

Ю.Л. Саенко, Д.Н. Калюжный

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ В НЕСИММЕТРИЮ И ОТКЛОНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКАХ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

На основі імітаційного моделювання проведено порівняльний аналіз математичних моделей розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень у спотворення напруг у точці загального приєднання, які засновані на принципах накладення й виключення. Отримані результати дозволили зробити висновок про еквівалентність двох математичних моделей і їхній довільний вибір для розв'язання задачі розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень у спотворення напруг у точці загального приєднання. Бібл. 8, табл. 6, рис. 3.

Ключові слова: якість електричної енергії, фактичний внесок, точка загального приєднання, несиметрія напруг, відхилення напруги.

На основе имитационного моделирования проведен сравнительный анализ математических моделей распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажение напряжений в точке общего присоединения, которые основаны на принципах наложения и исключения. Полученные результаты позволили сделать вывод об эквивалентности двух математических моделей и их произвольном выборе для решения задачи распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажение напряжений в точке общего присоединения. Библ. 8, табл. 6, рис. 3.

Ключевые слова: качество электрической энергии, фактический вклад, точка общего присоединения, несимметрия напряжений, отклонение напряжения.

Введение. Несоответствие качества электрической энергии (КЭ) установленным нормам является причинами брака продукции, повреждения оборудования и дополнительных потерь мощности как у потребителей, так и у поставщиков электроэнергии (ЭЭ) [1]. По некоторым оценкам [2] ежегодные экономические убытки ряда стран из-за пониженного КЭ достигают 10-20 млрд. дол. Для отдельных отраслей производства понижение КЭ может вызывать ущерб до 3.800.000 евро за одно событие [3]. Очевидно, что при возникновении такой ситуации становится вопрос об определении виновных в понижении КЭ и компенсации ими экономических убытков потерпевшей стороне. Ответом на него является решение задачи о распределении фактических вкладов (ФВ) источников искажений (ИИ) в искажение напряжений в точке общего присоединения (ТОП) [4].

Постановка задачи. Одно из новых направлений развития методов распределения ФВ ИИ в искажение напряжений в ТОП предполагает использование математических моделей, составленных в фазных координатах, с учетом распределенного характера ИИ в системе электроснабжения (СЭС), которые основаны на принципах наложения [5] и исключения [6].

Математическая модель распределения ФВ линейных ИИ (неискажающих синусоидальную форму кривой напряжения) в искажения напряжений, основанная на принципе наложения, предполагает разложение искажающих частей напряжений в каждой ТОП от действия всех ИИ согласно следующему выражению:

$$\sum_{i=1}^n U_{иски} = A^T \times Y_{неиск}^{-1} \times \sum_{i=1}^n I_{иски}, \quad (1)$$

где A – матрица инцидентности; $Y_{неиск}$ – матрица неискажающих узловых проводимостей СЭС и потребителей ЭЭ; $I_{иски}$ – матрица-столбец искажающих токов,

характеризующая i -ый активный или пассивный элемент с ИИ.

Математическая модель распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений, основанная на принципе исключения, предполагает определение искажающей части напряжения в каждой ТОП, вносимой i -ым ИИ, по следующему выражению:

$$U_{иски} = U_{иск} - U_{иск}^{искл\ ИИi}, \quad (2)$$

где $U_{иск}$ – матрица искажающих частей напряжений в ТОП от общего действия всех ИИ; $U_{иск}^{искл\ ИИi}$ – матрица искажающих частей напряжений в ТОП с исключенной искажающей частью i -го ИИ.

Для проверки адекватности и сравнения предлагаемых новых математических моделей распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в ТОП необходимо провести их численный анализ.

Цель исследования. Провести численный анализ математических моделей распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в ТОП, основанных на принципах наложения и исключения.

Результаты исследования. Рассмотрим СЭС семи потребителей ЭЭ (П) (рис. 1), состоящую из источника питания (ИП), обобщенной электрической сети (ЭС), одного силового трансформатора (Т) и трех воздушных линий (ВЛ).

Параметры схем замещения элементов рассматриваемой СЭС и потребителей ЭЭ, приведенные к напряжению 380 В, следующие. Напряжение на шинах ИП: $\underline{U}_A^{ИП} = 232 \angle 0^\circ$ В; $\underline{U}_B^{ИП} = 232 \angle 240^\circ$ В;

$\underline{U}_C^{ИП} = 232 \angle 120^\circ$ В. Эквивалентные сопротивления обобщенной ЭС: $\underline{Z}_A^{ЭС} = 0,008 + j0,048$ Ом; $\underline{Z}_B^{ЭС} = 0,008 + j0,04$ Ом; $\underline{Z}_C^{ЭС} = 0,008 + j0,056$ Ом.

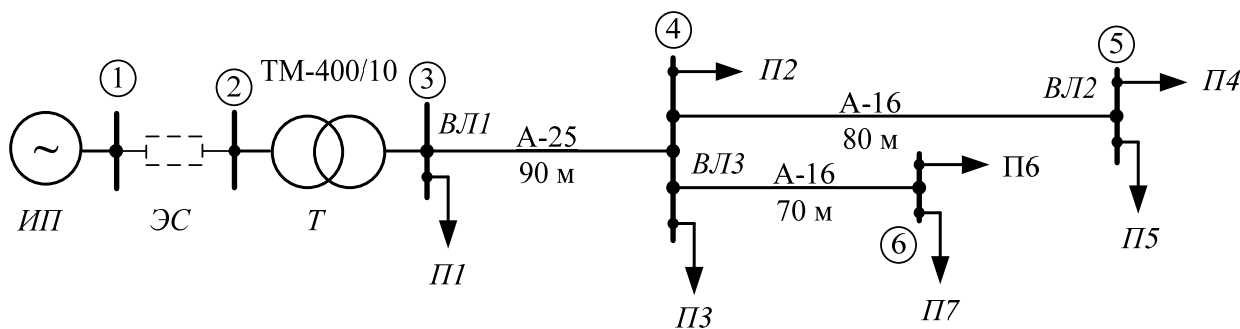


Рис. 1. Система электроснабжения семи потребителей ЭЭ

Эквивалентные сопротивления потребителей ЭЭ:

i	Z_{A}^{Pi} , Ом	Z_{B}^{Pi} , Ом	Z_{C}^{Pi} , Ом
1	$7,2 + j3,7$	$6,5 + j3,0$	$6,74 + j3,5$
2	$6,9 + j5,2$	$7,7 + j3,7$	$6,87 + j3,9$
3	$13,7 + j5,2$	$15,1 + j4,7$	$14,2 + j4,6$
4	$9,7 + j3,2$	$8,9 + j3,1$	$10,5 + j3,5$
5	$6,3 + j1,9$	$6,8 + j1,4$	$7,2 + j1,9$
6	$17,2 + j7,1$	$19,8 + j8,1$	$15,6 + j6,5$
7	$13,9 + j3,9$	$14,9 + j4,9$	$15,1 + j4,5$

Сопротивление силового трансформатора:
 $Z_{Фобм}^{Tн} = 0,00105 + j0,0072$ Ом.

Проводимость силового трансформатора:
 $Y_{Фнамагн}^{Tн} = 0,001375 + j0,0021$ См.

Удельные сопротивления ВЛ:
 $Z_{уд}^{A25} = 1,26 + j0,34$ Ом/км; $Z_{уд}^{A16} = 1,97 + j0,345$ Ом.

Согласно проведенным расчетам, установившийся режим работы рассматриваемой СЭС характеризуется параметрами, приведенными в табл. 1. Из них следует, что в ТОП № 5, к которой подключены потребители ЭЭ П4 и П5, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} и установившееся отклонение напряжения δU_y превышают нормально допустимые значения [7]. Исходя из этого, для ТОП № 5 определим ФВ всех ИИ в искажение ее напряжений.

Согласно математическим моделям (1) и (2) в схеме замещения отдельных элементов СЭС и потребителей ЭЭ должны быть выделены и определены искажающие части всех ИИ [8]. Если ИИ является пассивным продольным элементом, то его схема замещения будет определяться последовательным соединением двух сопротивлений, одно из которых характеризует неискажающую часть ($Z_{эл}^{неиск}$), а другое – искажающую часть ($Z_{эл}^{иск}$). Если ИИ является пассивным поперечным элементом, то его схема замещения будет определяться параллельным соединением двух проводимостей $Y_{эл}^{неиск}$ и $Y_{эл}^{иск}$. Для ИИ, являющегося активным элементом, предусмотрена схема замещения в виде последовательного соединения двух ЭДС ($E_{ИП}^{неиск}$ и $E_{ИП}^{иск}$).

Определение искажающей части любого ИИ по несимметрии напряжения производится на основе

отклонения его параметров от некоторого симметричного состояния, например для пассивных ИИ:

$$\begin{cases} F_{A(B,C)эл}^{неиск} = \frac{F_A^{эл} + F_B^{эл} + F_C^{эл}}{3}; \\ F_{фэл}^{иск} = F_{фэл}^{эл} - F_{фэл}^{неиск}. \end{cases} \quad (3)$$

В основе определения искажающих частей ИИ по отклонению напряжения лежат принципы соблюдения требуемых уровней напряжения на шинах ИП и в узлах регулирования напряжения СЭС, а также не превышения нагрузки отдельных элементов ЭС и потребителей ЭЭ допустимых или максимально разрешенных для них величин.

Так, в случае превышения потребляемой потребителем мощности выше максимально разрешенной его искажающая часть будет характеризоваться следующей проводимостью:

$$Y_{фPi}^{иск} = \Delta S_{фPi}^* / U_{фPi}^2, \quad (4)$$

где $\Delta S_{фPi}$ – часть фазной мощности i -го потребителя ЭЭ, превышающая его максимально разрешенную величину; $U_{фPi}$ – фазное напряжение i -го потребителя ЭЭ.

Отклонение фактического напряжения на шинах ИП ($E_{фИП}^{факт}$) от требуемого по режиму работы СЭС ($E_{фИП}^{неиск}$) будет характеризовать его искажающую часть:

$$E_{фИП}^{иск} = E_{фИП}^{неиск} - E_{фИП}^{факт}. \quad (5)$$

Для нашего случая максимально разрешенные мощности электрических нагрузок каждого потребителя ЭЭ указаны в табл. 2. По условию режима работы СЭС напряжение на шинах ИП должно поддерживаться $1,065 \cdot U_{ном}$. Регулирование напряжения силовым трансформатором не производится.

На основе вышеизложенных выражений и дополнительной информации о работе СЭС определены искажающие и неискажающие параметры всех ее ИИ (табл. 3 и табл. 5). В соответствии с математическими моделями (1) и (2) распределение ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП № 5 соответствует данным, приведенным в табл. 4 и табл. 6. Для более наглядного представления эти результаты графически изображены на рис. 3.

Таблица 1

Параметры режима работы СЭС		ТОП СЭС					
		1*	2*	3	4	5	6
$\underline{U}_A(\underline{U}_{AB}), В$	401,84∠30	395,33∠28,67	224,09∠-1,17	210,11∠-0,88	202,01∠-0,41	206,53∠-0,85	
$\underline{U}_B(\underline{U}_{BC}), В$	401,84∠-90	396,48∠-91,57	228,26∠-122,55	215,2∠-122,42	206,45∠-122,35	212,36∠-122,23	
$\underline{U}_C(\underline{U}_{CA}), В$	401,84∠150	394,48∠148,4	231,05∠118,53	217,66∠118,91	210,76∠119,06	213,7∠119,14	
$\delta U_y, \%$	5,75	4,06	3,54	-2,59	-6,19	-4,16	
$K_{2U}, \%$	0	0,293	0,29	0,35	0,37	0,39	
$K_{0U}, \%$	0	0	1,6	1,86	2,21	1,82	

*Примечание. Для ТОП №1 и №2 указаны значения линейных напряжений.

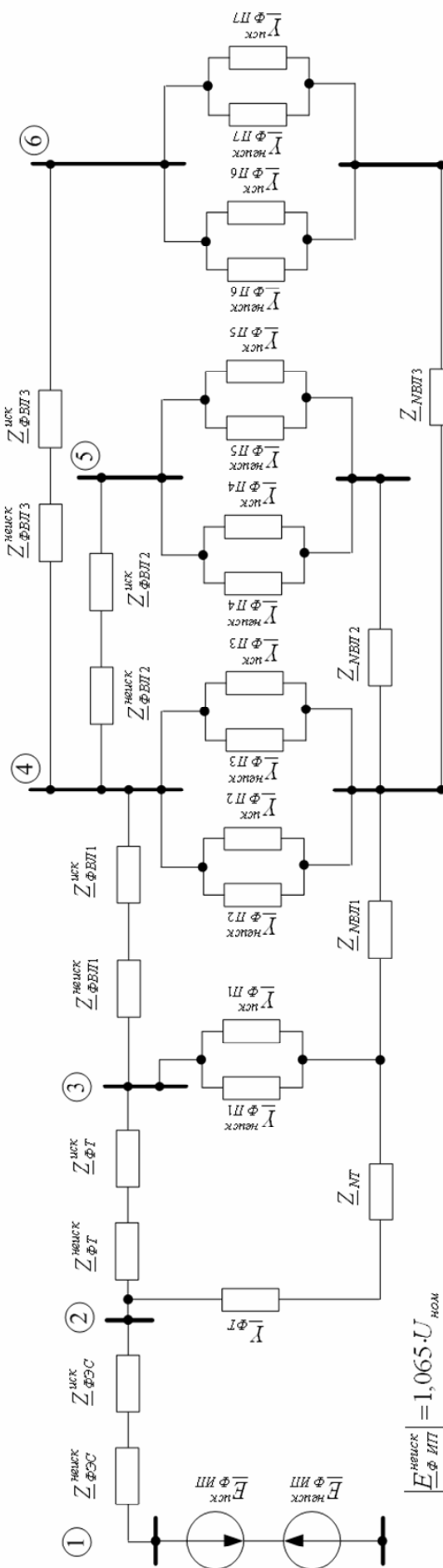


Рис. 2. Схема замещения СЭС и потребителей ЭЭ в однофазном исполнении

Таблица 2

Максимально разрешенная мощность электрической нагрузки потребителей ЭЭ	Потребители						
	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7
Мощность	8+2,5	5+2	3,5+1,5	4+1,5	7+2,2	3+1,3	3,5+1,5
$S_{\text{макс}}, \text{кВА}$							

Таблица 3

Параметры схем замещения элементов СЭС и потребителей ЭЭ для распределения ФВ по несимметрии напряжений

Схема замещения	Элементы СЭС и потребители электрической энергии												
	ЭС	T (обм.)*	T (магн.)*	В.П1*	В.П2*	В.П3*	В.ЛЗ*	П1	П2	П3	П4	П5	П6
$Z_{\text{нейск}}^A$, Ом ($Y_{\text{нейск}}^A$, См)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	(0,118 -j0,059)	(0,109 -j0,058)	(0,063 -j0,021)	(0,093 -j0,031)	(0,139 -j0,036)	(0,049 -j0,02)	(0,063 -j0,019)
$Z_{\text{нейск}}^B$, Ом ($Y_{\text{нейск}}^B$, См)	0	0	0	0	0	0	(-0,00798 +j0,0021)	(0,00227 -j0,00309)	(0,001164 -j0,00299)	(0,000011 -j0,00071)	(0,00669 -j0,00815)	(0,000488 -j0,00018)	(0,00399 -j0,00021)
$Z_{\text{нейск}}^C$, Ом ($Y_{\text{нейск}}^C$, См)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	(0,118 -j0,059)	(0,109 -j0,058)	(0,063 -j0,021)	(0,093 -j0,031)	(0,139 -j0,036)	(0,049 -j0,02)	(0,063 -j0,019)
$Z_{\text{нейск}}^N$, Ом ($Y_{\text{нейск}}^N$, См)	-j0,008	0	0	0	0	0	(0,008973 -j0,00029)	(-0,00342 -j0,00745)	(-0,00261 +j0,0024)	(0,007239 -j0,00352)	(0,002271 +j0,0067)	(-0,00592 +j0,0026)	(-0,00213 -j0,00099)
$Z_{\text{нейск}}^C$, Ом ($Y_{\text{нейск}}^C$, См)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	(0,118 -j0,059)	(0,109 -j0,058)	(0,063 -j0,021)	(0,093 -j0,031)	(0,139 -j0,036)	(0,049 -j0,02)	(0,063 -j0,019)
Z_N , Ом	-	≈0	-	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0

*Примечание. Силовой трансформатор и ВЛ приняты симметричными элементами.

Таблица 4

Распределение ФВ линейных III в искажене напряжений по несимметрии напряжений

ПОТ	ПКЭ	Напряжения симметричных составляющих														
		ФВ i-го III в несимметрию напряжений							ФВ i-го III в несимметрию напряжений							
Напряжение нулевой послед., В/град		ЭС	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	Σ						
Математическая модель, основанная на принципе наложения III		$ U_0 $	4,9·10 ⁻⁷	1,125	1,336	0,363	1,522	3,138	0,982	4,57	1,522	3,138	0,982	4,57		
5	K_{0U} , %	2,21	142,3	2,68	49,42	-162,52	175,32	82,07	141,12	-97,23	142,3	141,12	-97,23	142,3		
Математическая модель, основанная на принципе исключения III		$ U_0 $	7·10 ⁻⁴	1,125	1,337	0,363	1,524	3,138	0,983	4,569	1,524	3,138	0,983	4,569		
5	K_{0U} , %	2,21	142,3	167,27	49,43	-162,49	175,35	82,02	141,1	-97,21	142,3	141,1	-97,21	142,3		

Таблица 5

Параметры схем замещения элементов СЭС и потребителей ЭЭ для распределения ФВ по отклонению напряжения

Схема замещения	Элементы СЭС и потребители электрической энергии												
	ЭС	Т (обм.)*	Т (магн.)*	В.Л.*	В.Л2*	В.Л3*	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7
$Z_{\text{ниск}}^A, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{ниск}}^A, \text{ См}$)	0,008 +j0,048	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	(0,11 -j0,049)	(0,111 -j0,045)	(0,064 -j0,024)	(0,093 -j0,031)	(0,145 -j0,044)	(0,05 -j0,021)	(0,067 -j0,019)
$Z_{\text{иск}}^A, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{иск}}^A, \text{ См}$)	0	0	0	0	0	0	(-j0,00697)	(-j0,016)	0	0	0	0	0
$Z_{\text{ниск}}^B, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{ниск}}^B, \text{ См}$)	0,008 +j0,04	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,127 -j0,048	0,106 -j0,043	0,06 -j0,019	0,094 -j0,035	0,141 -j0,029	0,043 -j0,018	0,061 -j0,02
$Z_{\text{иск}}^B, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{иск}}^B, \text{ См}$)	0	0	0	0	0	0	(-j0,01)	(-j0,0073)	0	(0,0059)	0	0	0
$Z_{\text{ниск}}^C, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{ниск}}^C, \text{ См}$)	0,008 +j0,056	0,00105 +j0,0072	(0,001375 -j0,0021)	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	0,117 -j0,047	0,106 -j0,042	0,064 -j0,021	0,086 -j0,029	0,13 -j0,034	0,055 -j0,023	0,061 -j0,018
$Z_{\text{иск}}^C, \text{ Ом}$ ($Y_{\text{иск}}^C, \text{ См}$)	0	0	0	0	0	0	(0,014)	(0,00453 -j0,002)	0	0	0	0	0
$Z_N, \text{ Ом}$	-	≈0	-	0,1134 +j0,031	0,1576 +j0,0276	0,1379 +j0,0242	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0

*Примечание. Силовый трансформатор и ВЛ приняты симметричными элементами.

Таблица 6

Распределение ФВ линейных ШИ в искажение напряжений по отклонению напряжения

ПОЭ	ПКЭ	Отклонение напряжения по прямой последовательности												
		ФВ i-го исключенного ШИ в отклонение напряжений							Σ					
		Отклонение напряжения от нижней нормально допустимой границы, В/град												
		Математическая модель, основанная на принципе наложения ШИ												
5	$\delta U_y, \%$ -6,19	$U_{\text{нм}}^{\text{н0}} - U_1 $ - $\text{arg}(U_1)$	2,615	0,12	0,423	0	0,122	0	0	0	0	0	0	2,575
			178,8	178,68	129,12	0	-161,52	0	0	0	0	0	0	171,84
5	$\delta U_y, \%$ -6,19	$U_{\text{нм}}^{\text{н0}} - U_1 $ - $\text{arg}(U_1)$	2,615	0,119	0,423	0	0,121	0	0	0	0	0	0	2,57
			178,8	178,76	129,17	0	-161,68	0	0	0	0	0	0	171,9

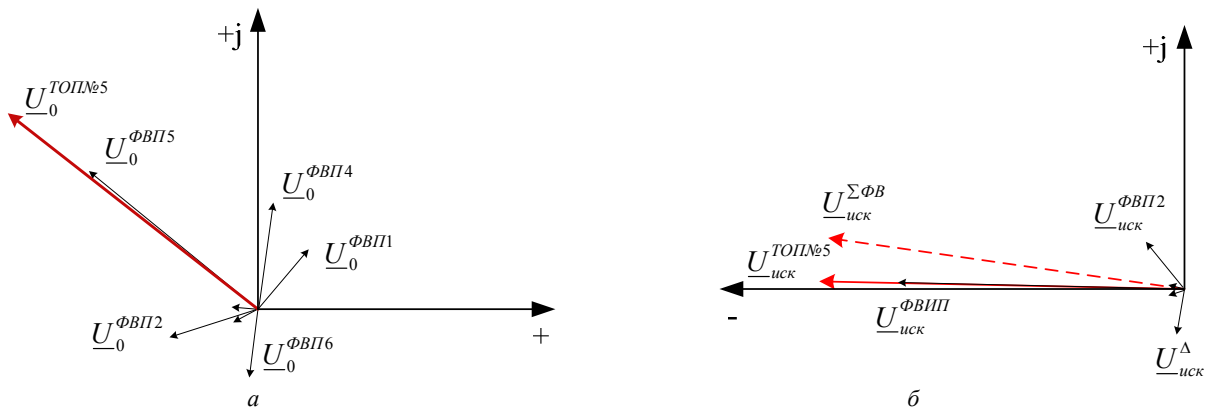


Рис. 3. Графическое представление распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП № 5 на основе математической модели (1): а) по несимметрии напряжений; б) по отклонению напряжения

Оценим расхождение результатов распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП №5, полученных на основе (1) и (2) математических моделей, по относительному среднеквадратичному отклонению:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left[\operatorname{Re}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) - \operatorname{Re}(U_{\text{иск}(2)}^{\Phi B i}) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) - \operatorname{Im}(U_{\text{иск}(2)}^{\Phi B i}) \right]^2 \right\}}{\sum_{i=1}^n \left[\operatorname{Re}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(U_{\text{иск}(1)}^{\Phi B i}) \right]^2} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где n – общее количество ИИ; символы «1» и «2» соответствуют математической модели (1) или (2) соответственно.

В нашем случае δ по несимметрии напряжений составляет $6,4 \cdot 10^{-5} \%$, а по отклонению напряжения – $8,1 \cdot 10^{-4} \%$. Данные цифры позволяют сделать вывод об эквивалентности (1) и (2) математических моделей и, соответственно, их произвольном выборе для решения задачи распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП.

Проведем анализ полученных распределений ФВ. Во-первых, распределение ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП является векторной (двухмерной) величиной. Очевидно, что в таком виде ФВ не может быть использован для распределения финансовых компенсаций за понижение КЭ и необходимым является разработка соответствующего одномерного критерия. Положим в основу одномерного критерия распределения ФВ скалярное произведение ФВ в векторном виде:

$$\alpha_i = \left\langle U_{\text{иск}}^{\Phi B ИИ i}, U_{\text{иск}}^{\text{ТОП}} \right\rangle;$$

$$\Phi B_{ИИ i} = \left[\frac{|\alpha_i|}{\sum_{i=1}^n |\alpha_i|} \right] \cdot 100\%. \quad (7)$$

Такой подход означает, что данный критерий оценивает ФВ по проекциям векторных ФВ $U_{\text{иск}}^{\Phi B ИИ i}$ на суммарный вектор искажения напряжения в ТОП $U_{\text{иск}}^{\text{ТОП}}$. Опуская модуль для $|\alpha_i|$ в выражении (7) можно дополнительно учесть эффект компенсации напряжений искажения, вносимых отдельными ИИ. В рассматриваемом нами случае этот эффект наиболее

наглядно демонстрируют векторы $U_0^{\Phi B П 4}$ и $U_0^{\Phi B П 6}$ (рис. 3,а).

Во-вторых, в искажение напряжений в ТОП №5 принимают участие все ИИ СЭС. При этом ФВ ИИ, находящихся за пределами ТОП №5, может быть соизмерим или больше ФВ ИИ подключенных непосредственно к рассматриваемой ТОП.

В-третьих, возможна невязка ФВ ($U_{\text{иск}}^{\Delta} = U_{\text{иск}}^{\text{ТОП} \# 5} - U_{\text{иск}}^{\Sigma \Phi B}$) между всеми ИИ (рис. 3,б), которая обусловлена не учетом или неточностью определения искажающих частей некоторых ИИ. Для ее устранения достаточно сгруппировать неизвестные или неточно определенные ИИ, принадлежащие одному субъекту энергорынка, например, СЭС, и определить их суммарный ФВ путем исключения из общего уровня искажения напряжений в ТОП:

$$U_{\text{иск}}^{\Phi B СЭС} = U_{\text{иск}}^{\text{ТОП} \# 5} - U_{\text{иск}}^{\Sigma \Phi B П i}. \quad (8)$$

На основе вышеизложенного одномерное распределение ФВ по несимметрии напряжений в ТОП №5 будет составлять:

$\Phi B_{ИИ i}, \%$	ЭС	П1	П2	П3
	$8,6 \cdot 10^{-6}$	1,0	13,43	5,36
	П4	П5	П6	П7
	13,31	55,24	8,77	2,9

Предполагая, что искажающие части ИИ со стороны потребителей ЭЭ определены точно, а искажающие части ИИ со стороны элементов СЭС сгруппированы одномерное распределение ФВ по отклонению напряжения в рассматриваемой ТОП составит:

$\Phi B_{ИИ i}, \%$	СЭС	П1	П2	П3
	80,64	4,46	10,56	0
	П4	П5	П6	П7
	4,34	0	0	0

Из полученных результатов следует, что наибольшая часть выплат по компенсации экономических убытков для субъектов энергорынка в ТОП №5 от несимметрии напряжений ложится на потребителей ЭЭ П5 (55,24 %) и П2 (13,43 %), а от отклонения напряжения – на СЭС (80,64 %) и потребителя ЭЭ П2 (10,56 %).

Выводы. Математические модели определения ФВ линейных источников ИИ в искажение напряже-

ний в ТОП, основанные на принципах наложения и исключения, являются эквивалентными. Для оценки степени участия каждого ИИ в искажение напряжений в ТОП и распределения финансовой компенсации потерпевшей стороне между всеми ИИ разработан одномерный критерий распределения ФВ, в основе которого лежит скалярное произведение векторов. Не учет группы ИИ, принадлежащей одному субъекту энергорынка, позволяет определить их суммарный ФВ как невязку распределения ФВ между всеми ИИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения. – Препринт – 253 ИЭД АН УССР. – К., 1981. – 49 с.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии // Энергосбережение. – 2004. – №1. – С. 66-69.
4. Sayenko Yu., Kalyuzhnyi D. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2015. – vol.11. – pp. 81-85. doi: 10.15199/48.2015.11.23.
5. Саенко Ю.Л., Калужный Д.Н. Принцип наложения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения // Электрифікація транспорту. – 2015. – №10. – С. 124-128.
6. Саенко Ю. Л., Калужный Д. Н. Принцип исключения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2015. – №167. – С. 31-33.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Введ. 1999-01-01. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 33 с.
8. Калужный Д. Н. Представление линейных источников искажений в математических моделях распределения их фактических вкладов в искажение напряжений в точке общего присоединения // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 11. – С. 19-25.

REFERENCES

1. Shidlovskiy A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. *Ekonomicheskaya otsenka posledstviy s nizheniia kachestva elektricheskoy energii v sovremennukh sistemakh elektrosnabzheniia* [Economic evaluation of the effects of reducing the quality of electricity in modern power supply systems]. Kiev, IED AN USSR Publ., 1981. 49 p. (Rus).
2. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Kachestvo elektroenergii na promyshlennukh predpriatiakh* [Power quality in industrial plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p. (Rus).
3. Chepmen D. Price of low power quality. *Energoberezhenie - Energy Saving*, 2004, no.1, pp. 66-69. (Rus).
4. Sayenko Yu., Kalyuzhnyi D. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2015, vol.11, pp. 81-85. doi: 10.15199/48.2015.11.23.
5. Saenko Yu.L., Kalyuzhnyi D.N. Superposition principle in mathematical models of the factual contribution distribution of

linear sources of distortion in voltage distortion at the point of common coupling. *Elektrifikatsiya transporta - Electrification of transport*, 2015, no.10, pp. 123-133. (Rus).

6. Saenko Yu. L., Kalyuzhnyi D. N. Exclusion principle in mathematical models of distribution of the factual contribution of the linear source of distortion in voltage distortion at the point of common coupling. *Visnik Harkivskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka - Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2015, no.167, pp. 31-33. (Rus).
7. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Trebovaniya k kachestvu elektricheskoy energii v elektricheskikh setyah obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electric Energy. Requirements for the power quality in electric networks of general purpose]. Kiev, Gosstandart Ukrainy Publ., 1999. 33 p. (Rus).
8. Kalyuzhnyi D.N. Presentation of linear sources of distortion in the mathematical models of their factual contribution distribution in voltage distortion at the point of common coupling. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit – Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2015, no.11, pp. 19-25. (Rus).

Поступила (received) 13.01.2016

Саенко Юрий Леонидович¹, д.т.н., проф.,
Калужный Дмитрий Николаевич², к.т.н., доц.,
¹ Приазовский государственный технический университет,
87500, Мариуполь, ул. Университетская, 7,
тел/phone +38 0629 446551, e-mail: YuriSayenko@mail.ru
² Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12,
тел/phone +38 050 5606835, e-mail: KalyuzhnyiDN@mail.ru

Yu.L. Saenko¹, D.N. Kalyuzhnyi²

¹ Pryazovskyi State Technical University,
7, Universytets'ka Str., Mariupol, 87500, Ukraine.

² O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv,
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Numerical analysis of mathematical models of the factual contribution distribution in asymmetry and deviation of voltage at the common coupling points of energy supply systems.

Purpose. Perform numerical analysis of the distribution of the factual contributions of line sources of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling, based on the principles of superposition and exclusions. **Methodology.** Numerical analysis was performed on the results of the simulation steady state operation of power supply system of seven electricity consumers. **Results.** Mathematical model for determining the factual contribution of line sources of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling, based on the principles of superposition and exclusions, are equivalent. To assess the degree of participation of each source of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling and distribution of financial compensation to the injured party by all sources of distortion developed a one-dimensional criteria based on the scalar product of vectors. Not accounting group sources of distortion, which belong to the subject of the energy market, to determine their total factual contribution as the residual of the factual contribution between all sources of distortion. **Originality.** Simulation mode power supply system was carried out in the phase components space, taking into account the distributed characteristics of distortion sources. **Practical value.** The results of research can be used to develop methods and tools for distributed measurement and analytical systems assessment of the power quality. References 8, tables 6, figures 3.

Key words: power quality, factual contribution, point of common coupling, voltage asymmetry, voltage deviation.