

А.И. Дорошенко, канд. техн. наук,
Н.К. Динь, Г.И. Нигрецул, Е.А. Шевчук

АНАЛИЗ СОБСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Викладається сутність методики, що пропонується для аналізу власної електромагнітної обстановки в системі електропостачання загального призначення з наявним нелінійним навантаженням.

Излагается сущность методики, которая предлагается для анализа собственной электромагнитной обстановки в системе электроснабжения общего назначения при наличии нелинейной нагрузки.

The original method of analyze of electro-magnetic field in power system with higher harmonics from non-linear loads is proposed.

Свойства электрической энергии (ЭЭ) обусловили ей широкое применение во всех сферах человеческой деятельности. Эту энергию можно рассматривать в двух аспектах: как физическое явление и как товар, который продается и покупается на энергорынке. Сущность таких определений приводится в [3].

Как физическое явление ЭЭ представляет собой энергию продольно-поперечной поляризации упругой диэлектрической среды, окружающей все токоведущие части электроэнергетической системы (ЭЭС) – энергию ее электромагнитного поля.

Как товарная продукция ЭЭС ЭЭ является работой, которую выполняют генераторы электростанций системы для создания тока проводимости в ее токоведущих частях и тока смещения в упругой диэлектрической среде, которая окружает указанные части.

Из [1] известно: что электромагнитная энергия от места ее генерирования передается к месту потребления по диэлектрику (*провода же в линиях передачи выполняют двойную роль*: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике).

Потребители ЭЭ (юридические лица) получают ее от ЭЭС с помощью индивидуальных систем электроснабжения (СЭС), являющихся ее неотъемлемой технологической

частью. Поскольку все технологические процессы в таком объединении происходят практически одновременно, то качество ЭЭ как товара, имеет немаловажное значение в рыночных отношениях между поставщиками и потребителями ЭЭ. Поэтому утвержден и действует на государственном уровне нормативный документ, регламентирующий нормативные показатели качества ЭЭ в СЭС общего назначения [2]. Можно видеть, что подавляющее большинство таких показателей качества ЭЭ являются показателями качества напряжения – первопричины создания электромагнитного поля системы.

При этом предполагается, что в СЭС общего назначения имеются электроприемники (ЭП) с различным характером нагрузки, в том числе с нелинейным сопротивлением (например, вентильные преобразователи). Как известно, ток нагрузки этих ЭП имеет несинусоидальный характер. Поэтому их рассматривают как источники помех в электромагнитном поле не только в конкретной СЭС, где они применяются как преобразователи ЭЭ в другие виды энергии для выполнения полезной работы, но и в ЭЭС в целом.

Принципиальная схема СЭС общего назначения, в которой для компенсации реактивных нагрузок применяются конденсаторные установки (КУ) – Q_{KH} , показана на рис.1.

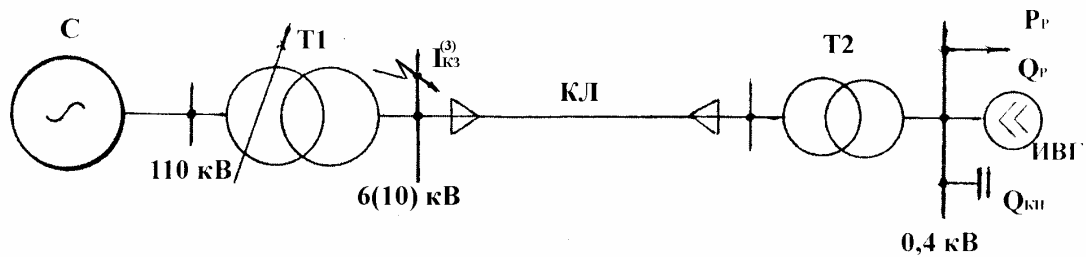


Рис.1. Принципиальная схема СЭС общего назначения

Поскольку в СЭС электроэнергия передается всем ЭП с помощью общего электромагнитного поля, то ЭП с нелинейным характером нагрузки искажают синусоидальность поверхности волны энергии такого поля. Это приводит к нарушению нормального режима работы не только упомянутых выше устройств, но и устройств компенсации реактивной нагрузки (УКРН), без которых не возможна работа ни одной электроэнергетической системы.

Таким образом, в СЭС общего назначения создается электромагнитная обстановка (ЭМО), при которой появляется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) отдельных ее элементов (в частности, вентиляльных преобразователей и УКРН). Такую ЭМС упомянутых устройств в СЭС общего назначения с источниками электромагнитных искажений можно назвать собственной, так как она создается своими собственными элементами.

Как известно, литература по вентиляльным преобразователям не содержит каких-либо рекомендаций по улучшению электромагнитной совместимости таких преобразователей в СЭС общего назначения, например, с УКРН [6].

Рассчитывая режимы электропотребления СЭС с нелинейными нагрузками, применяют чисто математический гармонический метод расчета, при котором такие нагрузки условно представляются источниками тока высших гармоник (ВГ).

При некоторых значениях токов ВГ нарушается синусоидальность напряжения системы, что приводит также к увеличению активных потерь в цепях питания ЭП с линейным характером сопротивления. Учитывая электромагнитный характер взаимодействия отдельных ЭП с электромагнитным полем

СЭС (и с полем ЭЭС, в целом), можно говорить о их ЭМС в таких системах [8].

Цель данной работы – разработать простую, доступную широкому кругу потребителей ЭЭ методику, которая позволяет простыми доступными средствами оценить возможность ЭМС УКРН и вентиляльных преобразователей в системе общего назначения.

Согласно [7] под ЭМС понимают способность электротехнических средств или их элементов нормально функционировать в данной электромагнитной среде, не внося недопустимых электромагнитных помех в эту среду и не испытывая таковых с ее стороны.

Уровень ЭМС как явления характеризуется ЭМО. В конкретной ЭЭС ЭМО определяется схемой замещения этой системы (ее активными и реактивными сопротивлениями, возможностью возникновения резонансных явлений) и характеристикой режима нелинейной нагрузки (спектром токов ее ВГ).

Расчетная схема замещения СЭС общего назначения, параметры элементов которой определяются по известным формулам, показана на рис. 2.

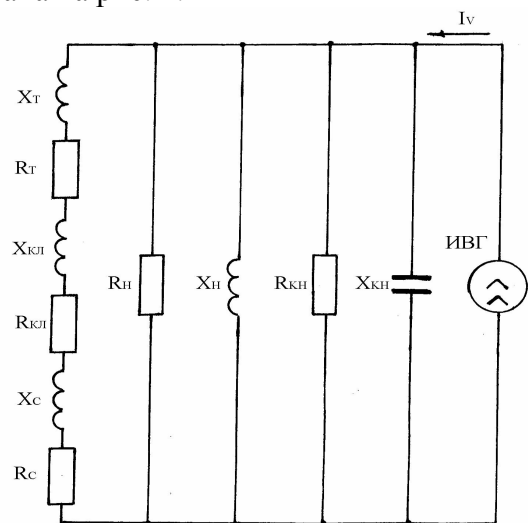


Рис.2. Схема замещения СЭС

Для анализа ЭМО схема замещения системы общего назначения представляется ее частотной характеристикой (Z_3) как зависимость полного эквивалентного сопротивления схемы замещения от номера рассматриваемой гармоники $Z_3 = f(V)$. При этом учитывается зависимость ее активных и реактивных сопротивлений от частоты при параллельной схеме их соединения.

Преобразование схемы замещения по рис.2 начинается с замены последовательного соединения элементов ветви питания потребителя на параллельное. При этом используются соотношения, известные из теории анализа электрических цепей.

Активное эквивалентное сопротивление параллельной схемы ветви питания Ом, определяется по формуле

$$R_{Э1} = \frac{g_1}{y_1^2}, \quad (1)$$

где g_1 и y_1 – проводимости последовательной схемы, См, соответственно активная и полная.

Реактивное эквивалентное сопротивление параллельной схемы ветви питания Ом,

$$X_{Э1} = \frac{b_1}{y_1^2}, \quad (2)$$

где b_1 – индуктивная реактивная проводимость последовательной схемы, См.

Активное сопротивление цепи конденсаторной установки, Ом,

$$R_{KH} = \frac{U_{НОМ}^2}{\Delta p_{KH} Q_{KH}}, \quad (3)$$

где $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение конденсаторов, кВ; Δp_{KH} – удельные активные потери конденсаторов, кВт/Мвар; Q_{KH} – номинальная мощность конденсаторов, Мвар.

Реактивное сопротивление параллельной цепи конденсаторов, Ом,

$$X_{KH} = -\frac{U_{НОМ}^2}{Q_{KH}}. \quad (4)$$

После этого выполняется окончательное эквивалентирование расчетной схемы замещения по известным соотношениям:

активное сопротивление, Ом,

$$R_3 = \frac{R_{Э1} R_H R_{KH}}{R_{Э1} R_H + R_H R_{KH} + R_{Э1} R_{KH}}. \quad (5)$$

индуктивное сопротивление, Ом,

$$X_{L3} = \frac{X_{Э1} X_H}{X_{Э1} + X_H}. \quad (6)$$

емкостное сопротивление, Ом,

$$X_{C3} = X_{KH}. \quad (7)$$

Преобразованная таким образом схема замещения СЭС общего назначения показана на рис.3.

Активное сопротивление этой схемы на частоте V -й гармоники определяется по методике, изложенной в [4], Ом:

$$R_{3V} = R_3 k_{II}, \quad (8)$$

где k_{II} – коэффициент поверхностного эффекта на частоте V -й гармоники, о.е.

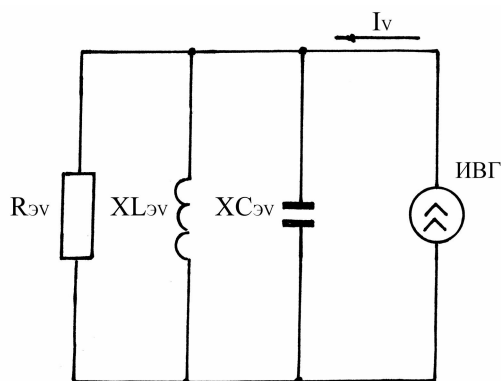


Рис.3. Преобразованная схема замещения СЭС

Индуктивное реактивное сопротивление на частоте V -й гармоники, Ом,

$$X_{L3V} = X_{L3} V, \quad (9)$$

где V – порядковый номер рассматриваемой гармоники тока.

Емкостное реактивное сопротивление, Ом,

$$X_{C3V} = \frac{X_{C3}}{V}. \quad (10)$$

Можно рассчитать номер резонансной гармоники тока СЭС, который определяется соотношением ее реактивных сопротивлений:

$$V_P = \sqrt{\frac{X_{C3}}{X_{L3}}}, \quad (11)$$

где X_{C3} – емкостное реактивное сопротивление,

ление конденсаторной установки, которая применяется в СЭС для компенсации ее реактивной нагрузки, на частоте первой гармоники, Ом; $X_{LЭ}$ – эквивалентное индуктивное реактивное сопротивление схемы замещения СЭС на частоте первой гармоники, Ом.

Дальнейшее преобразование схемы замещения (рис.3) заключается в замене параллельного соединения элементов этой схемы замещения последовательным. Для этого на частоте V -й гармоники определяют проводимости схемы, См:

активную

$$G_{ЭV} = \frac{1}{R_{ЭV}}, \quad (12)$$

реактивную

$$B_{ЭV} = \frac{V^2 X_{LЭЭ} + X_{CЭЭ}}{V X_{LЭЭ} X_{CЭЭ}}, \quad (13)$$

полную

$$Y_{ЭV} = \sqrt{G_{ЭV}^2 + B_{ЭV}^2}. \quad (14)$$

Полное сопротивление СЭС на частоте V -й гармоники, Ом,

$$Z_{ЭV} = \frac{1}{Y_{ЭV}}. \quad (15)$$

Окончательно преобразованная схема замещения СЭС показана на рис.4.

Спектр и величину токов ВГ их источников в конкретной СЭС общего назначения можно определить расчетом или измерениями.

При расчете необходимо исходить из того, что объемные импульсы электромагнитной энергии поля ЭП с нелинейной нагрузкой при переменном токе имеют несинусоидальную (искаженную) поверхность. Поскольку энергия их электромагнитного поля является частью энергии общего электромагнитного поля СЭС и ЭЭС, то такие искажения возможны и, в целом, по этим системам.

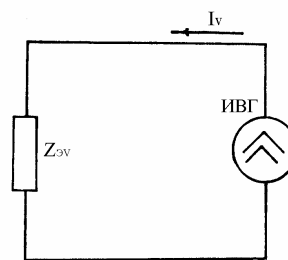


Рис.4. Схема замещения СЭС общего назначения для расчета ЧХ

Из [5] известно, что эти искажения обусловлены реактивной нагрузкой ЭП с нелинейным сопротивлением (например, вентиляльными преобразователями), которые условно можно считать источником энергии помех. При этом реактивная нагрузка СЭС общего назначения квар, определяется по выражению

$$Q_P = \sum_{V=1}^k Q_V = 3 \cdot 10^{-3} \sum_{V=1}^{40} I_V^2 X_V, \quad (16)$$

где k – порядковый номер последней учитываемой гармоники; I_V – условный ток V -й гармоники, на которые, согласно гармоническому методу математического расчета, раскладывается несинусоидальный ток ЭП с нелинейной нагрузкой, А.

В соответствии с [2] принимается $k = 40$ ед. Спектр гармоник тока зависит от технологической особенности ЭП. Например, для преобразователя тока, вентили которого собраны по схеме трехфазного моста, спектр гармоник состоит только из канонических гармоник. Их порядковый номер определяется по выражению

$$V = 6n \mp 1, \quad (17)$$

где n – ряд натуральных чисел в интервале значений $1 \dots 40$.

Исходя из сказанного, расчетный эквивалентный ток ЭП с нелинейным характером нагрузки А,

$$I_{ЭV} = I_P \sin \phi_P = \sqrt{\sum_{V=1}^{40} I_V^2}, \quad (18)$$

где I_P – действующее значение расчетного тока нелинейной нагрузки, А; ϕ_P – значение фазового угла тока нелинейной нагрузки в рассматриваемый момент времени, град.

С учетом соотношения (13) действующее значение тока каждой гармоники А,

$$I_V = \frac{I_P \sin \varphi_P}{V} = \frac{I_{P1}}{V}, \quad (19)$$

где I_{P1} – реактивный расчетный ток нелинейной нагрузки на первой гармонике при условии синусоидальности напряжения, А.

Если известна величина измеренного тока, можно определить коэффициенты подобия. Коэффициент подобия тока первой гармоники,

$$k_{PI} = \frac{I_{P1}}{I_{ЭВ}}. \quad (20)$$

Коэффициенты подобия токов ВГ,

$$k_{IV} = \frac{I_V}{I_{P1}}. \quad (21)$$

Токи гармоник СЭС общего назначения в расчетном режиме определяются с помощью указанных коэффициентов подобия. расчетный ток первой гармоники, А,

$$I_{P1} = K_{PI} I_P, \quad (22)$$

расчетный ток V -й гармоники, А,

$$I_{PV} = k_{IV} I_{P1}. \quad (23)$$

В качестве примера рассмотрим СЭС потребителя, принципиальная схема электроснабжения которого показана на рис.1.

Трансформатор $TM - 630/10$ имеет параметры: $\beta_T = 0,7$; $\cos \varphi = 0,8$; $U_1 = 10,5$ кВ; $U_2 = 0,4$ кВ; $U_K = 5,5$ %, $\Delta P_K = 7,6$ кВт.

Вентильный преобразователь – трехфазный выпрямительный мост

$$P_{II} = 200 \text{ кВт}; \cos \varphi_{II} = 0,92 \text{ о.е.}$$

Кабельная линия 10 кВ

$$ААШв - 10(3 \times 70); L_{KL} = 1,0 \text{ км};$$

$$r_0 = 0,443 \text{ Ом/км}; x_0 = 0,086 \text{ Ом/км.}$$

Электроэнергетическая система:

$$I_{K3}^{(3)} = 8,0 \text{ кА.}$$

Конденсаторная установка (КУ):

$$Q_{KH} = 180 \text{ квар.}$$

Необходимо рассмотреть собственную электромагнитную обстановку (без влияния внешних факторов) в нормальном режиме работы СЭС.

Параметры схемы замещения на частоте канонических гармоник после описанных выше преобразований приведены в табл.1.

Таблица 1.

Параметры схемы замещения СЭС

V ,	k_{PI} ,	R_V ,	X_V ,	Z_V ,
ед.	о.е.	Ом	Ом	Ом
1	1,00406	0,06082	0,01626	0,01571
5	1,02772	0,06225	0,14491	0,05720
7	1,04177	0,06310	0,93274	0,06296
11	1,06477	0,06450	-0,01967	0,05923
13	1,08079	0,06547	-0,10196	0,05509
17	1,12790	0,06779	-0,06476	0,04683
19	1,14487	0,06884	-0,05531	0,04312
23	1,17643	0,07080	-0,04319	0,03687
25	1,19122	0,07171	-0,03903	0,03428
29	1,22970	0,07385	-0,03282	0,02999
31	1,25034	0,07512	-0,03044	0,02821
35	1,28979	0,07754	-0,02661	0,02517
37	1,30869	0,07870	-0,02534	0,02386

Реактивное емкостное сопротивление КУ на частоте первой гармоники

$$X_{KV} = X_{CЭ} = -\frac{0,4^2}{0,18} = -0,88889 \text{ Ом.}$$

Реактивное индуктивное эквивалентное сопротивление схемы замещения после ее частичного преобразования на частоте первой гармоники $X_{LЭ} = 0,01597$ Ом. Поэтому, по выражению (11), номер резонансной гармоники

$$V_P = \sqrt{\frac{0,88889}{0,01597}} = 7,46 \text{ ед.}$$

Полное сопротивление на частоте V -й гармоники определяется, Ом

$$Z_V = Z_{Э} = \sqrt{R_V^2 + X_V^2}. \quad (24)$$

На рис. 5 показана частотная характеристика СЭС общего назначения, построенная с применением предлагаемой методики для упомянутого выше примера.

Согласно требованию [2], измерение токов ВГ производится не менее девяти раз. Значения измеренных токов в исследуемой СЭС приведены в табл.2. Там же определены

их матожидание и коэффициенты подобия: первой гармоники по выражению (18) и высших гармоник по выражению (19).

Используя частотную характеристику СЭС и расчетные значения тока гармоник преобразователя, можно определить:

– коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{V=2}^{40} U_V^2}}{U_1} \cdot 100; \quad (25)$$

– коэффициент V -й гармонической составляющей напряжения, %

$$K_{UV} = \frac{U_V}{U_1} \cdot 100. \quad (26)$$

В табл.2 приведены значения токов ВГ, которые измерены в 2009 г. на действующей ТП-8 ОАО “Одескабель” с помощью измерительного прибора “ANALIST – 2000A” фирмы LEM. Значениями коэффициентов подобия, которые определены по результатам этих измерений можно пользоваться для определения величины тока гармоник при любом другом расчетном токе преобразователя, принимая его в качестве эквивалентного тока этого преобразователя.

Используя эти данные и численные значения напряжения гармоник, с помощью излагаемой методики и [5], можно определить перегрузки конденсаторов по току, напряжению и по мощности: перегрузка по току, %,

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{V=1}^{40} I_{KV}^2}}{I_{НОМ.К}} \cdot 100, \quad (27)$$

где I_{KV} – ток V -й гармоники в конденсаторах, А; $I_{НОМ.К}$ – номинальный ток конденсаторов, А; перегрузка по напряжению, %,

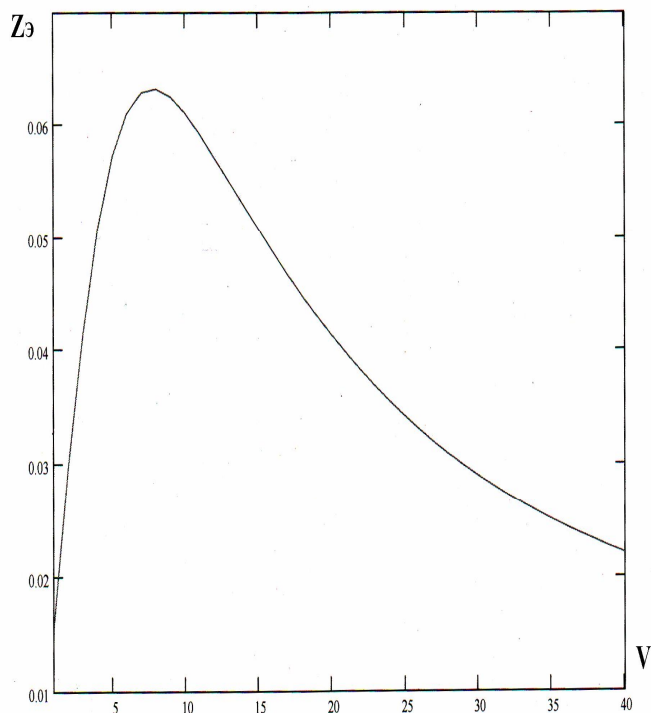


Рис. 5. Частотная характеристика СЭС, рассматриваемой в примере

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{V=1}^{40} U_V^2}}{U_{НОМ.К}} \cdot 100, \quad (28)$$

где U_V – напряжение V -й гармоники на конденсаторах, кВ; $U_{НОМ.К}$ – номинальное напряжение конденсаторов, кВ; перегрузка по мощности, %,

$$K_Q = \frac{3 \sum_{V=1}^{40} U_V I_{KV}}{Q_{НОМ.К}} \cdot 100, \quad (29)$$

где $Q_{НОМ.К}$ – номинальная мощность конденсаторов, квар.

Такая оценка собственной электромагнитной обстановки в СЭС общего назначения позволяет оценить возможность нормального функционирования ее конденсаторных установок.

Измерения гармоник тока преобразователя, А

V ,	Порядковые номера измерений									M_{IV} ,	k_{IV} ,
	ед.	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	123,0	145,9	180,0	278,1	327,3	245,4	212,6	163,6	98,2	197,1	0,96287
5	23,6	27,9	34,5	53,3	62,7	47,0	40,7	31,3	18,8	37,8	0,19178
7	16,7	19,8	24,5	37,7	44,4	33,3	28,8	22,2	13,3	26,7	0,13546
11	10,4	12,4	15,2	23,6	27,7	20,8	18,0	13,9	8,3	16,7	0,08473
13	8,7	10,4	12,8	19,8	23,3	17,5	15,1	11,6	7,0	14,0	0,07103
17	6,7	7,9	9,8	15,1	17,7	13,3	11,5	8,9	5,3	10,7	0,05428
19	6,0	7,2	8,8	13,7	16,1	12,1	10,4	8,0	4,8	9,7	0,04921
23	5,0	5,9	7,3	11,3	13,3	10,0	8,6	6,6	4,0	8,0	0,04059
25	4,6	5,4	6,7	10,4	12,2	9,1	7,9	6,1	3,7	7,3	0,03704
29	4,0	4,7	5,8	9,0	10,5	7,9	6,8	5,3	3,2	6,4	0,03247
31	3,7	4,4	5,5	8,5	10,0	7,5	6,5	5,0	3,0	6,0	0,03044
35	3,3	4,0	4,9	7,5	8,9	6,6	5,8	4,4	2,7	5,3	0,02689
37	3,1	3,7	4,6	7,1	8,3	6,2	5,4	4,2	2,5	5,0	0,02537
I_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	204,7	-

Как показывают расчеты, в случае нашего примера, перегрузка КУ только лишь током 11-й гармоники, создаваемой вентиляльным преобразователем, составляет 73 % от ее номинального тока. Таким образом, ЭМО в нашей СЭС не способствует условию ее ЭМС. Поэтому необходимо рассматривать вопрос о возможности использования КУ, мощность которой определена по экономическим соображениям, в качестве пассивных резонансных фильтров.

Выводы

1. Ссылаясь на межгосударственный ГОСТ 30372-95, который действует в Украине с 01.01.1997 г., можно сделать вывод о том, что собственной ЭМС в СЭС общего назначения является способность к нормальному функционированию в ней ее собственных устройств компенсации реактивных нагрузок.

2. Критериями собственной ЭМС СЭС общего назначения служат ее частотная характеристика, номер резонансной гармоники, а также спектр и величина токов ВГ нелинейной нагрузки.

3. Достаточным условием собственной ЭМС СЭС общего назначения является отсутствие совпадения резонансной частоты с номером любой гармоники из их спектра в токе нелинейной нагрузки.

4. Необходимые условия собственной ЭМС СЭС общего назначения – требования: допустимые перегрузки конденсаторов устройств компенсации ее реактивных нагрузок по мощности не должны превышать их номинальных значений более чем на 41 %; по напряжению – не более чем на 10 %; по току – не более чем на 28,8 %.

Список использованной литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники /Бессонов Л.А. Изд. 6-е. Учеб. для студентов высших энергетических и электротехнических вузов. – М.: Высш. шк., 1973. – 752 с.

2. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – К.: ГОССТАНДАРТ УКРАИНЫ, 1999.– 31с.

3. Дорошенко О.І. Що таке електрична енергія? /Дорошенко О.І. //Промелектро.– 2009.– № 3.–С. 10– 15.

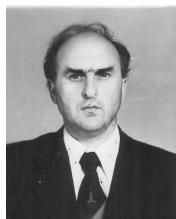
4. Дорошенко А.И. Учет активного сопротивления при расчете систем электроснабжения с несинусоидальными токами /Дорошенко А.И., Н.К. Динь, Е.В. Грачевская // Электромашинобуд. та електрообладнан. – 2008. – Вып.71. – С. 38–41.

5. Дорошенко А.И. Допустимая перегрузка конденсаторов в системе электроснабжения общего назначения /Дорошенко А.И., Н.К. Динь, О.Л. Иванова //Электромашинобуд. та електрообладнан. – 2009. – Вып.74. – С. 57 – 62.

6. Тиристорные преобразователи высокой частоты /Е.И.Беркович, Г.В.Ивенский, Ю.С. Иоффе и др. Энергия, 1973. – 200 с.

7. Управление качеством электроэнергии /И.И.Карташев, В.Н.Тульский, Р.Г.Шамонов и др.; под.ред. Ю.В.Шарова. – М.: Изд-во дом МЭИ, 2006. – 320 с.

8. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике /Харлов Н.Н. Уч. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.



Дорошенко
Александр Иванович,
канд. техн. наук, доц. каф.
электроснабжения
Одес. национ. политехн. у-та
тел. 7-34-85-48 (раб.),
56-25-93 (дом.)



Динь Нгок Куанг,
аспирант каф.
электроснабжения
Одес. национ. политехн. ун-та
тел. 7-34-85-48



Нигрецул
Галина Ивановна,
студентка-магистр
Одес. национ. политехн. ун-та
тел. 7-34-85-48 (раб.).



Шевчук
Евгений Анатольевич,
студент-магистр
Одес. национ. политехн. ун-та
тел. 7-34-85-48 (раб.),
7-19-37-31 (дом.).

Получена 25.02.2010