сум}$ =	3 Мвар
30	Суммарный ток третьей гармоники, генерируемый двумя потребителями	$I_{1nlсум}^{(3)}$ $I_{1nlсум}^{(3)}$ =	72,27 А

В ходе расчетов менялись доли генерируемого тока каждого потребителя при условии сохранения значения суммарного генерируемого тока высших гармоник двух потребителей, а также менялось соотношение мощностей потребителей при постоянной потребляемой мощности на первой гармонике во всей системе в целом.

Проведем расчет для частного случая, при котором доля мощности первого потребителя составляет 40%, а генерируемый первым потребителем ток третьей гармоники составляет 60% от тока третьей гармоники, суммарно генерируемого первым и вторым потребителем.

Согласно предложенному способу, на практике необходимо измерить токи $j_0^{(3)}, j_1^{(3)}, j_2^{(3)}$, а в случае аналитического подхода - рассчитать их по формулам (12)-(14).

Перед этим рассчитывается индуктивная часть комплексного сопротивления СЭС 1 (равная полному комплексному сопротивлению в данном частном случае:

$$Z_0^{(h)} = X_0^{(h)} = h \cdot X_0^{(1)}$$

где

h - номер гармоники.

Для третьей гармоники:

$$Z_0^{(3)} = X_0^{(3)} = 3 \cdot 0,435 = 1,305, \text{ Ом}$$

Тогда фаза комплексного сопротивления СЭС 1 на третьей гармонике:

$$\psi_0^{(3)} = \arctg \frac{X_0^{(3)}}{R_0^{(3)}} = \arctg \frac{1,305}{0} = 90^\circ$$

Индуктивная часть комплексного сопротивления первой линии 5:

$$X_{01}^{(h)} = h \cdot 2\pi f \cdot L_{01}$$

где

f - основная частота сети.

Для третьей гармоники:

$$X_{10}^{(3)} = 3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,430 \cdot 10^{-3} = 0,405, \text{ Ом}$$

Полное комплексное сопротивление первой линии 5:

$$Z_{10}^{(h)} = \sqrt{R_{10}^{(h)2} + X_{10}^{(h)2}}$$

Для третьей гармоники:

$$Z_{10}^{(3)} = \sqrt{0,380^2 + 0,405^2} = 0,555, \text{ Ом}$$

Фаза комплексного сопротивления первой линии 5 третьей гармоники:

$$\psi_{10}^{(3)} = \arctg \frac{X_{10}^{(3)}}{R_{10}^{(3)}} = \arctg \frac{1,305}{0} = 46,862^\circ$$

Аналогично для комплексного сопротивления второй линии 6:

$$X_{20}^{(3)} = 3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,430 \cdot 10^{-3} = 0,405, \text{ Ом};$$

$$Z_{20}^{(3)} = \sqrt{0,380^2 + 0,405^2} = 0,555, \text{ Ом};$$

$$\psi_{20}^{(3)} = \arctg \frac{1,305}{0} = 46,862^\circ;$$

где

$X_{20}^{(3)}$ - индуктивная часть комплексного сопротивления второй линии 6;

$Z_{20}^{(3)}$ - полное комплексное сопротивление второй линии 6;

$\psi_{20}^{(3)}$ - фаза комплексного сопротивления второй линии 6.

Далее рассчитываются параметры линейной нагрузки первого потребителя 8.

Активная и реактивная мощности определяются следующим образом:

$$P_1 = P_{\text{сум}} \cdot K_{S1};$$

$$Q_1 = Q_{\text{сум}} \cdot K_{S1};$$

где

K_{S1} - доля мощности первого потребителя по отношению к суммарной мощности всех потребителей системы.

$$P_1 = 4 \cdot 0,4 = 1,6, \text{ МВт};$$

$$Q_1 = 3 \cdot 0,4 = 1,2, \text{ Мвар}.$$

Так как потребители электроэнергии традиционно замещаются параллельным соединением активного и реактивного сопротивления, то рассчитаем следующие значения:

$$R_{1 \text{ пар}}^{(1)} = \frac{U_6^2}{P_1};$$

$$X_{1 \text{ пар}}^{(1)} = \frac{U_6^2}{Q_1};$$

где

U_6^2 - базовое напряжение, к которому приведены значения всех элементов системы,

$R_{1 \text{ пар}}^{(1)}$ - активное сопротивление линейной нагрузки первого потребителя 8;

$X_{1 \text{ пар}}^{(1)}$ - реактивное сопротивление линейной нагрузки первого потребителя 8.

$$R_{1 \text{ пар}}^{(1)} = \frac{6000^2}{1,6 \cdot 10^6} = 22,50, \text{ Ом};$$

$$X_{1 \text{ пар}}^{(1)} = \frac{6000^2}{1,2 \cdot 10^6} = 30,00, \text{ Ом}$$

Однако для дальнейших расчетов необходимо эквивалентировать параллельное соединение в последовательное

$$R_1^{(h)} = \frac{R_{1 \text{ пар}}^{(h)} \cdot X_{1 \text{ пар}}^{(h) 2}}{R_{1 \text{ пар}}^{(h) 2} + X_{1 \text{ пар}}^{(h) 2}} = \frac{R_{1 \text{ пар}}^{(1)} \cdot (h \cdot X_{1 \text{ пар}}^{(1)})^2}{R_{1 \text{ пар}}^{(h) 2} + (h \cdot X_{1 \text{ пар}}^{(1)})^2};$$

$$X_1^{(h)} = \frac{R_{1 \text{ пар}}^{(h) 2} \cdot X_{1 \text{ пар}}^{(h)}}{R_{1 \text{ пар}}^{(h) 2} + X_{1 \text{ пар}}^{(h) 2}} = \frac{R_{1 \text{ пар}}^{(1) 2} \cdot X_{1 \text{ пар}}^{(1)}}{R_{1 \text{ пар}}^{(h) 2} + (h \cdot X_{1 \text{ пар}}^{(1)})^2}$$

где

$R_1^{(h)}$ - эквивалентное активное сопротивление линейной нагрузки первого потребителя 8;

$X_1^{(h)}$ - эквивалентное реактивное сопротивление линейной нагрузки первого потребителя 8.

Для третьей гармоники:

$$R_1^{(3)} = \frac{22,50 \cdot (3 \cdot 30,00)^2}{22,50^2 + (3 \cdot 30,00)^2} = 21,176, \text{ Ом};$$

$$X_1^{(3)} = \frac{22,50^2 \cdot 30,00}{22,50^2 + (3 \cdot 30,00)^2} = 5,294, \text{ Ом}.$$

Тогда

$$Z_1^{(3)} = \sqrt{R_1^{(3)2} + X_1^{(3)2}};$$

$$\psi_1^{(3)} = \arctg \frac{X_1^{(3)}}{R_1^{(3)}};$$

где

$Z_1^{(3)}$ - эквивалентное полное сопротивление линейной нагрузки первого потребителя

8.

$\psi_1^{(3)}$ - фаза линейной нагрузки первого потребителя 8.

$$Z_1^{(3)} = \sqrt{21,176^2 + 5,294^2} = 21,828, \text{ Ом};$$

$$\psi_1^{(3)} = \arctg \frac{5,294}{21,176} = 14,04^\circ.$$

Аналогично рассчитываются параметры линейной нагрузки второго потребителя

10.

$$P_2 = 4 \cdot 0,6 = 2,4, \text{ МВт};$$

$$Q_2 = 3 \cdot 0,6 = 1,8, \text{ Мвар}.$$

$$R_{2 \text{ пар}}^{(1)} = \frac{6000^2}{2,4 \cdot 10^6} = 15,00, \text{ Ом};$$

$$X_{2 \text{ пар}}^{(1)} = \frac{6000^2}{1,8 \cdot 10^6} = 20,00, \text{ Ом}$$

$$R_2^{(3)} = \frac{15,00 \cdot (3 \cdot 20,00)^2}{15,00^2 + (3 \cdot 20,00)^2} = 14,118, \text{ Ом};$$

$$X_2^{(3)} = \frac{15,00^2 \cdot 20,00}{15,00^2 + (3 \cdot 20,00)^2} = 3,529, \text{ Ом}.$$

$$Z_2^{(3)} = \sqrt{14,118^2 + 3,529^2} = 14,552, \text{ Ом};$$

$$\psi_2^{(3)} = \arctg \frac{3,529}{14,118} = 14,04^\circ;$$

Где

$R_{2 \text{ пар}}^{(1)}$ - активное сопротивление линейной нагрузки второго потребителя 10;

$X_{2 \text{ пар}}^{(1)}$ - реактивное сопротивление линейной нагрузки второго потребителя 10;

$R_2^{(h)}$ - эквивалентное активное сопротивление линейной нагрузки второго потребителя

10;

$X_2^{(h)}$ - эквивалентное реактивное сопротивление линейной нагрузки второго

потребителя 10;

$Z_2^{(3)}$ - эквивалентное полное сопротивление линейной нагрузки второго потребителя

10;

$\psi_2^{(3)}$ - фаза линейной нагрузки второго потребителя 10.

Далее проводится расчет параметров, необходимых для определения коэффициентов

$\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{C}_1, \dot{C}_2$

$$n_1^{(3)} = \frac{Z_1^{(3)}}{Z_0^{(3)}}; \quad n_2^{(3)} = \frac{Z_2^{(3)}}{Z_0^{(3)}}; \quad n_{10}^{(3)} = \frac{Z_{10}^{(3)}}{Z_0^{(3)}}; \quad n_{20}^{(3)} = \frac{Z_{20}^{(3)}}{Z_0^{(3)}};$$

$$\begin{aligned} \psi_{n1}^{(3)} &= \psi_1^{(3)} - \psi_0^{(3)}; & \psi_{n2}^{(3)} &= \psi_2^{(3)} - \psi_0^{(3)}; \\ \psi_{n10}^{(3)} &= \psi_{10}^{(3)} - \psi_0^{(3)}; & \psi_{n20}^{(3)} &= \psi_{20}^{(3)} - \psi_0^{(3)}; \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} n_1^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } \dot{n}_1^{(3)}; & n_{10}^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } \dot{n}_{10}^{(3)}; \\ n_2^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } \dot{n}_2^{(3)}; & n_{20}^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } \dot{n}_{20}^{(3)}; \\ Z_1^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } Z_1^{(3)}; & Z_{10}^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } Z_{10}^{(3)}; \\ Z_2^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } Z_2^{(3)}; & Z_{20}^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } Z_{20}^{(3)}; \\ Z_0^{(3)} &- \text{модуль коэффициента } Z_0^{(3)}; & & \\ \psi_{n1}^{(3)} &- \text{фаза коэффициента } \dot{n}_1^{(3)}; & \psi_{n10}^{(3)} &- \text{фаза коэффициента } \dot{n}_{10}^{(3)}; \\ \psi_{n2}^{(3)} &- \text{фаза коэффициента } \dot{n}_2^{(3)}; & \psi_{n20}^{(3)} &- \text{фаза коэффициента } \dot{n}_{20}^{(3)}. \end{aligned}$$

$$n_1^{(3)} = \frac{Z_1^{(3)}}{Z_0^{(3)}}; \quad n_2^{(3)} = \frac{Z_2^{(3)}}{Z_0^{(3)}}; \quad n_{01}^{(3)} = \frac{Z_{10}^{(3)}}{Z_0^{(3)}}; \quad n_{02}^{(3)} = \frac{Z_{20}^{(3)}}{Z_0^{(3)}}.$$

$$n_1^{(3)} = \frac{21,828}{1,305} = 16,727;$$

$$n_2^{(3)} = \frac{14,552}{1,305} = 11,151;$$

$$n_{10}^{(3)} = \frac{0,555}{1,305} = 0,425;$$

$$n_{20}^{(3)} = \frac{0,555}{1,305} = 0,425;$$

$$\psi_{n1}^{(3)} = 14,04 - 90,00 = -75,96^\circ;$$

$$\psi_{n2}^{(3)} = 14,04 - 90,00 = -75,96^\circ;$$

$$\psi_{n10}^{(3)} = 46,86 - 90,00 = -43,14^\circ;$$

$$\psi_{n20}^{(3)} = 46,86 - 90,00 = -43,14^\circ.$$

Тогда, учитывая особенности действий над комплексными величинами, рассчитываются следующие значения по формулам (10)-(14):

$$\dot{A} =$$

$$= \frac{16,727 \cdot e^{-j75,96}}{(0,425 \cdot e^{-j43,14} + 16,727 \cdot e^{-j75,96} + 1) \cdot (0,425 \cdot e^{-j43,14} + 11,151 \cdot e^{-j75,96} + 1) - 1} = 0,081 \cdot e^{j66,34};$$

$$\dot{B} =$$

$$= \frac{11,151 \cdot e^{-j75,96}}{(0,425 \cdot e^{-j43,14} + 16,727 \cdot e^{-j75,96} + 1) \cdot (0,425 \cdot e^{-j43,14} + 11,151 \cdot e^{-j75,96} + 1) - 1} = 0,054 \cdot e^{j66,34};$$

$$\dot{C} =$$

$$= \frac{16,727 \cdot e^{-j75,96} \cdot 11,151 \cdot e^{-j75,96}}{(0,425 \cdot e^{-j43,14} + 16,727 \cdot e^{-j75,96} + 1) \cdot (0,425 \cdot e^{-j43,14} + 11,151 \cdot e^{-j75,96} + 1) - 1} = 0,906 \cdot e^{-j9,63};$$

$$\dot{C}_1 =$$

$$= \frac{-16,727 \cdot e^{-j75,96} \cdot 0,425 \cdot e^{-j43,14}}{(0,425 \cdot e^{-j43,14} + 16,727 \cdot e^{-j75,96} + 1) \cdot (0,425 \cdot e^{-j43,14} + 11,151 \cdot e^{-j75,96} + 1) - 1} = 0,035 \cdot e^{-j23,20};$$

$$\dot{C}_2 =$$

$$= \frac{-11,151 \cdot e^{-j75,96} \cdot 0,425 \cdot e^{-j43,14}}{(0,425 \cdot e^{-j43,14} + 16,727 \cdot e^{-j75,96} + 1) \cdot (0,425 \cdot e^{-j43,14} + 11,151 \cdot e^{-j75,96} + 1) - 1} = 0,023 \cdot e^{-j23,20}.$$

Далее рассчитывается ток третьей гармоники нелинейной нагрузки первого потребителя 7.

$$I_{1nl}^{(3)} = I_{1nl\text{сум}}^{(3)} \cdot K_{G1};$$

где

K_{G1} - доля тока высших гармоник первого потребителя по отношению к суммарному току, генерируемому двумя потребителями;

$I_{1nl}^{(3)}$ - ток третьей гармоники, генерируемый первым потребителем.

$$I_{1nl}^{(3)} = 72,27 \cdot 0,6 = 43,362, \text{A.}$$

Аналогично, ток третьей гармоники нелинейной нагрузки второго потребителя 9:

$$I_{2nl}^{(3)} = 72,27 \cdot 0,4 = 28,908, \text{A.}$$

Учитывая все полученные значения, а также задавшись нулевой фазой токов, генерируемых потребителями, производится расчет по формулам (15)-(17):

$$\dot{i}_0^{(3)} = 0,906 \cdot e^{-j9,63} \cdot (43,362 \cdot e^{j0} + 28,908 \cdot e^{j0}) + 0,035 \cdot e^{-j23,20} \cdot 43,362 \cdot e^{j0} + 0,023 \cdot e^{-j23,20} \cdot 28,908 \cdot e^{j0} = 66,520 \cdot e^{-j11,80}, \text{A};$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_1^{(3)} &= 0,906 \cdot e^{-j9,63} \cdot 43,362 \cdot e^{j0} + 0,035 \cdot e^{-j23,20} \cdot 43,362 \cdot e^{j0} \\ &+ (0,081 \cdot e^{j66,34} \cdot 43,362 \cdot e^{j0} - 0,054 \cdot e^{j66,34} \cdot 28,908 \cdot e^{j0}) = \\ &= 41,231 \cdot e^{-j7,48}, \text{A}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_2^{(3)} &= 0,906 \cdot e^{-j9,63} \cdot 28,908 \cdot e^{j0} + 0,023 \cdot e^{-j23,20} \cdot 28,908 \cdot e^{j0} \\ &+ (-0,081 \cdot e^{j66,34} \cdot 43,362 \cdot e^{j0} + 0,054 \cdot e^{j66,34} \cdot 28,908 \cdot e^{j0}) = \\ &= 26,434 \cdot e^{-j14,09}, \text{A.} \end{aligned}$$

Далее рассчитываются углы между векторами токов потребителей $\dot{i}_1^{(3)}$, $\dot{i}_2^{(3)}$ и тока СЭС $\dot{i}_0^{(3)}$ по формулам (1) и (2):

$$\varphi_{10}^{(3)} = -7,48 - (-10,06) = 2,58^\circ$$

$$\varphi_{20}^{(3)} = -14,09 - (-10,06) = -4,03^\circ$$

Затем определяются проекции амплитуд векторов $\dot{i}_1^{(3)}$, $\dot{i}_2^{(3)}$ на амплитуду вектора $\dot{i}_0^{(3)}$ по формулам (3) и (4):

$$I_{1pr}^{(3)} = 41,231 \cdot \cos(2,58^\circ) = 41,190, \text{A}$$

$$I_{2pr}^{(3)} = 26,434 \cdot \cos(-4,03^\circ) = 26,369, \text{A}$$

В итоге рассчитывается вклад первого и второго потребителя в искажения тока и напряжения в ТОП по выражениям (5) и (6):

$$K_{D1}^{(3)} = \frac{41,190}{66,520} = 0,610$$

$$K_{D2}^{(3)} = \frac{26,369}{66,520} = 0,390$$

Аналогично проведен расчет для других долей мощности первого потребителя по отношению к суммарной мощности всех потребителей системы и других долей тока высших гармоник первого потребителя по отношению к суммарному току, генерируемому двумя потребителями.

Результаты расчетов для третьей гармоники представлены на фиг. 2, где отображены значения вклада первого потребителя в искажения тока и, как следствие, напряжения в ТОП при различных генерируемых токах и мощностях потребителей.

Видно, что полученные значения практически не зависят от соотношения мощностей потребителей, при этом с высокой точностью соответствуют долям генерируемого тока на первом предприятии, что говорит о незначительных величинах токов высших гармоник, перетекающих между предприятиями и не попадающими в систему электроснабжения, а также о возможности применять предложенный способ при любых соотношениях мощностей потребителей.

Таким образом, разработанный способ оценки вклада нелинейных потребителей в искажение напряжения в ТОП позволяет определить долю участия каждого из потребителей, подключенных к ТОП в процентном соотношении, учитывая не только ток высших гармоник, генерируемый нелинейной нагрузкой потребителя, но и особенности структуры всей системы электроснабжения в целом.

(57) Формула изобретения

Способ оценки вклада нелинейных потребителей в искажение напряжения в точке общего присоединения, включающий измерение амплитуды и фазы токов высших гармоник потребителей, подключенных к узлу общего присоединения, отличающийся тем, что измеряют амплитуды и фазы токов высших гармоник системы электроснабжения, на основании измеренных данных для каждой гармоники отдельно для всех потребителей рассчитывают вклад потребителя в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения как отношение проекции вектора тока высшей гармоники потребителя на вектор тока высшей гармоники системы электроснабжения к току высшей гармоники системы электроснабжения по формуле

$$K_{Dn}^{(h)} = \frac{I_n^{(h)} \cos \varphi_{n0}^{(h)}}{I_0^{(h)}}$$

где $K_{Dn}^{(h)}$ - вклад n -ого потребителя в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения на гармонике h ,

$I_n^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h n -ого потребителя,

$\cos \varphi_{n0}^{(h)}$ - косинус угла между фазой вектора тока высшей гармоники n -ого

потребителя и вектора тока высшей гармоники системы электроснабжения,

$I_0^{(h)}$ - амплитуда вектора тока гармоники h системы электроснабжения, затем

производят сравнение рассчитанных вкладов потребителей в искажение напряжения и тока в точке общего присоединения на гармонике h и производят компенсацию токов высших гармоник потребителей с наибольшими вкладами.

5

10

15

20

25

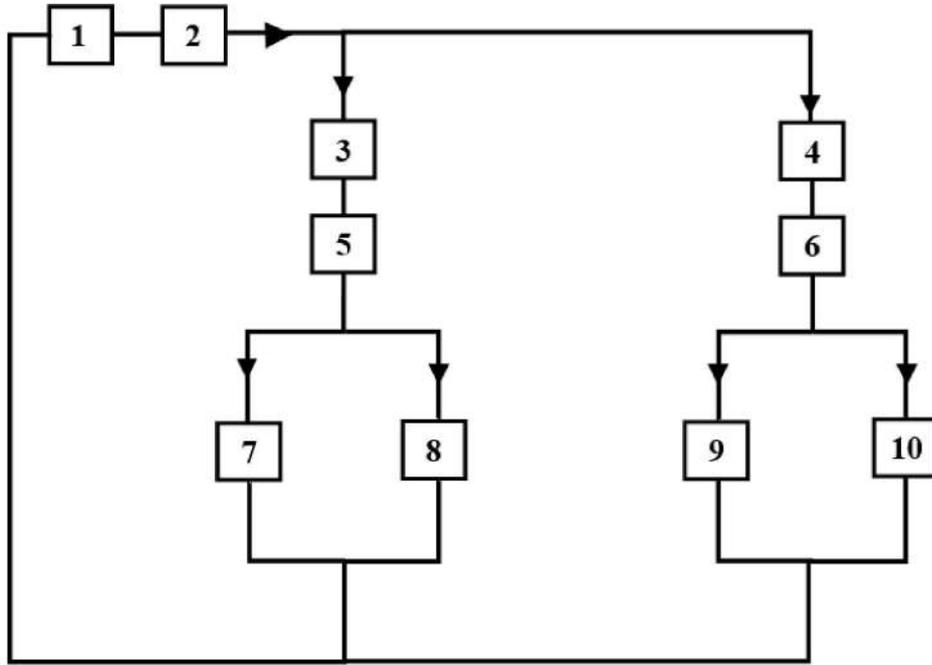
30

35

40

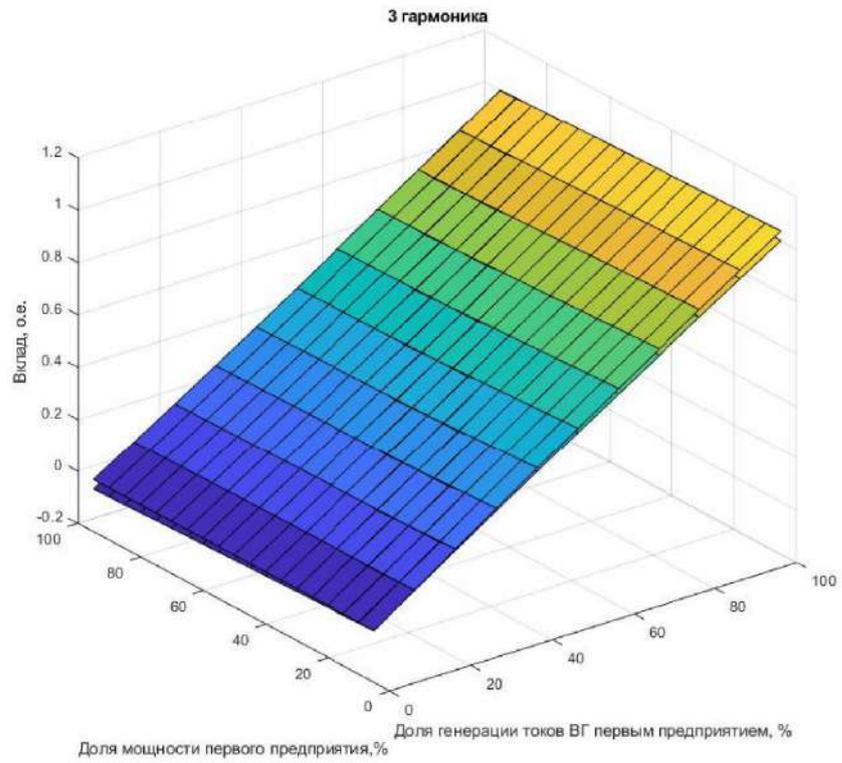
45

1



Фиг. 1

2



Фиг. 2