

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ
ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
С ПОМОЩЬЮ ПОИСКОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

В.Г. Ягуп*, докт.техн.наук, **Е.В. Ягуп****, докт.техн.наук

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова,
ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61002, Украина, e-mail: yagup.walery@gmail.com

Рассматривается идентификация трехфазной нагрузки в трехпроводной электрической системе при условии сохранения потребляемых токов эквивалентом нагрузки. Показано, что система уравнений для определения параметров идентифицируемой нагрузки является недоопределенной, что не обеспечивает единственности решения. Предложены различные способы доопределения этой системы и получения решения с помощью поисковой оптимизации средствами системы MathCAD. Проанализированы рассчитанные варианты найденных эквивалентов нагрузки и величины нескомпенсированной при этом реактивной мощности. Поскольку нескомпенсированные мощности составляют относительно малые величины, представляется возможным использование для практического расчета симметро-компенсирующего устройства любого из вариантов идентифицируемой нагрузки. Библ. 3, рис. 4, табл. 6.

Ключевые слова: трехпроводная электрическая система, эквивалент нагрузки, поисковая оптимизация, симметро-компенсирующее устройство.

Введение. Вопрос об идентификации параметров трехфазной нагрузки состоит в определении параметров принятой эквивалентной схемы замещения линейной нагрузки произвольной топологии по данным измерений электрических величин на зажимах рассматриваемой нагрузки. Этот вопрос нашел отражение в ряде работ [1, 2]. Актуальность решения подобной задачи повышается в связи с неуклонной цифровизацией информации в электроэнергетических системах и созданием интеллектуальных электрических систем. В таких системах доступна информация о характере изменения электрических величин и показателей (токов, напряжений, мощностей) в любой точке системы. На основании этой информации компьютерная система, обслуживающая интеллектуальную электрическую систему, должна проанализировать данные и принять решения по управлению системой с целью достижения оптимальных режимов по заданным критериям. В частности, один из возможных вариантов заключается в определении параметров симметро-компенсирующих устройств для симметрирования и компенсации реактивной мощности при помощи компьютерных моделей на основе метода поисковой оптимизации [3]. В этом случае данные о режиме потребления несимметричной загрузки должны быть переданы в программу, осуществляющую моделирование и оптимизацию режима обобщенной трехфазной системы. По этим данным необходимо определить эквивалент нагрузки и далее осуществить расчет оптимального режима и синтез параметров симметро-компенсирующего устройства. Найденные параметры далее следует передать центральному серверу для соответствующего управления топологией и параметрами симметро-компенсирующего устройства.

Целью статьи является разработка метода идентификации параметров трехфазной линейной нагрузки, питаемой от трехпроводной системы и исследование влияния параметров найденной эквивалентной нагрузки на процессы симметрирования и компенсации реактивной мощности в системе.

Постановка задачи. Рассматривается обобщенная трехфазная трехпроводная система (рис. 1, а). Здесь и далее комплексные величины подчеркнуты; $\underline{e}_a, \underline{e}_b, \underline{e}_c$ представляют собой симметричную трехфазную сеть бесконечной мощности. Комплексные сопротивления $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ отражают параметры линии электропередачи. Нагрузка N полагается линейной трехфазной, ее топология может быть произвольной. После анализа режима системы определяются расчетным или экспериментальным путем напряжения $\underline{U}_{na}, \underline{U}_{nb}, \underline{U}_{nc}$ на зажимах реальной нагрузки и токи $\underline{i}_{na}, \underline{i}_{nb}$ и \underline{i}_{nc} в фидерах нагрузки. Эти значения служат для идентификации эквивалента нагрузки, который представлен на рис. 1, б в виде трехфазной линейной нагрузки, соединенной по схеме «звезды». Условие адекватности идентифика-

ции состоит в том, что присоединение эквивалента должно обеспечивать те же значения напряжений и токов в точке присоединения, которые характеризуют работу с реальной нагрузкой.

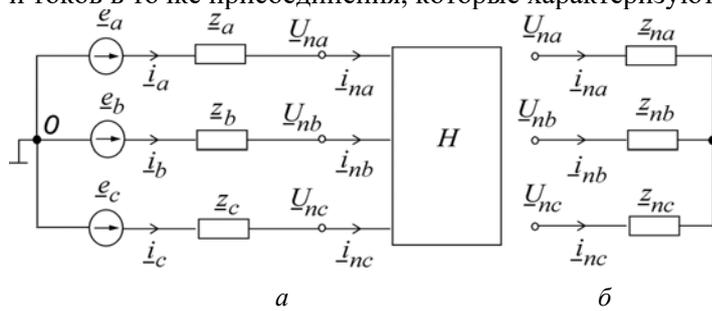


Рис. 1

Нормированные параметры рассматриваемой системы примем следующими: амплитуды источников напряжения $E_m=100$ В, частота напряжения в сети $\omega=100\pi$. Сопротивления линий электропередачи $z_a=z_b=z_c=0,1+j\omega 10^{-3}$. Реальную нагрузку для простоты и сопоставления примем соединенной звездой с комплексными сопротивлениями $Z_{na}=0,7+j\omega 0,005$; $Z_{nb}=1+j\omega 0,01$; $Z_{nc}=2+j\omega 0,04$.

Определение исходного режима. После замены нагрузки H схемой «звезды» с принятыми параметрами модель обобщенной системы описывается системой уравнений в комплексной форме

$$\begin{aligned} \underline{\epsilon}_a - \underline{\epsilon}_b + z_b i_b + z_{nb} i_{nb} - z_{na} i_{na} - z_a i_a &= 0; & \underline{\epsilon}_b - \underline{\epsilon}_c + z_c i_c + z_{nc} i_{nc} - z_{nb} i_{nb} - z_b i_b &= 0; \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} &= 0; & i_{na} = i_a; i_{nb} = i_b; i_{nc} = i_c. \end{aligned} \quad (1)$$

Для определения напряжений на зажимах нагрузки относительно общего узла источников электрической энергии 0 , используются выражения

$$\underline{U}_{na} = \underline{\epsilon}_a - z_a i_a; \quad \underline{U}_{nb} = \underline{\epsilon}_b - z_b i_b; \quad \underline{U}_{nc} = \underline{\epsilon}_c - z_c i_c. \quad (2)$$

Расчет исходного режима осуществлен в системе MathCAD (рис. 2). Система уравнений с неизвестными фазными и нагрузочными токами решается методом поисковой оптимизации. Для этого используется оператор Given-Find, реализующий так называемый решающий блок. Перед этим блоком задаются произвольные начальные значения искомого тока. В самом решающем блоке в данном случае размещается система уравнений (1), которая записывается при помощи знака логического равенства « \Rightarrow » (набирается на рабочем листе сочетанием клавиш “ctrl”+“=”). Присваивание вектору решения значения через обращение к оператору Find вызывает встроенную функцию оптимизации. Решение задачи оптимизации при этом осуществляется относительно всех переменных оптимизации, указанных в качестве параметров оператора Find. Целевая функция, сводимая к нулевому значению, формируется таким образом, чтобы невязки каждого из уравнений в теле решающего блока имели также нулевые значения. Использование указанного средства для решения задач для систем электроснабжения на синусоидальном токе методом комплексных амплитуд тем более рационально, поскольку указанный решающий блок успешно работает не только с действительными, но и с комплексными переменными. Решение задачи анализа несимметричного режима исходной системы представлены на рис. 2.

НАЧАЛЬНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ИСКОМЫХ ТОКОВ:

$$i_a := 30 - j \cdot 30 \quad i_b := -36 + j \cdot 21 \quad i_c := 4 + j \cdot 9$$

$$i_{na} := 30 - j \cdot 30 \quad i_{nb} := -36 + j \cdot 21 \quad i_{nc} := 4 + j \cdot 9$$

РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА:

Given

$$\begin{aligned} \epsilon_a - \epsilon_b + z_b \cdot i_b + z_{nb} \cdot i_{nb} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a &= 0 \\ \epsilon_a - \epsilon_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a &= 0 \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0 & \quad i_a + i_b + i_c = 0 \\ i_a = i_{na} \quad i_b = i_{nb} \quad i_c = i_{nc} \end{aligned}$$

$$x := \text{Find}(i_a, i_b, i_c, i_{na}, i_{nb}, i_{nc}) = \begin{pmatrix} 19.1562943 - 24.9975771i \\ -25.8445704 + 17.1096235i \\ 6.6882761 + 7.8879536i \\ 19.1562943 - 24.9975771i \\ -25.8445704 + 17.1096235i \\ 6.6882761 + 7.8879536i \end{pmatrix}$$

НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ НАГРУЗКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОБЩЕГО УЗЛА ИСТОЧНИКОВ:

$$\begin{aligned} U_{na} &:= \epsilon_a - (z_a) \cdot i_a & U_{na} &= 90.231 - 3.518i \\ U_{nb} &:= \epsilon_b - (z_b) \cdot i_b & U_{nb} &= -42.04 - 80.194i \\ U_{nc} &:= \epsilon_c - (z_c) \cdot i_c & U_{nc} &= -48.191 + 83.713i \\ U_0 &:= U_{na} - z_{na} \cdot i_{na} & U_0 &= 37.556 - 16.111i \end{aligned}$$

Рис. 2

Как видно из рис. 2, режим несимметричной системы характеризуется следующими значениями: $i_{na} = i_a = 19,156 - j24,997$; $i_{nb} = i_b = -25,845 + j17,110$; $i_{nc} = i_c = 6,688 + j7,887$;

$$\underline{U}_{na} = 90,231 - j3,518; \quad \underline{U}_{nb} = -42,040 - j80,194; \quad \underline{U}_{nc} = -48,191 + j83,713.$$

Напряжения общего узла нагрузки относительно нулевого узла источников: $\underline{U}_0 = 37,556 - j16,111$.

Уравнения для идентификации эквивалентной нагрузки. Исходя из принятой структуры эквивалентной нагрузки (рис. 1, a), можно записать следующие уравнения:

$$\underline{i}_{na} z_{na} - \underline{i}_{nb} z_{nb} = \underline{U}_{na} - \underline{U}_{nb}; \quad \underline{i}_{nb} z_{nb} - \underline{i}_{nc} z_{nc} = \underline{U}_{nb} - \underline{U}_{nc}, \quad (3)$$

где Z_{na}, Z_{nb}, Z_{nc} – комплексные сопротивления идентифицируемой эквивалентной нагрузки.

В системе уравнений (3) в качестве неизвестных используются Z_{na}, Z_{nb}, Z_{nc} . Токи $\dot{I}_{na}, \dot{I}_{nb}, \dot{I}_{nc}$ и напряжения $\underline{U}_{na}, \underline{U}_{nb}, \underline{U}_{nc}$ считаются определенными из анализа исходного режима, они в уравнениях системы (3) играют фактически роль известных комплексных коэффициентов. В системе (3), таким образом, содержится три неизвестные комплексные величины Z_{na}, Z_{nb}, Z_{nc} .

В действительности требуется найти 6 неизвестных, представляющих собою три действительные части трех комплексных величин и три коэффициента при мнимых частях этих же величин. Между тем, система (3) содержит лишь два комплексных уравнения, записанных по независимым уравнениям Кирхгофа для напряжений, которые могут быть представлены четырьмя уравнениями с действительными величинами, если отделить уравнения для действительных частей и коэффициентов при мнимых частях. Для получения определенного решения недостает либо одного уравнения с комплексными коэффициентами и переменными, либо двух с действительными числами. Третье уравнение системы (1), записанное по закону Кирхгофа для токов, оказывается здесь бесполезным. Дело в том, что в этом уравнении отсутствуют искомые комплексные сопротивления эквивалента нагрузки. Использование метода поисковой оптимизации позволяет получить множество решений даже без доопределения системы (3).

На получение решения оказывают влияние начальные условия, задаваемые перед записью решающего блока, осуществляющего оптимизацию. На рис. 3 показан фрагмент программы, определяющей параметры Z_{na}, Z_{nb}, Z_{nc} . Здесь в качестве начальных значений приняты произвольно выбранные значения, указанные перед записью решающего блока.

Идентификация по недоопределенной системе имеет множество решений.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАГРУЗКИ («звезда»):

$$Z_{na} := 2 - 1 \cdot j = 2 - i \quad Z_{nb} := 3 + 3 \cdot j$$

$$Z_{nc} := 4 + j = 4 + i$$

Given

$$Z_{na} \cdot i_{na} - Z_{nb} \cdot i_{nb} = U_{na} - U_{nb}$$

$$Z_{nb} \cdot i_{nb} - Z_{nc} \cdot i_{nc} = U_{nb} - U_{nc}$$

$$\text{Re}(Z_{na}) > 0 \quad \text{Re}(Z_{nb}) > 0 \quad \text{Re}(Z_{nc}) > 0$$

$$\begin{pmatrix} Z_{na} \\ Z_{nb} \\ Z_{nc} \end{pmatrix} := \text{Find}(Z_{na}, Z_{nb}, Z_{nc}) = \begin{pmatrix} 1.59001746 + 1.09185761i \\ 0.30377369 + 3.89652108i \\ 10.22689425i \end{pmatrix}$$

$$0.5 Z_{na} \cdot i_{na} \cdot i_{na} = 788.523 + 541.475i$$

$$0.5 Z_{nb} \cdot i_{nb} \cdot i_{nb} = 145.915 + 1.872i \times 10^3$$

$$0.5 Z_{nc} \cdot i_{nc} \cdot i_{nc} = 546.898i$$

$$v00 := \frac{U_{na} \cdot Z_{na}^{-1} + U_{nb} \cdot Z_{nb}^{-1} + U_{nc} \cdot Z_{nc}^{-1}}{Z_{na}^{-1} + Z_{nb}^{-1} + Z_{nc}^{-1}} = 32.479 + 15.$$

$$|v00| = 35.907$$

ПРОВЕРКА ФАЗНЫХ ТОКОВ:

$$\frac{e_a - v00}{z_a + Z_{na}} = 19.156294 - 24.997577i$$

$$\frac{e_b - v00}{z_b + Z_{nb}} = -25.844570 + 17.109624i$$

$$\frac{e_c - v00}{z_c + Z_{nc}} = 6.688276 + 7.887954i$$

Рис. 3

Таблица 1			
N _{вар}	Вар.1	Вар. 2	Вар. 3
Z_{na} нач	2 - j	20 - j	20 - j
Z_{nb} нач	3 + j3	3 + j3	30 + j3
Z_{nc} нач	4 + j	4 + j	4 + j
Z_{na}	1,59 + j1,09	j6,62	j0,75
Z_{nb}	0,3 + j3,9	-j1,94	1,95 + j3,7
Z_{nc}	0 + j10,3	17,5 + j11,4	j15,2
\underline{U}_0	32,5 + j15,3	-75,2 - j130	71,6 - j17,8
$ \underline{U}_0 $	35,9	151	73,8

Изменение начальных значений приводит к изменению результатов решения. Данные по трем вариантам приведены в табл. 1. Во всех трех вариантах фазные токи идентифицированного эквивалента нагрузки абсолютно совпадают со значениями соответствующих токов исходного режима. Найденные параметры эквивалентной нагрузки фактически обеспечивают различные смещения напряжений \underline{U}_0 общей точки звезды нагрузки относительно нулевой точки «0» источников питающих напряжений.

Стоит обратить внимание на второй вариант, в котором смещение \underline{U}_0 по абсолютной величине в полтора раза превышает амплитуды питающих напряжений, и, кроме того, сопротивление Z_{nb} реализуется конденсаторным элементом при том, что в исходной нагрузке конденсаторные элементы как таковые вообще отсутствуют.

Дублирование элементов в теле решающего блока приводит к изменению результатов поисковой оптимизации. Это можно объяснить изменением траектории поиска оптимальной точки при наличии дополнительных уравнений, которые не противоречат условиям поиска, хотя и являются избыточными. В варианте 4 (табл. 2) приняты начальные условия уже рассмотренного варианта 1

(табл. 1), однако в теле решающего блока повторно размещены условия (3), ограничивающие действительные части сопротивлений Z_{na} , Z_{nb} , Z_{nc} положительными значениями.

Таблица 2

$N_{\text{вар}}$	Вар.4	Вар. 5	Вар. 6
Z_{na}	1,41 + j1,05	1,04+j0,97	1,88+j1,16
Z_{nb}	0,49 + j3,87	0,87 +j3,83	j3,93
Z_{nc}	j10,8	j11,9	j9,31
U_0	37 + j11,6	45,9 + j3,9	25,8 + j17,1
$ U_0 $	38,7	46,1	33,1

Если повторить условие лишь для фазы C в виде $Re(Z_{nc}) > 0$, (4)

то оптимизация приходит к решению, представленному вар. 5. Сохранение дублирования лишь одного аналогичного условия для фазы A или B дает решение, представленное вар. 6.

Управление типами реактивностей можно осуществить заданием дополнительных ограничений в теле решающего блока в виде неравенств, определяющих знаки коэффициентов мнимых частей идентифицируемой нагрузки. Задав дополнительно условие

$$Im(Z_{nb}) < 0, \quad (5)$$

получим решение, представленное вариантом 7 (табл. 3) при начальных условиях вар. 1.

Таблица 3

$N_{\text{вар}}$	Вар.7	Вар. 8	Вар. 9
Z_{na}	j4,6	0,16+j5,14	0,62+j4,82
Z_{nb}	0,67	0,34-j0,46	0
Z_{nc}	11,5+j12,7	13+j11,9	11,7+j10,7
U_0	-24,8-j91,6	-41,3-j97,9	-42-j80,2
$ U_0 $	94,9	106	90,6

Добавление к последнему условию дополнительного условия $Im(Z_{na}) > 0$ (6)

приводит к изменению решения (вар. 8). Замена его на

$$Im(Z_{nc}) > 0 \quad (7)$$

дает решение согласно вар. 9.

В последних трех вариантах обращает внимание относительно большая амплитуда напряжения U_0 сдвига общего узла нагрузки относительно нулевого узла источников питающего напряжения. Кроме того, вариант 9 характеризуется полным вырождением сопротивления Z_{nb} в короткозамкнутую цепь, так как $Z_{nb}=0$. Несмотря на требование ограничения знака $Im(Z_{nb}) < 0$, отрицательная мнимая часть комплексного сопротивления Z_{nb} найдена лишь в вар. 8, в двух других она настолько мала по абсолютной величине, что отображается нулевым значением.

Для получения точного решения при условии совпадения топологий исходной и идентифицируемой нагрузки необходимо доопределить уравнения, размещенные в решающем блоке. Как ранее указывалось, достаточно либо одного уравнения с комплексными величинами, либо двух с действительными величинами. При этом информация, заключенная в них, должна включать сведения о параметрах идентифицируемой нагрузки, т.е. в этих уравнениях должны фигурировать действительные части комплексных сопротивлений и/или коэффициенты при мнимых частях.

Простейший способ свести решение к точным значениям состоит в задании действительных частей нагрузок в двух фазах равными исходным значениям. Например:

$$Re(Z_{na}) = 0,7; \quad Re(Z_{nc}) = 2,0. \quad (8)$$

Этот же результат дает оптимизация при задании модулей частей мощностей, выделяемых на элементах идентифицируемой нагрузки. Расчет полных мощностей на нагрузочных комплексных сопротивлениях в исходном режиме дал следующие результаты:

$$\underline{S}_{na} = 347,144+j778,991; \quad \underline{S}_{nb} = 480,341+j1509,034; \quad \underline{S}_{nc} = 106,953+j672,005. \quad (9)$$

Суммарная мощность, потребляемая нагрузкой в исходном режиме,

$$\underline{S}_n = 934,438+j2960,030. \quad (10)$$

К точным значениям сопротивлений идентифицированной нагрузки приводит использование, например, двух условий по мощностям

$$Re(0,5 \cdot z_{na} \cdot i_{na} \cdot i_{na}^*) = 347,144; \quad Im(0,5 \cdot z_{nb} \cdot i_{nb} \cdot i_{nb}^*) = 1509,034. \quad (11)$$

С таким же успехом точное решение достигается при замене этих условий условиями, составленными из сочетаний условий для двух любых коэффициентов комплексных мощностей.

Описанные варианты доопределения уравнений решающего блока предполагают доступ к общему узлу нагрузки, что не всегда возможно. В общем случае можно рассчитывать лишь на доступ к узлам присоединения нагрузок. При совпадении топологий исходной и идентифицируемой нагрузок и при индуктивно-резистивном характере измерения сумм активных сопротивлений можно осуществить в опыте питания постоянным током со стороны трех возможных пар входных зажимов. Обозначив эти активные сопротивления через R_{ab} , R_{bc} , R_{ca} , можем записать систему уравнений

$$Re(Z_{na}) + Re(Z_{nb}) = R_{ab}; \quad Re(Z_{nb}) + Re(Z_{nc}) = R_{bc}; \quad Re(Z_{nc}) + Re(Z_{na}) = R_{ca}. \quad (12)$$

Из этой системы однозначно определяются действительные части комплексных сопротивлений. Использование любой пары из приведенных уравнений в качестве доопределяющих условий для решающего блока также приводит к точному решению.

Мощности нагрузки со стороны входных узлов нагрузки могут быть измерены по методу двух пар приборов. Пусть

$$S_{ac} = 0,5(U_{na} - U_{nc}) \cdot i_{na}^* = 0,5(z_{na}i_{na} - z_{nc}i_{nc}) \cdot i_{na}^*; \quad S_{bc} = 0,5(U_{nb} - U_{nc}) \cdot i_{nb}^* = 0,5(z_{nb}i_{nb} - z_{nc}i_{nc}) \cdot i_{nb}^* \quad (13)$$

Для заданных исходных данных соответственно

$$\underline{S}_{ac} = 2416,106 + j894,595; \quad \underline{S}_{bc} = -1481,668 + j2065,434. \quad (14)$$

Суммарное значение этих мощностей совпадает с суммой трех мощностей на каждой фазе нагрузки $934,438 + j2960,030$, которое найдено ранее.

Естественно предположить, что использование хотя бы одного из условий вида

$$0,5(z_{na}i_{na} - z_{nc}i_{nc}) \cdot i_{na}^* = 2416,106 + j894,595; \quad 0,5(z_{nb}i_{nb} - z_{nc}i_{nc}) \cdot i_{nb}^* = -1481,668 + j2065,434 \quad (15)$$

приведет к точному решению. Однако на практике использование первого условия приводит к результатам, представленным вар. 10 (табл. 4), использование лишь второго соответствует вар. 11, а при использовании обоих уравнений приходим к вар. 12.

N _{вар}	Вар.10	Вар. 11	Вар. 12
\underline{Z}_{na}	j6,62	1,88+j1,16	0,26+j5,86
\underline{Z}_{nb}	-j1,94	j3,93	-j1,12
\underline{Z}_{nc}	17,5+j11,4	j9,31	15+j11,1
\underline{U}_0	-75,2-j130	25,3+j21,4	-61,2-j109
$ \underline{U}_0 $	150	33,1	125

Таким образом, несмотря на то, что уравнения (15) содержат в своем составе искомые неизвестные \underline{Z}_{na} , \underline{Z}_{nb} , \underline{Z}_{nc} , они не доопределяют решающий блок до их точных значений. Дело в том, что эти уравнения фактически дублируют уравнения, составленные по закону Кирхгофа для двух соответствующих контуров, и, таким образом, являются зависимыми.

К точному решению приводит также использование одного комплексного уравнения, определяющего величину напряжения \underline{U}_0 сдвига общего узла нагрузки относительно нулевого узла источников питания

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_{na} \underline{z}_{na}^{-1} + \underline{U}_{nb} \underline{z}_{nb}^{-1} + \underline{U}_{nc} \underline{z}_{nc}^{-1}}{\underline{z}_{na}^{-1} + \underline{z}_{nb}^{-1} + \underline{z}_{nc}^{-1}} = 37,556 - j16,111, \quad (16)$$

где значение правой части взято из решения режима для исходного варианта.

Получение эквивалентной нагрузки с заданными свойствами можно осуществить заданием в решающем блоке соответствующих уравнений.

Вариант 13 (табл. 5) отображает решение для случая задания действительных частей сопротивлений нагрузки в фазах A и C

$$\text{Re}(\underline{z}_{na}) = 0,2; \quad \text{Re}(\underline{z}_{nc}) = 5. \quad (17)$$

В вар. 14 показано решение при задании значений активной мощности в фазе A и реактивной мощности в фазе B, что реализуется уравнениями

$$\text{Re}(0,5 \cdot z_{na} \cdot i_{na} \cdot i_{na}^*) = 300; \quad \text{Im}(0,5 \cdot z_{nb} \cdot i_{nb} \cdot i_{nb}^*) = 500, \quad (18)$$

Таблица 5

N _{вар}	Вар.13	Вар. 14	Вар. 15	Вар. 16
\underline{Z}_{na}	0,2+j2,47	0,6+j3,73	0,3+j1,78	0,41+j1,5
\underline{Z}_{nb}	1,18+j2,11	0,38+j1,04	1,31+j2,81	1,31+j3,12
\underline{Z}_{nc}	5,0+j13,5	8,47+j11,5	2,87+j13,6	1,97+j13,5
\underline{U}_0	24,7-j45,8	-14,5-j59,8	40-j30	45-j22
$ \underline{U}_0 $	52,1	61,5	50	50,1

при этом комплексные мощности нагрузок по фазам соответственно равны

$$\begin{aligned} \underline{S}_{na} &= 300 + j1847,276; \\ \underline{S}_{nb} &= 181,377 + j500; \\ \underline{S}_{nc} &= 453,061 + j612,755, \end{aligned} \quad (19)$$

что соответствует наложенным условиям.

Наконец, в варианте 15 задано напряжение смещения \underline{U}_0 общего узла нагрузки относительно нулевого узла источников с учетом (16)

$$\underline{U}_0 = 40 - j30. \quad (20)$$

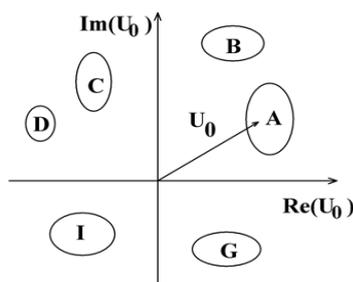


Рис. 4

Фактически любой из возможных вариантов параметров идентифицируемой эквивалентной нагрузки может быть получен заданием соответствующего напряжения смещения \underline{U}_0 . Разумеется, при наложении условий положительности действительных частей комплексных сопротивлений не всякие значения приводят к реализуемому варианту эквивалента. Таким образом, на комплексной плоскости в общем случае области достижимости реализуемых вариантов эквивалента могут быть пока-

заны в виде замкнутых областей F, B, C, D, F, G, ... , (рис. 4), которые объединяют концевые точки векторов \underline{U}_0 и обеспечивают достижение реализуемого варианта параметров эквивалента.

Вариант 16 (табл. 5) показывает решение для случая вариантов вариации вектора \underline{U}_0 по сравнению с предыдущим вариантом, практически приводящих к повороту вектора \underline{U}_0 в направлении увеличения угла сдвига.

Анализ режимов компенсации реактивной мощности. Для оценки условий компенсации реактивной мощности для каждого из найденных вариантов параметров идентифицируемой нагрузки подключались компенсирующие элементы с параметрами, обеспечивающими полную компенсацию реактивной мощности в исходном режиме

$$Z_{ab} = -j5,6625; \quad Z_{bc} = -17,4590; \quad Z_{ca} = -92,3582. \quad (21)$$

Нвар	P_A	Q_A	$\cos \varphi_A$	I_{mA}	$S_{c\Sigma}$
0	388	0	1	7,75	1163,107+j0,0
1	393	-11,7	0,99952	7,86	1178,835-j35,107
2	361	+34,9	0,99536	7,26	1081,964+j99,313
3	397	+6,43	0,99986	7,94	1188,730+j19,799
4	393	-9,57	0,99970	7,87	1180,403-j27,399
5	394	-4,76	0,99993	7,89	1183,141-j13,185
6	392	-16,8	0,99908	7,84	1175,946-j48,611
7	367	+21,4	0,99829	7,35	1100,180+j60,480
8	364	+24,5	0,99774	7,29	1090,091+j69,001
9	362	+20,2	0,99844	7,24	1084,133+j55,215
10	361	+34,9	0,99536	7,26	1081,964+j99,313
11	392	-16,8	0,99908	7,84	1175,945-j48,611
12	361	+29,3	0,99672	7,24	1081,229+j82,802
13	380	+7,92	0,99978	7,61	1140,678+j22,380
14	367	+11,9	0,99948	7,36	1103,703+j32,494
15	387	+4,64	0,99993	7,73	1158,998+j13,455
16	389,068	+2,983	0,99997	7,782	1166,777+j8,880

При этих условиях были рассчитаны режимы для каждого варианта. Результаты этих расчетов представлены в табл. 6, в которой первые четыре столбца представляют результаты для фазы A, а именно активную и реактивную мощности P_A и Q_A , потребляемые от источника питания e_A , значение коэффициента мощности $\cos \varphi_A$ для фазы A, амплитуду I_{mA} потребляемого от источника e_A тока (аналогичные показатели для других фаз не приведены, поскольку они практически не отличаются от показателей фазы A). В последнем столбце приведены суммарные комплексные мощности, потребляемые от всех источников питания.

Анализ результатов, приведенных в табл. 6, свидетельствует о том, что изменение параметров идентифицируемой нагрузки существенно влияет на качество компенсации

реактивной мощности нагрузки. В первой строке табл. 6 под нулевым вариантом приведены данные для исходной нагрузки при полной компенсации реактивной мощности в системе.

В вариантах для идентифицированной эквивалентной нагрузки значение нескомпенсированной реактивной мощности в одной и во всех фазах относительно активной мощности достаточно невелико. Это обуславливает незначительное отличие коэффициентов мощности от максимального единичного значения, которое не превышает 1%.

Для проверки данные эквивалента нагрузки по варианту №7 использованы для нахождения точных параметров симметрично-компенсирующего устройства путем поисковой оптимизации с использованием визуальной модели в системе SimPowerSystem. По завершении оптимизации найдены емкости конденсаторов $C_{ab}=561,037$, $C_{bc}=181,607$, $C_{ca}=33,892$ мкФ. Эти значения мало отличаются от точных значений, найденных для исходной нагрузки $C_{ab}=562,13$, $C_{bc}=182,318$, $C_{ca}=34,464$. Относительные погрешности составляют соответственно $\delta_{AB}=0,19\%$, $\delta_{BC}=0,39\%$, $\delta_{CA}=1,66\%$. Таким образом, качество компенсации реактивной мощности нагрузки практически можно считать инвариантным в отношении параметров идентифицируемой нагрузки.

Выводы.

1. Использование для идентификации нагрузки уравнений по законам Кирхгофа и Ома дает недоопределенную систему уравнений, которая позволяет получить множество решений для параметров идентифицируемого эквивалента нагрузки. Эти решения существенно зависят от начальных значений переменных оптимизации.

2. Для физической реализуемости эквивалента нагрузки необходимо ограничить действительные части комплексных сопротивлений эквивалента положительными значениями.

3. Для доопределения системы, составляющей тело решающего блока, достаточно дополнить ее либо одним уравнением с комплексными величинами, либо двумя с действительными переменными.

4. Доопределение системы уравнениями для комплексных мощностей, измеренных на входных узлах нагрузки, не может привести к точному решению, поскольку эти уравнения для мощностей тождественны уже имеющимся уравнениям по закону Кирхгофа для напряжений.

5. Представляется возможным идентифицировать эквивалентную нагрузку с наперед заданными свойствами путем наложения соответствующих условий на сопротивления нагрузок, потребляемые ими мощности и сдвиг напряжения общего узла нагрузки относительно нуля узла источников.

6. Для расчета режима компенсации реактивной мощности нагрузки выбор варианта идентифицированной нагрузки оказывается практически несущественным. Для всех вариантов нескомпенсированная реактивная мощность источников настолько мала относительно отдаваемой источниками активной мощности, что отклонения коэффициента мощности от максимального единичного значения не превышает одного процента.

1. Pan A., Zhou J. Power quality analysis and harmonic tracing in city grid based on big monitoring data. Proc. 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, France. 15-18 June 2015. Pp. 1-4.

2. Саенко Ю.Л., Калюжный Д.Н., Свергуненко С.В. Идентификация линейной обобщенной нагрузки в задаче распределения фактических вкладов в искажения напряжений в трехфазных четырехпроводных сетях. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 67–74. DOI: <https://doi.org/techned2018.02.067>

3. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 1. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/techned2016.01.060>

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРИФАЗНОГО ЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

В.Г. Ягуп, докт.техн.наук, **К.В. Ягуп**, докт.техн.наук

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,

вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна,

e-mail: yagup.walery@gmail.com

Розглядається ідентифікація трифазного навантаження в трипровідній електричній системі за умови збереження споживаних струмів еквівалентом навантаження. Показано, що система рівнянь для визначення параметрів ідентифікованого навантаження є недовизначеною, що не забезпечує єдиності рішення. Запропоновано різні способи довизначення цієї системи і отримання рішення за допомогою пошукової оптимізації засобами системи MathCAD. Проаналізовано розраховані варіанти знайдених еквівалентів навантаження і величини нескомпенсованих при цьому реактивних потужностей. Оскільки нескомпенсовані потужності складають відносно малі величини, представляється можливим використання для практичного розрахунку симетро-компенсуючого пристрою будь-якого з варіантів ідентифікованого навантаження. Бібл. 3, рис. 4, табл. 6.

Ключові слова: трипровідна електрична система, еквівалент навантаження, пошукова оптимізація, симетро-компенсуючий пристрій.

IDENTIFICATION OF THREE-PHASE LINEAR LOAD PARAMETERS FOR COMPENSATION OF REACTIVE POWER BY SEARCHING OPTIMIZATION

V.G. Yagup, K.V. Yagup

Kharkiv National University of Municipal Economy,

str. Marshala Bazhenova, 12, Kharkiv, 61002, Ukraine,

e-mail: yagup_walery@gmail.com

The identification of a three-phase load in a three-wire electrical system is considered, provided that the consumed currents are stored as equivalent of load. It is shown that the system of equations for determining the parameters of the identified load is underdeveloped, which does not ensure the uniqueness of the solution. Various ways of defining this system and obtaining a solution using search optimization using the system of computer mathematics MathCAD are proposed. The calculated versions of the found load equivalents and the values of uncompensated reactive power are analyzed. Since the uncompensated powers are relatively small, it seems possible to use any of the variants of the identified load for the practical calculation of the symmetry-compensating device. References 3, figures 4, tables 6.

Keywords: three-wire electrical system, load equivalent, search optimization, symmetrical-compensating device.

1. Pan A., Zhou J. Power quality analysis and harmonic tracing in the city. Proc. 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, France. 15-18 June 2015. Pp. 1-4.

2. Saenko Yu.L., Kalyuzhny D.N., Svergunenko S.V. Identification of the linear generalized load in the distribution problem actual contributions in the distortion of stresses in three-phase four-current networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 67-74. (Rus) DOI: <https://doi.org/techned2018.02.067>

3. Yagup V.G., Yagup E.V. Determination of the reactive power compensation mode in a four-wire three-phase power supply system by means of search optimization. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 60-66. (Rus) DOI: <https://doi.org/techned2016.01.060>

Надійшла 14.08.2018

Остаточний варіант 18.12.2018