

**О.Г. ГРИБ**, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";  
**С.Ю. ШЕВЧЕНКО**, к-т техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";  
**Д.А. ГАПОН**, к-т техн. наук, доц., НТУ "ХПИ";  
**Т.С. ИЕРУСАЛИМОВА**, ассистент, НТУ "ХПИ";  
**Р.В. ЖДАНОВ**, начальник РЭС АК "Харьковоблэнерго"

## **РАБОТА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК**

Ограничители перенапряжений ОПН являются средствами защиты и используются на высоковольтных подстанциях. Эти аппараты являются основной защитой оборудования подстанции от перенапряжений. Выход из строя ОПН приводит к тяжелым авариям с потерей питания на подстанциях. Одним из основных показателей ОПН является его пропускная способность. Нормальная работа ограничителей перенапряжения определяется его способностью поглощать тепловую энергию в определенных диапазонах. Пропускную способность ограничителей перенапряжения определяют по их возможности выдерживать влияние импульсов тока без потерь рабочих качеств.

**Ключевые слова:** ограничитель, перенапряжение, качество, электроэнергия, напряжение, гармоники, пропускная способность.

**Вступление.** Основным показателем ОПН является пропускная способность. Пропускную способность ограничителей перенапряжения определяют по их возможности выдерживать влияние импульсов тока без потерь рабочих качеств.

**Анализ последних исследований и литературы.** Последние исследования пропускной способности ОПН показали, что для их проверки оптимальное влияние 20 импульсов нормированных значений тока. Пропускная способность, нормируется по максимальным значениям прямоугольных импульсов тока с условной длительностью максимального значения  $T_{2000} = 2000$  мкс. Время  $T_{2000}$  определяют как время, в течение которого мгновенное значение импульса составляет более 90% его максимального значения (см. рис. 1). Такой прямоугольный импульс называется также импульсом тока большой длительности, а силу тока обозначают как  $I_{2000}$  [1, 4, 5].

По пропускной способности ОПН подразделяются на пять классов. Для каждого класса нормировано номинальный разрядный ток  $I_{н}$ , А, и удельную энергоемкость  $W_{пит.опн}$ , кДж/кВ [2, 4, 5].

**Цель статьи.** Исследование работы средств защиты от перенапряжений в энергосистемах при наличии в них высших гармоник.

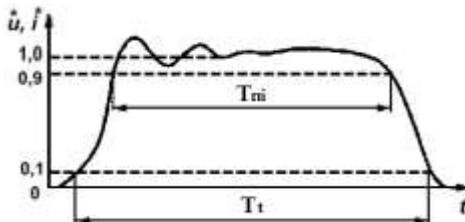


Рис. 1 – Прямоугольный импульс тока через ОПН:

$T_m$  – условная продолжительность амплитуды прямоугольного импульса;

$T_t$  – полная условная продолжительность прямоугольного импульса.

**Постановка проблемы.** Проблема возникает в том, что при наличии в сети высших гармоник снижается срок службы ограничителя перенапряжения.

**Материалы исследований.** Вид и значение напряжения на выводах варистора определяют характер тока, протекающего через него. Эквивалентная электрическая схема замещения, отображающий этот характер (см. рис. 2), в случае рассмотрения работы нелинейного варистора ОПН может быть представленной в виде схемы, включающей индуктивный, емкостной и активный сопротивления (как линейные, так и нелинейные). На схемах замещения (см. рис. 2, б-в) индуктивность  $L$  определяет индуктивность всего контура между выводами варистора (или ОПН в целом).

Три параллельные ветки (см. рис. 2, б) соответствуют параллельному соединению трех элементов: емкости  $C$  образца варистора; активного сопротивления  $R_z$ , обусловленного неизменной во всей зоне влияющих напряжений проводимостью, которую определяют по температуре образца; нелинейного сопротивления  $R_N$ , который определяет вольт-амперная характеристика варистора в зоне рабочего напряжения и перенапряжений с небольшими значениями кратности перенапряжений, наиболее характерных для условий эксплуатации. Электрическое сопротивление наружной крышки ОПН включен параллельно к сопротивлениям (см. рис. 2) [3, 4, 5].

Сопротивление  $R_B$  (см. рис. 2, в) определяют объемное сопротивление гранул оксида цинка и проводимость нелинейного резистора при больших значениях тока, соответствующих предельным токовым нагрузкам.

Емкостное сопротивление определяет работу варистора при меняющихся напряжениях, не превышающих номинальных значений. Значение емкостных токов не превышают, как правило, нескольких

миллиампер. Однако при наличии гармонических составляющих этот ток довольно быстро растет и может приводить к нарушению теплового баланса ОПН.

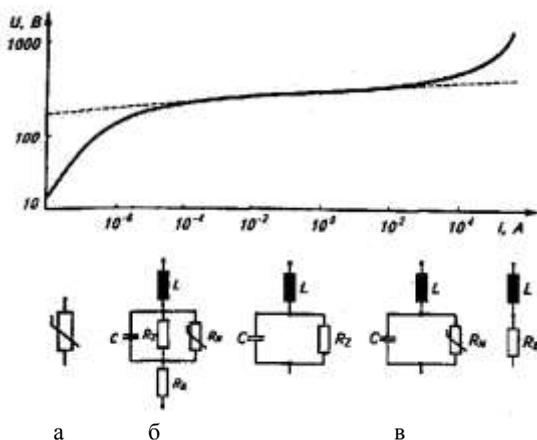


Рис. 2 – Вольт-амперная характеристика варистора и ее эквивалентные схемы замещения: *а* – обозначение ОПН на схемах, *б* – эквивалентная электрическая схема замещения нелинейного резистора, *в* – упрощенные схемы замещения, соответствующими трем различным характерным зонам этой характеристики

Индуктивное сопротивление варистора следует учитывать в режимах быстронарастающих больших импульсных токов, которые соответствуют импульсам напряжения в результате ударов молнии в объекты, защищаемые ОПН. Индуктивность варистора приводит к запаздыванию срабатывания ОПН в условиях быстронарастающих импульсов напряжения.

В зависимости от вида и амплитуды воздействующего напряжения электрическая схема ОПН может быть представленной соответствующими схемами замещения (см. рис. 2, *в*). Как правило, используют схему замещения с активными элементами, позволяющая оценивать активную энергию, которая выделяется в нелинейном резисторе, и условия нагрева. Но в определенных режимах следует учитывать другие свойства варисторов (например, емкостной характер тока в случае оценивания распределения напряжения промышленной частоты по элементам последовательно соединенных варисторов).

При переменном напряжении промышленной частоты в длительном режиме работы, ток через ОПН носит емкостной характер (амплитуда емкостной составляющей превышает амплитуду активной

составляющей, см. рис. 3), поэтому распределение напряжений по нелинейным элементам ОПН определяют по емкостным параметрам варисторов (значение емкости варистора лежат в пределах сотен пФ). Неравномерность распределения напряжения по элементам ОПН при различных значениях емкости последовательно соединенных варисторов (или отдельных блоков ОПН) может вызвать перекрытия наиболее нагруженного элемента с последующим отказом всего ОПН. Итак, при комплектации ОПН на напряжение 110 кВ и выше необходимо выполнять подбор варисторов с одинаковыми значениями емкости или использовать шунтирующие (выравнивающие) конденсаторы, которые включают параллельно варистором для выравнивания напряжений на элементах ОПН [3, 4, 5].

В случае протекания большого импульсного тока его активная составляющая значительно превышает емкостную составляющую. Резкий рост активной составляющей тока характеризуется запаздыванием начала его нарастания и пиком остающегося напряжений  $U_{\text{ЗЭЛ1}}$ , что соответствует началу резкого роста тока (см. рис. 3, б). Остающееся напряжение достигает своего максимума  $U_{\text{ЗЭЛ,МАХ}}$  раньше максимума импульсного тока, до момента достижения максимума импульсного тока остающееся напряжение несколько уменьшается – максимум тока во времени запаздывает по отношению к максимуму напряжения [4, 5].

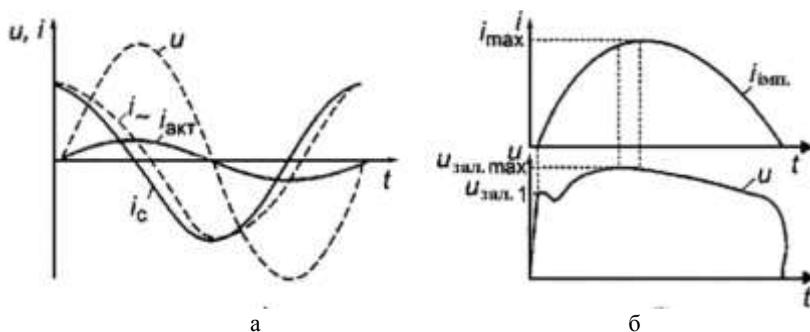


Рис. 3 – Ток в варисторе: а – при переменном напряжении промышленной частоты; б – при импульсном напряжении с большим импульсным током  $i_{\text{имп}}$ ,  $u(t) = u_{\text{ЗЭЛ}}(t)$

Анализ нелинейных искажений на подстанции 330кВ.

Данные исследований по качеству электрической энергии приведены ниже, по ГОСТу 13109-97 [6]. Исследования проводились в

энергетической компании, которая передаёт ЭЭ с шин 110 кВ ПС магистральных сетей в сети бытовых, промышленных и других потребителей. Среди этих потребителей много предприятий, имеющих мощную резкопеременную и нелинейную нагрузку, которая оказывает сильное негативное влияние на качество электрической энергии.

**Результаты исследований.** Ниже приведены результаты исследования качества электрической энергии в энергосистеме. На ПС 330 кВ присутствует средства защиты от перенапряжения (ОПН). Следует отметить, что ограничители перенапряжений весьма критичны к качеству электрической энергии и, особенно к высшим гармоникам напряжения [7].

В табл. приведен итоговый протокол проведенных измерений для ПС 330 кВ, анализ позволяет сделать вывод о том, что на данной подстанции качество электрической энергии в целом не соответствует требованиям ГОСТ 13109-97. Высшие гармоники характеризуются двумя коэффициентами:

- коэффициентом  $n$ -ой гармонической составляющей;
- коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения.

Коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей выходит за границы нормально и предельно допустимых значений, что отрицательно сказывается на работе ОПН [7, 8].

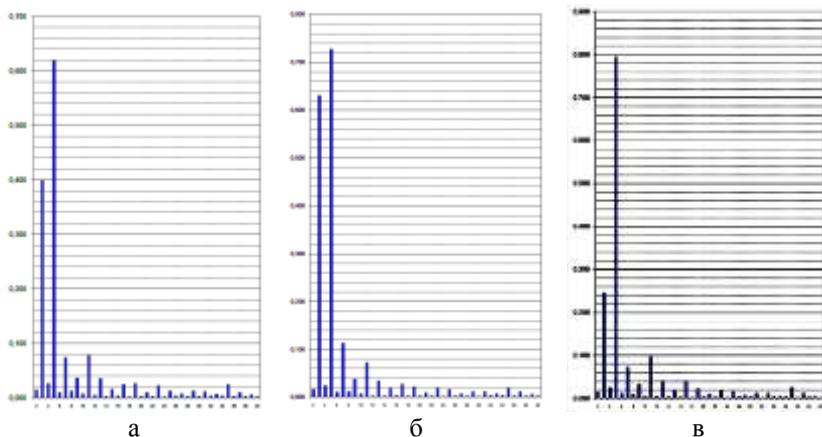


Рис. 4 – Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения:  
 $a$  – для фазы А;  $б$  – для фазы В;  $в$  – для фазы С

**Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  
по фазам А, В, С,  
%**

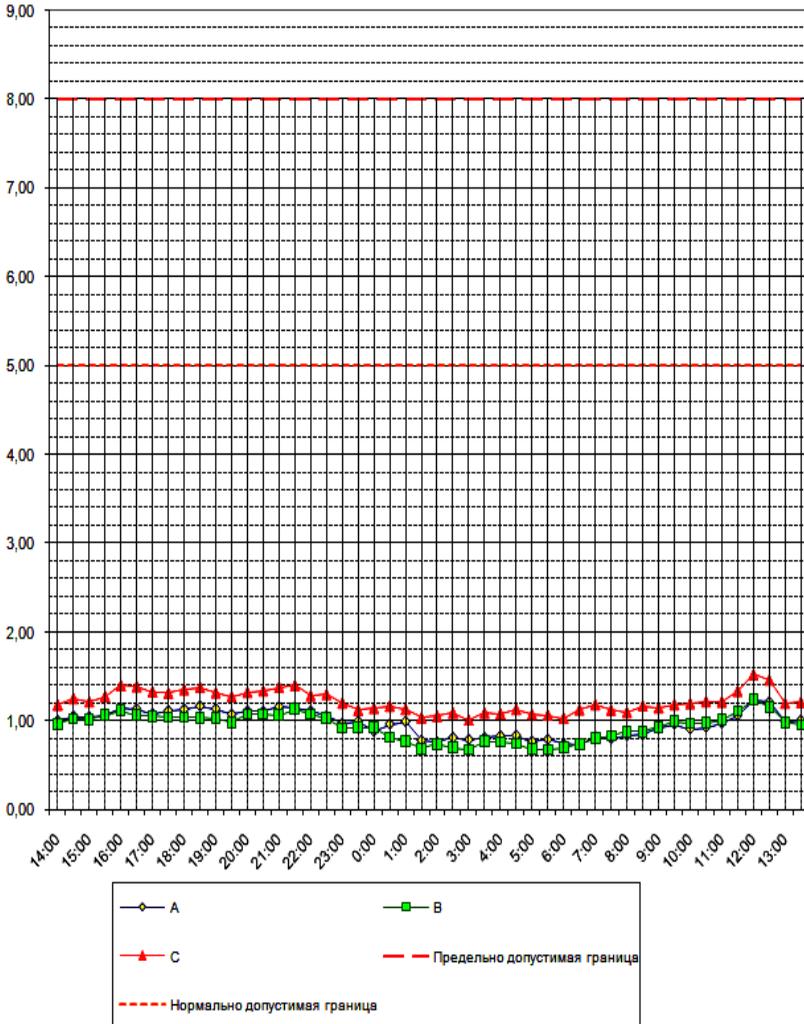


Рис. 5 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения по фазам А, В, С, %

Таблица – Итоговый протокол измерений: ПС 110 кВ №1 показатели качества электрической энергии

№ п/п	Интервал времени измерения		Отклонения частоты, годность	Уст.откл. напр. прямой посл-сти, годность	Кэф-т несимм. напр. по обратной посл-сти, годность	Кэф-т несимм. напр. по нулевой посл-сти, годность	Нарушение допустимых значений, фаза			Наличие провалов напряжения, фаза	Нарушение уставок ПКСЭ				
	Начало	Конец					Уст.отклон. напр.	Кэф. иск син. крив. напр.	Кэф. п-й гарм. сост. напр.						
1	13:00	13:30	1,00	1,00	1,00	1,00						-			
2	13:30	14:00	1,00	1,00	1,00	1,00						-			
3	14:00	14:30	1,00	1,00	1,00	1,00						-			
4	14:30	15:00	1,00	1,00	1,00	1,00						-			
5	15:00	15:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B				НДЗ			
6	15:30	16:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B				НДЗ			
7	16:00	16:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B				НДЗ>5%			
8	16:30	17:00	1,00	1,00	1,00	1,00						-			
9	17:00	17:30	1,00	1,00	1,00	1,00						-			
10	17:30	18:00	1,00	1,00	1,00	1,00			A	B	C	ПДЗ			
11	18:00	18:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B		A	B	C	НДЗ>5%		
12	18:30	19:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B					НДЗ>5%		
13	19:00	19:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B					НДЗ>5%		
14	19:30	20:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B					НДЗ>5%		
15	20:00	20:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B					НДЗ>5%		
16	20:30	21:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B					НДЗ>5%		
17	21:00	21:30	1,00	1,00	1,00	1,00							-		
18	21:30	22:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B		A		C	ПДЗ		
19	22:00	22:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B				C	НДЗ>5%		
20	22:30	23:00	1,00	0,97	1,00	1,00		B		A		C	ПДЗ		
21	23:00	23:30	1,00	0,33	1,00	1,00		A	B				НДЗ>5%		
22	23:30	0:00	1,00	0,40	1,00	1,00		A	B				НДЗ>5%		
23	0:00	0:30	1,00	0,23	1,00	1,00		A	B				НДЗ>5%		
24	0:30	1:00	1,00	0,07	1,00	1,00		A	B		B	C	НДЗ>5%		
25	1:00	1:30	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B		A		C	ПДЗ	
26	1:30	2:00	1,00	0,03	1,00	1,00		A	B					НДЗ>5%	
27	2:00	2:30	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B		A		C	ПДЗ	
28	2:30	3:00	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B					НДЗ>5%	
29	3:00	3:30	1,00	0,03	1,00	1,00		A	B	C				НДЗ>5%	
30	3:30	4:00	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B	C				НДЗ>5%	
31	4:00	4:30	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B	C				НДЗ>5%	
32	4:30	5:00	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B		A			НДЗ>5%	
33	5:00	5:30	1,00	0,07	1,00	1,00		A	B	C		A		C	НДЗ>5%
34	5:30	6:00	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B					НДЗ>5%	
35	6:00	6:30	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B					НДЗ>5%	
36	6:30	7:00	1,00	0,00	1,00	1,00		A	B	C		B		НДЗ>5%	
37	7:00	7:30	1,00	0,23	1,00	1,00		A	B					НДЗ>5%	
38	7:30	8:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B						НДЗ>5%	
39	8:00	8:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B						НДЗ>5%	
40	8:30	9:00	1,00	1,00	1,00	1,00								-	
41	9:00	9:30	1,00	1,00	1,00	1,00								-	
42	9:30	10:00	1,00	1,00	1,00	1,00								-	
43	10:00	10:30	1,00	1,00	1,00	1,00								-	
44	10:30	11:00	1,00	1,00	1,00	1,00								-	
45	11:00	11:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B						НДЗ	
46	11:30	12:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B						НДЗ>5%	
47	12:00	12:30	1,00	1,00	1,00	1,00		B						НДЗ>5%	
48	12:30	13:00	1,00	1,00	1,00	1,00		B		A				НДЗ>5%	

**Выводы.** Нормальная работа ОПН определяется его способностью поглощать тепловую энергию в определенных его удельной энергий диапазонах. Работоспособность ОПН при воздействии на него напряжения с низким качеством, может быть нарушена за счет не способности ОПН поглотить выделяемую в этом случае тепловую энергию. Результаты экспериментальных исследований качества электрической энергии на ПС 330 показали, что коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения по фазам А, В и С на ПС 330 кВ превышает нормально и предельно допустимые значения ГОСТа 13109-97, что может привести к выходу из строя ОПН.

**Список литературы:** 1. IEC 60099-4:2009 Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems (Обмежувачі перенапруг. Частина 4. Оксидно-металічні обмежувачі перенапруг без іскрових проміжків для систем змінного струму). 2. Аронов М.А., Аношин О.А., Кондратов О.И., Лопухова Т.В. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методическое и справочное пособие. Под ред. М.А. Аронова. – М.: "Знак", 2001. – 240 с. 3. Васюра Ю.Ф., Вильнер А.В., Вычегжанин А.В. Оценка величины энергии, рассеиваемой на варисторах ОПН, установленных в сетях собственных нужд электростанций, при замыканиях на землю. Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования. Выпуск 1: Материалы международной научно-технической конференции, 2001 г. – С-Пб: изд-во ПЭИПК, 2001. – 156 с. 4. Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. Правила выбора. ABB HighVoltageTechnologiesLtd. – Швейцария, Ветинген, май, 1994. 5. Металлооксидные ограничители перенапряжений. Выбор ограничителей перенапряжений и их применение в распределительных сетях среднего напряжения: Информация ТайкоЭлектрониксРайхемГмбх. – Киев, 2011. – 18 с. 6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск.: ИПК Изд-во стандартов. – 1998. – 30 с. 7. Баталов А.Г., Гриб О.Г., Сендерович Г.А., и др. Качество электрической энергии в системах электроснабжения – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 272 с. 8. О.Г. Гриб, О.Н. Довгалоук, Д.Н. Калюжный, Г.А. Сендерович. Оценка качества ЭЭ в электрических сетях Харьковского региона // Збірник праць V міжнародної науково-технічної конференції "Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств". – Маріуполь: ПДТУ – 2005. – С. 124-126.

**Bibliography(translation):** 1. IEC 60099-4:2009 Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems (Suppressors. Part 4. Metal-oxide surge arresters without spark gaps for AC systems). 2009. Print. 2. Aronov M., Anoshin O., Kondratov O., Lopyhova T. The surge in the electrical 6-750 kV. Methodical and reference manual. Moscow: Sign, 2001. Print. 3. Vasura Y., Wilner, A., Vuchegganin A. The estimation of the energy dissipated in the varistor surge arresters installed in the networks own needs of power plants in the ground. Overvoltage and reliable operation of electrical equipment. Issue 1. Materials of international scientific-technical conference. Saint-Petersburg: Izd-vo SKILLS. 2001. Print. 4. Selection, testing and application of metal oxide surge arresters in medium voltage networks. Selection rules. ABB HighVoltageTechnologiesLtd. Switzerland: Wettingen, may, 1994. Print. 5. Metal oxide surge arresters. Selection of surge arresters and their application in the distribution networks of medium voltage: Info Tycoelectronics.com. Kyiv. 2011. Print. 6. GOST 13109-97. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Norms of quality of electric energy in power supply systems for General use. Minsk: IPC Publishing standards. 1998. Print. 7. Batalov A., Gryb O., Senderovich G., and other. Quality of electrical energy in power supply systems. Kharkov: Kname, 2006. Print. 8. O. Gryb, O. Dovgalyuk, D. Kalyuzhny, G. Senderovich "Quality Assessment of EE in electrical networks Kharkiv region".

*Поступила (received) 10.10.2014*



**Гриб Олег Герасимович**, 1947 г.р., Украина, закончил Украинский заочный политехнический институт, д.т.н., профессор, зав. кафедрой автоматизации энергосистем Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина). Основное направление научной деятельности – контроль и регулирование качества электрической энергии и электропотребления.



**Шевченко Сергей Юрьевич**, 1961 г.р., Украина, закончил Харьковский политехнический институт, профессор кафедры "Передача электрической энергии" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина)". Основное направление научной деятельности - перенапряжения на оборудовании электрических сетей.



**Гапон Дмитрий Анатольевич**, 1978 г.р., Украина, закончил Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры автоматизации энергосистем Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина). Основное направление научной деятельности – методы контроля качества электрической энергии и электропотребления.



**Иерусалимова Татьяна Сергеевна**, 1990 г.р., Украина, закончила Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ассистент кафедры автоматизация энергосистем Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" (ул. Фрунзе 21, г. Харьков, 61002, Украина). Основное направление научной деятельности – развитие методов анализа электропотребления с учетом качества электрической энергии.



**Жданов Роман Викторович**, 1982 г.р., Украина, закончил Харьковскую национальную академию городского хозяйства, начальник Красноградского РЭС АК "Харьковоблэнерго" (ул. Полтавская 71, г. Красноград, Харьковская область, 63304, Украина). Основное направление научной деятельности – контроль показателей качества энергии в электрических сетях.