

Научная статья

УДК 621.316.727

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29304>



А.А. Завалов¹ ✉, С.В. Кузьмин¹,
Р.С. Кузьмин², В.А. Меньшиков²

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия;

² ООО ГК "Рутас", г. Красноярск, Россия

✉ zavalovartem@mail.ru

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4–10 КВ ГОРОДОВ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

Аннотация. В настоящей статье обоснована острая необходимость компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов, расположенных в северных регионах России. Для этого с помощью прибора комплексного контроля ПКК-57 было исследовано электропотребление 30 электропотребителей, подключенных к низковольтным сетям города Дудинки. Установлено, что измеренные значения коэффициента мощности некоторых электропотребителей превышают расчётные значения, указанные в нормативных документах. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения исследуемых объектов находятся в пределах значений, нормируемых государственным стандартом. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока могут превышать 30% и оказывать негативное влияние на КПД и аварийность конденсаторных установок, предназначенных для компенсации реактивной мощности. Потребление активной мощности в одной из фаз сети может отличаться от потребления в других в 5,6 раза, а потребление реактивной мощности в 7,6 раза. В статье предложен способ комплексной компенсации реактивной мощности в городских системах электроснабжения на основе низковольтных конденсаторных установок, в соответствии с которым в сетях до 1000 В осуществляется независимая пофазная компенсация на вводах многоэтажных домов, зданий и строений, а в сетях 6–10 кВ компенсация осуществляется с помощью конденсаторных установок, подключенных через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ на низкой стороне обмотки.

Ключевые слова: системы электроснабжения городов, потери электроэнергии, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, качество электроэнергии, высшие гармоники.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект № 18261ГУ/2022)

Для цитирования:

Завалов А.А., Кузьмин С.В., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях 0,4–10 кВ городов северных регионов // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 57–73. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29304>



A.A. Zavalov¹ ✉, S.V. Kuzmin¹,
R.S. Kuzmin², V.A. Menshikov²

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

² LLC GC "Rutas", Krasnoyarsk, Russia

✉ zavalovartem@mail.ru

REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRICAL NETWORKS OF 0.4–10 KV IN CITIES OF NORTHERN REGIONS

Abstract. This article substantiates the urgent need for reactive power compensation in power supply systems of cities located in the northern regions of Russia. For this purpose, power consumption of 30 consumers of Dudinka city was studied using power quality analyzer (PKK-57). It was established that the measured power factor for some consumers exceeded the calculated values specified in regulatory documents. The consumers' total harmonic distortion of voltage was within limits of values normalized by state standard. Total harmonic distortion of current can exceed 30% and have a negative impact on efficiency and failure rate of capacitor units designed to compensate for reactive power. Consumption of active and reactive power in one of the phases of network may differ from the consumption in others by 5.6 and 7.6 times, respectively. The article proposes a method for complex compensation of reactive power in urban power supply systems based on low-voltage capacitor units. According to the proposed method, in networks up to 1000 V, independent individual phase compensation is carried out at inputs of multistory residential and municipal buildings, while in networks of 6–10 kV, compensation is carried out using capacitor units connected through a power transformer of 6(10)/0.4 kV at the low side of the winding.

Keywords: urban power supply systems, power losses, reactive power compensation, power factor, power quality, higher harmonics.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Innovation Promotion Fund (Project No. 18261GU/2022)

Citation:

A.A. Zavalov, S.V. Kuzmin, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov, Reactive power compensation in electrical networks of 0.4–10 kV in cities of northern regions, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 57–73, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29304>

Введение. Потребление электроэнергии городским и сельским населением России возрастает ежегодно вне зависимости от экономической ситуации в стране. Так потребление электроэнергии населением России за прошедшие 30 лет возросло более чем в 2 раза и в настоящее время составляет около 15% от всей потреблённой электроэнергии в России. В то же время электропотребление потребителями, не связанными с промышленностью, сельским хозяйством, строительством и транспортом достигает 30% от общего уровня электропотребления в стране [1]. Для северных регионов России данный показатель составляет 46%, что является особенностью электропотребления городов, расположенных в данных регионах [2].

При непрерывном росте электропотребления в городах и населённых пунктах в последние годы наблюдается изменение характера нагрузки электропотребителей из-за широкого распространения современных электроприборов, освещения и мелкомоторной техники, потребляющих как активную, так и реактивную мощность (РМ).

Как известно, передача РМ по электрическим сетям приводит к увеличению потерь электроэнергии, снижению напряжения в узлах сети и снижению пропускной способности систем электроснабжения [3–5].

В 2022 году наибольший уровень потерь электроэнергии был зафиксирован в сетях низкого напряжения до 1000 В и составил 34,4% от общего уровня потерь электроэнергии в распределительных и магистральных сетях России [6]. Распределение потерь электроэнергии по разным классам напряжения представлено в таблице 1.

В работах [7, 8] установлено, что наибольшая эффективность в решении задачи снижения потерь электроэнергии достигается с помощью компенсации реактивной мощности (КРМ). При этом рационально устанавливать около 70% всей мощности компенсирующих устройств в сетях 0,4 кВ, 25% – в сетях 6–10 кВ и лишь 5% в сетях 110 кВ и выше. В странах с низким уровнем относительных потерь электроэнергии в электрических сетях мощность установленных компенсирующих устройств может достигать 100% мощности генераторов [9].

Таблица 1
Потери электрической энергии по классам напряжения в 2022 году, млн. кВт·ч

Table 1

Losses of electrical energy by voltage class in 2022, million kW·h

Потери электроэнергии в распределительных и магистральных сетях				
Всего	по уровню напряжения			
	высокое напряжение – 110 кВ и выше	среднее первое напряжение 27,5–60 кВ	среднее второе напряжение 1–20 кВ	низкое напряжение – 0,4 кВ и ниже
90972,8	26979,3	5300,9	27121,7	31570,9
100%	29,7%	5,8%	29,8%	34,7%

Значительную часть электрических сетей 0,4–20 кВ составляют распределительные сети городов и населённых пунктов, по некоторым оценкам около 40% [10].

Однако до недавнего времени считалось, что в системах электроснабжения городов КРМ не требуется [11]. Обосновывалось это тем, что нагрузка в распределительных сетях городов имела преимущественно активный характер из-за особенностей используемых электроприборов (лампы накаливания, электроплиты, электронагреватели и т.п.).

Соответственно, требуется провести анализ нормативных документов, регламентирующих необходимость КРМ в городах и населённых пунктах и устанавливающих расчётные значения коэффициента мощности для определённых электропотребителей.

Цель данного исследования заключается в обосновании необходимости и разработке эффективных способов КРМ в системах электроснабжения городов, расположенных в северных регионах, на современном этапе развития.

Компенсация реактивной мощности в низковольтных сетях городов

Проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустановок жилых и общественных зданий до 2003 года регламентировали Ведомственные строительные нормы ВСН 59-88. В 2003 году взамен ВСН 59-88 был введён Свод правил СП 31-110-2003. В 2017 году была внесена поправка, согласно которой данный документ актуален в том случае, если он не противоречит введённому в 2016 году СП 256.1325800.2016 и действующему в настоящее время. Также правила расчёта нагрузки и коэффициентов мощности и РМ регламентирует действующая в настоящее время Инструкция по проектированию городских электрических сетей РД 34.20.185-94.

Вышеперечисленные документы не отражают особенности электропотребления электроприёмников городов, расположенных в северных регионах. Одним из основных показателей электропотребления является коэффициент мощности.

Коэффициент мощности определяется следующим выражением:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где P – активная мощность, S – полная мощность.

Коэффициент РМ определяется следующим выражением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}, \quad (2)$$

где Q – реактивная мощность.

В пункте 5.2.9 РД 34.20.185-94 указано, что КРМ не требуется для потребителей жилых и общественных зданий, а также для тепловых пунктов, насосных станций, котельных и иных потребителей обслуживания зданий в микрорайонах, если на каждом рабочем вводе суммарная расчётная нагрузка потребителей не превышает 250 кВт.

Вместе с тем, СП 31-110-2003 в пунктах 6.33, 6.34, а СП 256.1325800.2016 в пунктах 7.31, 7.32 определяют отсутствие необходимости КРМ аналогично РД 34.20.185-94 за исключением уточнения «как правило, не требуется».

Соответственно, согласно действующим в настоящее время нормативным документам, регламентирующим проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустановок жилых и общественных зданий, КРМ в системах электроснабжения городов для большинства электропотребителей не требуется ввиду малой мощности, а необходимость КРМ в конкретных случаях должна быть обоснована.

Диапазон допустимых значений коэффициента РМ в часы больших и малых суточных нагрузок электрической сети, определяемый при заключении и исполнении договоров об оказании услуг по передаче электрической энергии, устанавливает приказ Минэнерго России № 380 от 23.06.2015 г. Соблюдение допустимых значений обеспечивается потребителями посредством соблюдения режимов потребления электрической энергии (мощности) либо использования устройств КРМ. В часы больших суточных нагрузок для сетей до 1000 В максимальное значение коэффициента РМ устанавливается равным 0,35 и 0,40 для сетей 1–10 кВ, в часы малых суточных нагрузок равным 0. Однако в приказе не определён алгоритм применения скидок и надбавок к стоимости оказанных услуг по передаче электроэнергии при отклонении реальных значений коэффициента РМ от нормируемых значений. Это приводит к недостаточному стимулированию потребителей к поддержанию значений коэффициента РМ в допустимом диапазоне.

В то же время исследования показывают рациональность глубокой КРМ до значений коэффициента РМ 0–0,10 [12, 13].

В Проекте Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации на период до 2035 года предполагается, что в нормативных правовых актах будут конкретизированы условия для соблюдения потребителями электроэнергии установленных значений соотношения потребления активной и реактивной мощности, в том числе будет создан единый механизм применения скидок и надбавок к стоимости оказанных услуг по передаче электроэнергии, но в настоящее время данная Стратегия не утверждена Правительством Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели по снижению потерь электроэнергии до уровня 7,3%, обозначенной в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, необходимо в первую очередь осуществлять КРМ в низковольтных электрических сетях, в частности, в городских системах электроснабжения. Действующие нормативные документы, регламентирующие проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустано-

вок жилых и общественных зданий, требуют доработки в части внесения правок в информацию о необходимости КРМ, например, в следующем виде: «КРМ для жилых и общественных зданий, тепловых пунктов, насосных станций, котельных и прочих электропотребителей городов, как правило, требуется».

Анализ сравнения данных, приведённых в вышеописанных нормативных документах, показывает, что расчётные значения $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$ для электропотребителей городской среды в данных документах практически полностью совпадают и за прошедшие три десятилетия не актуализировались и не изменялись.

Для городов, расположенных в северных регионах России, актуальным остается вопрос эффективного освещения жилых и служебных помещений, улиц и площадей. В настоящее время для этой цели используются энергосберегающие системы освещения, на основе светодиодных светильников, коэффициент мощности которых находится в диапазоне 0,53–0,91. Кроме того, современные бытовые приборы, оргтехника, климат системы, используемые как в жилом секторе, так и в административных зданиях, спортивных комплексах и торгово-развлекательных центрах имеют коэффициент мощности в диапазоне 0,25–0,98 [14–16]. В то же время три десятилетия назад большинство электроприборов и систем освещения, используемых в городах имели коэффициент мощности близкий или равный 1.

Электропотребление городов, расположенных в северных регионах, имеет явно выраженный сезонный характер. Зимний период времени характеризуется максимальным электропотреблением и связан с коротким световым днём и максимальной плотностью населения в городе. В летний период за счёт отпусков плотность населения в северных городах снижается, а продолжительный световой день приводит к минимальному потреблению электроэнергии на освещение.

Для уточнения современных значений $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$ для основных электропотребителей городов, расположенных в северных регионах, были выполнены экспериментальные исследования электропотребления в городе Дудинка в зимний и летний период года. Измерения производились в утреннее, дневное и вечернее время суток, т.е. сутки были разбиты на 3 периода по 8 часов каждый (с 00 до 08 часов, с 08 до 16 часов и с 16 до 24 часов).

Электропотребление 7 жилых многоэтажных домов, 7 детских садов, 5 общеобразовательных школ, техникума, общежития техникума, гостиницы, административных зданий, спортивных и торгово-развлекательных сооружений города Дудинки фиксировалось с помощью прибора комплексного контроля ПКК-57 на отходящих линиях к перечисленным объектам.

В ходе измерений электропотребления были получены диапазоны изменений $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$, зафиксированные в летний и зимний период года в какой-либо из фаз в часы максимума нагрузки, характерные для основных электропотребителей городов, расположенных в северных регионах России. Данные диапазоны представлены в табл. 2.

В табл. 3 приведено сравнение значений $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$, указанных в нормативных документах и полученных в ходе экспериментальных исследований. Для общеобразовательных школ, детских садов, жилых многоэтажных домов, административных зданий и спортивных сооружений приведены усреднённые значения.

Анализ сравнения измеренных и расчётных значений $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$ показывает, что измеренные значения $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$ для детских садов, общеобразовательных школ, техникумов, гостиниц и административных зданий в летний период года могут совпадать с расчётными значениями, а измеренные значения остальных электропотребителей, представленных в табл. 3, превышают расчётные. В зимний период года измеренные значения $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$ для техникума и гостиницы могут совпадать с расчётными, а значения остальных электропотребителей превышают расчётные.

Таким образом, в нормативных документах, в соответствии с современным характером электропотребления городов, расположенных в северных регионах России, требуется актуализация

расчётных значений $\cos\varphi$ и $\operatorname{tg}\varphi$ для следующих электропотребителей: многоэтажные дома/квартиры, освещение, детские сады, общеобразовательные школы и административные здания.

Таблица 2

Диапазоны измеренных значений « $\cos\varphi$ » и « $\operatorname{tg}\varphi$ » электропотребителей города

Table 2

Range of power factors measured values of urban power consumers

№	Потребитель электроэнергии	Диапазон измеренных значений			
		Летний период		Зимний период	
		$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
1	Школа №1	0,83–0,89	0,51–0,68	0,62–0,79	0,78–1,28
2	Школа №2 (освещение)	0,88–0,97	0,25–0,54	0,76–0,91	0,45–0,86
3	Школа №2 (силовая часть)	0,89–0,97	0,26–0,50	0,84–0,90	0,47–0,66
4	Школа №3	0,87–0,94	0,36–0,57	0,79–0,87	0,57–0,76
5	Школа №4 (освещение)	0,81–0,91	0,46–0,71	0,71–0,86	0,60–1,00
6	Школа №4 (силовая часть)	0,78–0,95	0,34–0,79	0,59–0,83	0,67–1,38
7	Школа №7 (освещение)	0,66–0,84	0,64–1,13	0,60–0,71	1,00–1,33
8	Школа №7 (силовая часть)	0,71–0,93	0,40–1,00	0,61–0,80	0,75–1,29
9	Детский сад «Белоснежка»	0,78–0,99	0,16–0,81	0,71–0,97	0,23–1,00
10	Детский сад «Умка»	0,78–0,99	0,13–0,80	0,77–0,98	0,21–0,83
11	Детский сад «Забава»	0,71–0,97	0,25–1,00	0,66–0,75	0,87–1,15
12	Детский сад «Сказка»	0,86–0,98	0,21–0,60	0,73–0,95	0,31–0,94
13	Детский сад «Рябинка»	0,83–0,95	0,33–0,67	0,79–0,84	0,64–0,79
14	Детский сад «Льдинка»	0,93–0,99	0,14–0,40	0,80–0,93	0,40–0,75
15	Детский сад «Морозко»	0,93–0,97	0,25–0,40	0,75–0,98	0,19–0,88
16	Зооветеринарный техникум	0,95–0,99	0,17–0,33	0,89–0,96	0,29–0,52
17	Общежитие техникума	0,77–0,87	0,57–0,83	0,66–0,85	0,63–1,14
18	Гостиница	0,81–0,92	0,42–0,72	0,68–0,94	0,38–1,08
19	Жилой дом, Горького 38	0,82–0,87	0,56–0,70	0,68–0,75	0,88–1,07
20	Жилой дом, Щорса 35	0,86–0,90	0,48–0,59	0,70–0,84	0,66–1,02
21	Жилой дом, Щорса 33	0,88–0,91	0,45–0,54	0,62–0,85	0,61–1,25
22	Жилой дом, Победы 5	0,85–0,92	0,42–0,63	0,70–0,86	0,59–1,01
23	Жилой дом, Щорса 29	0,80–0,98	0,21–0,75	0,67–0,87	0,55–1,10
24	Жилой дом, Щорса 23Б	0,86–0,93	0,37–0,58	0,78–0,87	0,58–0,81
25	Жилой дом, Победы 4	0,78–0,88	0,54–0,80	0,61–0,85	0,61–1,29
26	Здание администрации	0,93–0,95	0,32–0,39	0,74–0,87	0,56–0,91
27	Здание полиции	0,91–0,93	0,39–0,46	0,61–0,83	0,67–1,30
28	Торгово-развлекательный центр	0,82–0,95	0,32–0,69	0,62–0,88	0,53–1,26
29	Фитнес центр	0,89–0,96	0,28–0,51	0,88–0,93	0,39–0,50
30	Бассейн	0,90–0,92	0,43–0,48	0,75–0,92	0,43–0,87

Таблица 3

Нормируемые и измеренные « $\cos\varphi$ » и « $\text{tg}\varphi$ » электропотребителей городов

Table 3

Standardized and measured « $\cos\varphi$ » and « $\text{tg}\varphi$ » of urban power consumers

№	Потребитель электроэнергетики	СП 256.1325800.2016		Диапазон измеренных значений			
				Летний период		Зимний период	
		$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
1	Квартиры/многоэтажные дома	0,92-0,98	0,20-0,43	0,84-0,91	0,43-0,66	0,68-0,84	0,64-1,08
2	Освещение	0,95	0,33	0,78-0,91	0,45-0,79	0,69-0,83	0,68-1,06
3	Ясли, детские сады	0,95-0,98	0,20-0,25	0,83-0,98	0,21-0,67	0,74-0,91	0,41-0,91
4	Общеобразовательные школы	0,90-0,95	0,25-0,48	0,80-0,93	0,40-0,74	0,69-0,83	0,66-1,07
5	Учебные корпуса ПТУ/техникумов	0,90	0,48	0,95-0,99	0,17-0,33	0,89-0,96	0,29-0,52
6	Гостиницы	0,85-0,90	0,48-0,62	0,81-0,92	0,42-0,72	0,68-0,94	0,38-1,08
7	Административные здания	0,85	0,62	0,92-0,94	0,35-0,43	0,68-0,85	0,62-1,10
8	Общежития учебных заведений	данные не приведены		0,77-0,87	0,57-0,83	0,66-0,85	0,63-1,14
9	Спортивные сооружения	данные не приведены		0,90-0,94	0,35-0,49	0,81-0,92	0,41-0,68
10	Торгово-развлекательные комплексы	данные не приведены		0,82-0,95	0,32-0,69	0,62-0,88	0,53-1,26

В ходе экспериментальных исследований электропотребления в городе Дудинке было установлено, что неравномерность потребления активной и реактивной мощности по отдельным фазам сети электропотребителя в летний период года может соответственно достигать 5,6 раза и 7,6 раза, в зимний период года данный показатель составил 4,3 раза и 4,8 раза.

Неравномерность электропотребления по отдельным фазам сети электропотребителя приводит к росту тока в нейтральном проводе и создаёт условия для его термического разрушения. Наибольшее влияние на ток в нейтральном проводе кабельных линий, используемых в городских сетях напряжением до 1000 В, оказывает неравномерность потребления реактивной мощности. Следовательно, для исключения термического разрушения кабельных линий достаточно осуществить эффективную КРМ [14].

Использование в низковольтных городских сетях устройств КРМ на основе симметричной компенсации приводит к недокомпенсации или перекомпенсации РМ по отдельным фазам сети и может вызывать увеличение тока в нейтральном проводе, то есть повышает вероятность его термического разрушения. Опыт эксплуатации устройств КРМ показал, что при неравномерной нагрузке по фазам наиболее эффективной является независимая пофазная КРМ, которая исключает возможность возникновения режимов недокомпенсации и перекомпенсации в отдельных фазах сети и приводит к снижению тока в нейтральном проводе, тем самым исключает вероятность термического разрушения кабеля.

При КРМ в узлах электрических нагрузок на трансформаторных подстанциях 6(10)/0,4 кВ низковольтные линии, отходящие от подстанции к электроприёмнику, не разгружаются от реактивного тока, а значит потери электроэнергии в них не снижаются. Для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В и увеличения пропускной способности систем электр-

троснабжения городов КРМ необходимо осуществлять в максимальной близости к реактивной (индуктивной) нагрузке. Наиболее эффективным местом расположения устройств КРМ в низковольтных системах электроснабжения городов являются вводы отдельных многоэтажных домов, зданий и строений. Тогда потери электроэнергии в низковольтных линиях снизятся, а пропускная способность систем электроснабжения увеличится.

В городе Дудинке на вводах отдельных школ, детских садов, административных зданий, спортивных сооружений, торгово-развлекательного комплекса, техникума и общежития техникума было установлено 22 установки независимой пофазной КРМ.

С помощью компьютерного моделирования в программном комплексе Matlab/Simulink была произведена оценка увеличения пропускной способности кабельной линии и снижения тока в нейтральном проводе в случае независимой пофазной КРМ в часы максимума нагрузки зимнего периода года. В качестве примера в табл. 4 приведены значения токов в фазах и нейтральном проводе до и после независимой пофазной КРМ до значений $\cos\varphi = 1$ для следующих электропотребителей: школа №3, детский сад «Рябинка», общежитие техникума, бассейн «Нептун», здание полиции.

Таблица 4

Значения токов в фазах и нейтральном проводе до и после независимой пофазной компенсации реактивной мощности

Table 4

Values of currents in phases and neutral wire before and after independent individual phase reactive power compensation

№	Наименование объекта	До КРМ					После независимой пофазной КРМ				
		I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	$\cos\varphi$	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	$\cos\varphi$
1	Школа №3	351,0	402,8	409,3	101,9	0,83	309,7 (-12%)	327,4 (-19%)	361,6 (-12%)	45,7 (-55%)	1,00
2	Д/С «Рябинка»	83,7	157,2	121,7	70,4	0,82	66,2 (-21%)	131,1 (-17%)	103,3 (-15%)	56,5 (-20%)	1,00
3	Общежитие техникума	190,7	99,5	148,5	114,7	0,72	163,0 (-14%)	75,4 (-24%)	98,8 (-33%)	78,5 (-32%)	1,00
4	Бассейн «Нептун»	141,8	333,3	300,9	132,0	0,85	108,0 (-24%)	310,4 (-7%)	247,9 (-18%)	180,3 (-37%)	1,00
5	Здание полиции	268,9	154,9	204,1	155,5	0,75	226,2 (-16%)	121,7 (-21%)	126,6 (-38%)	102,1 (-34%)	1,00

Анализ сравнения данных, приведённых в табл. 4, показывает, что при независимой пофазной КРМ до $\cos\varphi = 1$ ток в фазах снижался до 38%, а ток в нейтральном проводе до 55%.

Устройство независимой пофазной КРМ защищено патентом РФ на изобретение № 2 697 259 [17]. Внешний вид устройства представлен на рис. 1.

Современные электроприборы, используемые в городской среде, могут являться источниками высших гармоник тока и напряжения, которые оказывают негативное воздействие на термическое состояние конденсаторов, используемых в устройствах для КРМ [18, 19].

Согласно действующему в настоящее время ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» для электрических сетей напряжением до 1000 В значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения (K_V), усреднённые в интервале времени 10 мин., не должны превышать 8,0% в течение 95% времени интервала в одну неделю и 12,0% в течение 100% времени интервала в одну неделю.



Рис. 1. Внешний вид устройства независимой пофазной КРМ

Fig. 1. Appearance of the device of independent individual phase reactive power compensation

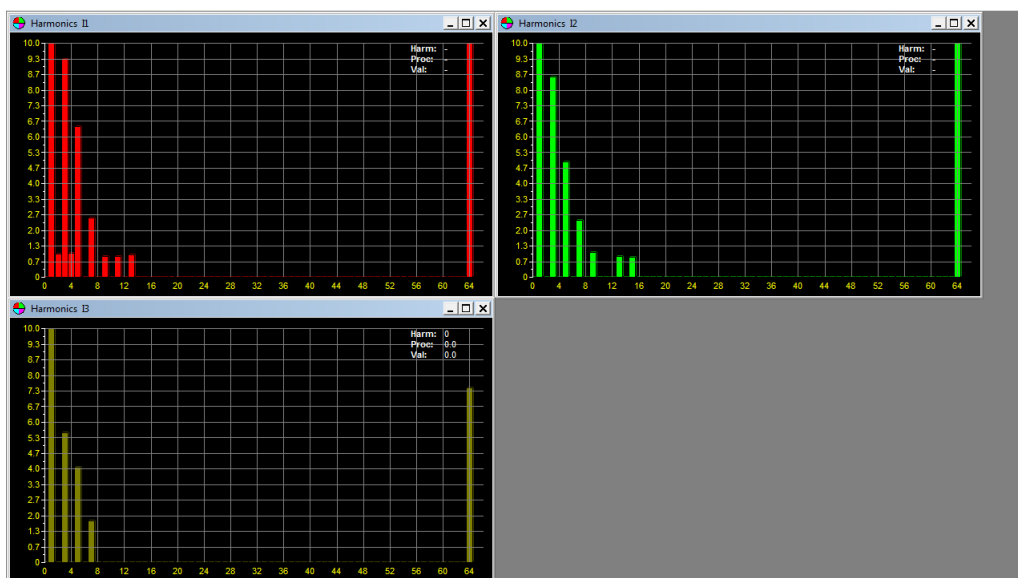


Рис. 2. Высшие гармоники тока в сети пятиэтажного дома

Fig. 2. Higher current harmonics in the network of a five-story building

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока (K_T) в настоящее время не нормируются государственным стандартом. Однако исследования показывают, что наличие высших гармоник тока может привести к снижению КПД конденсаторной установки до 30%. Также если коэффициент гармонических составляющих тока достигает 10%, то безаварийность работы конденсаторной установки снижается до 51%, а увеличение коэффициента свыше 20% приводит к тому, что 85% конденсаторных установок выходят из строя из-за термического разрушения¹.

Помимо прочего в ходе экспериментальных исследований изучалась величина гармонического искажения синусоиды тока и напряжения в линиях, отходящих от трансформаторных подстанций к электропотребителям города Дудинки.

На рис. 2 в качестве примера приведены гистограммы измерений высших гармоник тока в сети пятиэтажного дома, расположенного по адресу ул. Щорса, д. 29.

В табл. 5 представлены результаты измерений, усреднённых для трёх фаз, значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения для 28 объектов, расположенных в городе Дудинка.

Таблица 5

Результаты измерений суммарных коэффициентов гармонических составляющих в сетях 0,4 кВ г. Дудинки

Table 5

Results of total harmonic distortion measurements in 0.4 kV networks of Dudinka

№ п.п.	Наименование объекта	$K_I, \%$	$K_U, \%$
1	Жилой 9ти этажный дом по ул. Горького, 38	8,5	1,6
2	Жилой 9ти этажный дом по ул. Щорса, 35	5,0	1,6
3	Жилой 9ти этажный дом по ул. Щорса, 33	13,2	1,6
4	Жилой 9ти этажный дом по ул. Победы, 5	10,1	1,6
5	Жилой 5ти этажный дом по ул. Щорса, 29	9,9	1,9
6	Жилой 5ти этажный дом по ул. Щорса, 23Б	15,2	2,1
7	Жилой 5ти этажный дом по ул. Победы, 4	11,4	1,9
8	Здание полиции	19,9	2,5
9	Здание администрации	33,5	5,9
10	Школа-интернат №1	7,1	1,6
11	Школа №4 силовое электрооборудование	6,4	2,1
12	Школа №4 освещение	30,0	2,0
13	Школа №2 силовое электрооборудование	4,5	3,2
14	Школа №2 освещение	11,4	2,4
15	Школа №7 силовое электрооборудование	4,9	2,4
16	Школа №7 освещение	15,7	2,8
17	Школа №3	8,5	1,8
18	Детский сад «Белоснежка»	5,7	1,8
19	Детский сад «Умка»	16,1	2,6
20	Детский сад «Забава»	4,7	2,9
21	Детский сад «Рябинка»	5,2	1,7
22	Детский сад «Льдинка»	8,5	1,6
23	Детский сад «Сказка»	7,2	3,9
24	Детский сад «Морозко»	11,5	4,3
25	Техникум	5,9	1,9
26	Общежитие техникума	11,6	1,9
27	Бассейн «Нептун»	2,5	1,8
28	Развлекательный центр «Арктика»	23,7	2,4

Анализ измеренных данных показал, что для всех исследуемых объектов значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не превышают 8,0%, а значит не превышают установленные ГОСТом нормируемые значения. В то время как значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока превышают 10,0% для 13 объектов из 28 и могут привести к выходу из строя каждой второй установки по КРМ, расположенных на данном объекте.

Таким образом, с целью защиты от негативного влияния высших гармоник тока низковольтные конденсаторные установки, устанавливаемые на вводах городских электропотребителей, как правило, необходимо комплектовать защитными индуктивными реакторами, настроенными на частоту в диапазоне от 100 до 150 Гц. Подобные индуктивные реакторы используются в вышеуказанной установке.

Способ комплексной компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов с помощью низковольтных конденсаторных установок

От распределительных сетей 6–10 кВ городов могут быть запитаны коммунально-бытовые и небольшие промышленные потребители, нагрузкой которых зачастую являются асинхронные электродвигатели. Коэффициент мощности асинхронных электродвигателей в зависимости от марки и мощности может находиться в диапазоне 0,67–0,92². В настоящее время широко используются электродвигатели с регулировкой частоты вращения, то есть системы тиристорный преобразователь-двигатель или частотный преобразователь-двигатель. Малонагруженные тиристорные преобразователи и частотные преобразователи являются источниками высших гармоник тока и напряжения [20, 21].

Для подавления высших гармоник и защиты высоковольтных конденсаторных установок от их негативного влияния, как правило, применяются пассивные или активные фильтры.

Пассивные фильтры эффективны если спектр подавляемых частот достаточно узок. При широком спектре гармоник, характерном для тиристорных преобразователей и преобразователей частоты, значительно возрастает стоимость пассивных фильтров, их габариты и вес. Активные фильтры целесообразны к применению если преобразователи частоты и – тиристорные преобразователи являются маломощными, с ростом их мощности финансовые вложения в активные фильтры превышают стоимость самих преобразователей.

Защита конденсаторных установок предназначенных для КРМ в сетях 6–10 кВ от негативного влияния высших гармоник может быть осуществлена, если установка будет подключена к сетям 6–10 кВ через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ на вторичной стороне обмотки.

Исследования показывают, что при подключении конденсаторных установок ко вторичной обмотке силового трансформатора 6(10)/0,4 кВ мощностью не более 1600 кВ·А достигается высокая степень защиты конденсаторов от негативного влияния высших гармоник, присутствующих в сетях 6–10 кВ, а так же становится возможным использовать низковольтные коммутационные аппараты и конденсаторы вместо высоковольтных, что снизит стоимость установки. При этом конденсаторные установки будут эффективно защищать изоляцию обмоток силового трансформатора от коммутационных перенапряжений [22].

Устройство для компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях с принципом подключения низковольтных конденсаторов и катушек индуктивности к сети 6–10 кВ через силовой трансформатор защищено патентом РФ на изобретение № 2 727 148 [23]. В данном устройстве с помощью трансформатора тока определяется действующий ток в сетях 6–10 кВ и значения коэффициента РМ, если действующее значение коэффициента РМ превышает установленное, то регулятор выдаёт команды на изменение мощности регулируемых катушек индуктивности. Тем самым обеспечивается автоматическое плавное регулирование мощности установки. С учётом относительно равномерного распределения нагрузок по фазам сети 6–10 кВ возможно примене-

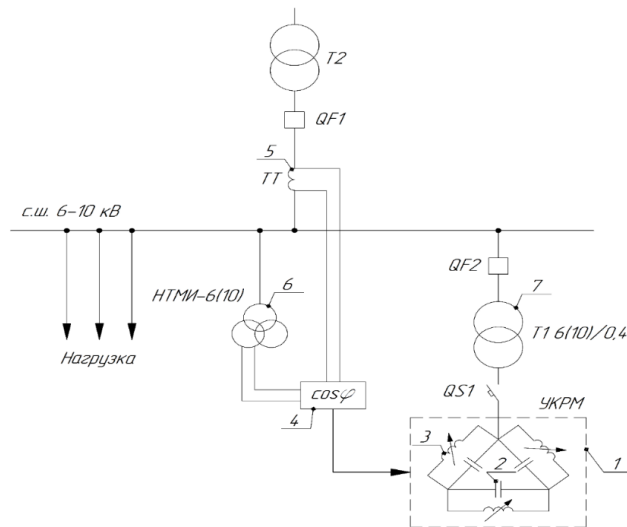


Рис. 3. Функциональная схема устройства для КРМ в высоковольтных сетях
 Fig. 3. Functional diagram of device for reactive power compensation in high-voltage networks

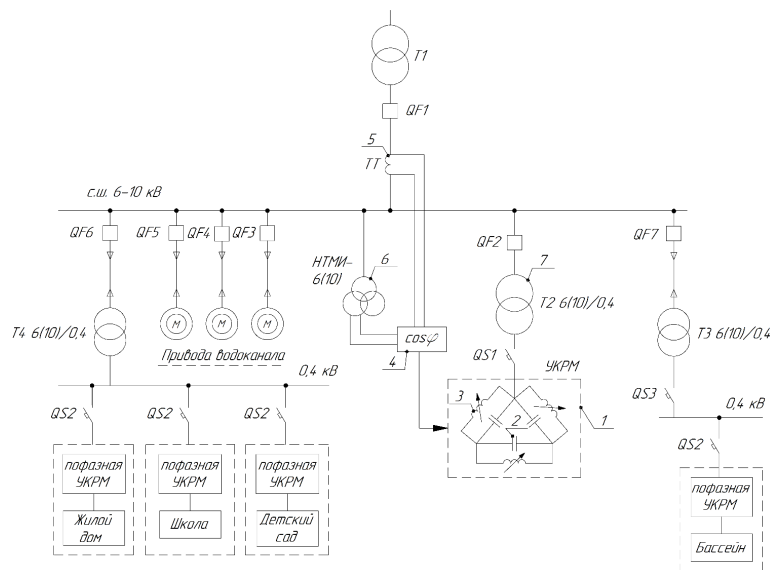


Рис. 4. Комплексная система КРМ в сетях 0,4–10 кВ на базе низковольтных КУ
 Fig. 4. Complex reactive power compensation system in 0.4–10 kV networks based on low-voltage capacitor banks

ние симметричной компенсации по фазам сети. Функциональная схема такого устройства представлена на рис. 3.

Система комплексной КРМ в городских системах электроснабжения представлена на рис. 4.

Таким образом, система комплексной КРМ в городских электрических сетях 0,4–10 кВ может быть реализована полностью за счёт низковольтных конденсаторных установок. В низковольтных сетях необходимо устанавливать устройства независимой пофазной КРМ на вводах домов, зданий и строений, а для КРМ в сетях 6–10 кВ достаточно использовать низковольтные симметричные конденсаторные установки, подключенные через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ.

Представленный способ комплексной КРМ позволит сократить потери электроэнергии в сетях 0,4–10 кВ городов и увеличить пропускную способность систем электроснабжения в целом.

Заключение

1. Наиболее острый характер КРМ имеет место в распределительных сетях до 1000 В городов, расположенных в северных регионах Российской Федерации.

2. Действующие нормативные документы, регламентирующие проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустановок жилых и общественных зданий, требуют доработки в части внесения правок в информацию о необходимости КРМ, например, в следующем виде: «КРМ для жилых и общественных зданий, тепловых пунктов, насосных станций, котельных и прочих электропотребителей городов, как правило, требуется».

3. В нормативных документах, в соответствии с современным характером электропотребления, требуется актуализация расчётных значений $\cos\varphi$ и $\text{tg}\varphi$ для следующих электропотребителей: многоэтажные дома/квартиры, освещение, детские сады, общеобразовательные школы и административные здания.

4. Ввиду неравномерного распределения нагрузки по фазам сети в низковольтных сетях городов рационально осуществлять независимую пофазную КРМ на базе автоматически регулируемых конденсаторных установок, при размещении данных устройств на вводах отдельных домов, зданий и строений, что практически исключает термическое разрушение нейтрального провода кабельных линий и тем самым повышает надёжность электроснабжения городских электропотребителей.

5. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения для всех исследованных объектов города Дудинки не превышают 8% и соответствуют требованиям ГОСТа 1234124. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока превышают 10% для 13 объектов из 28 и могут достигать 33,5%, что снижает надёжность устройств КРМ практически в 2 раза. Конденсаторные установки для КРМ в низковольтных системах электроснабжения городов необходимо комплектовать защитными реакторами от негативного влияния высших гармоник тока.

6. В узлах электрических нагрузок 6–10 кВ с наличием высших гармоник тока и напряжения КРМ может быть реализована с помощью низковольтных автоматически регулируемых конденсаторных установок, подключенных к узлам электрических нагрузок 6–10 кВ через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ, что позволит обеспечить высокую эффективность защиты от негативного влияния высших гармоник на КПД и термическую устойчивость установки при меньших финансовых затратах.

7. Система комплексной КРМ в сетях 0,4–10 кВ городов на базе низковольтных конденсаторных установок, подключенных в низковольтных сетях к вводам отдельных домов, зданий и строений с принципом независимой пофазной компенсации, и подключенных к узлам электрических нагрузок 6–10 кВ через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ, позволит выполнить автоматическую КРМ и тем самым эффективно сократить потери электроэнергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Электробаланс и потребление электроэнергии в Российской Федерации. Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 05.06.2023).

[2] Низкоуглеродные решения для изолированных регионов России с высокими затратами на энергию. Режим доступа: http://www.cenef.ru/file/Low-Carbon_rus.pdf (дата обращения: 05.06.2023).

- [3] **Miron A., Cziker A.C., Ungureanu S., Beleiu H.G., Darab C.P.** Reactive Power Compensation at Industrial Consumers: Romanian Study Case, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, (2022) 101–106.
- [4] **Tiwari R., Prabhakaran K.K., Chelliah T.R., Joshi L.P.** Performance Analysis of Extra High Voltage 765 kV and 400 kV Hydro Power fed Transmission Lines, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Bari, Italy, (2021) 1–6.
- [5] **Wang Y., Wang T., Zhou K.** Reactive Power Optimization of Wind Farm Considering Reactive Power Regulation Capacity of Wind Generators, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, (2019) 4031–4035.
- [6] Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). Фактические потери электроэнергии в сети по типам напряжения. Режим доступа: <https://fedstat.ru/indicator/61481> (дата обращения: 23.06.2023).
- [7] **Могиленко А.В.** Снижение потерь электроэнергии Российские реалии // Новости электротехники. 2015. № 2 (92).
- [8] **Паули В.К., Воротников Р.А.** Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии // Энергоэксперт. 2007. № 2. – С. 16–23.
- [9] **Власюк И.В., Парамонов С.Ю., Белов С.И.** Влияние компенсации реактивной мощности на энергосбережение предприятий АПК // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 2. – С. 40–46.
- [10] **Гордиевский И.Г., Лордкипанидзе В.Д.** Оптимизация параметров электрических сетей : под ред. Г.В. Сербиновского М.: Энергия, 1978. 145 с.
- [11] **Поспелов Г.Е., Сыч Н.М.** Потери мощности и энергии в электрических сетях : под ред. Г.Е. Поспелова М.: Энергоиздат, 1981. 216 с.
- [12] **Манусов В.З., Третьякова Е.С.** Глубокая компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения производства // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. 2017. № 4. – С. 33–38.
- [13] **Манусов В.З., Третьякова Е.С.** Повышение энергоэффективности на промышленных предприятиях при выполнении глубокой компенсации реактивной мощности // ЭЛЕКТРО. 2015. № 5. – С. 2–7.
- [14] **Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.** Повышение эффективности компенсации реактивной мощности на основе устройств пофазной компенсации // Журн. Сиб. федер. ун-та: Техника и технологии. 2020. № 13 (1). – С. 14–24.
- [15] **Hannagan J., Woszczeiko R., Langstaff T., Shen W., Rodwell J.** The Impact of Household Appliances and Devices: Consider Their Reactive Power and Power Factors, Sustainability, 15 (1):158, (2023) 1–11.
- [16] **Arsov L., Mircevski S., Iljazi I., Arsova I., Cundeva M.** Energy efficiency of the new household appliances, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, (2013) 1–9.
- [17] **Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.** Устройство для пофазной компенсации реактивной мощности. Пат. 2697259 Российская Федерация, МПК7 H 02 J 3/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2019105614; заявл.27.02.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23. 9 с.: ил.
- [18] **Xie X., Chen D.** Data-driven dynamic harmonic model for modern household appliances, Applied Energy, (312), (2022).
- [19] **Камолов М.М., Назиров Х.Б., Исмоилов С.Т., Джураев Ш.Д., Амирханов А.С.** Экспериментальная оценка качества электрической энергии современных коммунально-бытовых и офисных электроприемников // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 2 (46). – С. 26–33.

[20] Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3. – С. 356–368.

[21] Антонов А.И., Руди Д.Ю., Хацевский К.В. Исследование качества электроэнергии в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). – С. 123–130.

[22] Кузьмин Р.С., Завалов А.А., Майнагашев Р.А., Меньшиков В.А., Кузьмин И.С. Влияние компенсации реактивной мощности на величину перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. – С. 197–209.

[23] Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А., Кузьмин И.С. Устройство для компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях. Пат. 2727148 Российская Федерация, СПК Н02J 3/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2019143473; заявл. 19.12.2019; опубл. 21.07.2020, Бюл. № 21. 9 с.: ил.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАВАЛОВ Артем Александрович – ассистент, Сибирский федеральный университет, без степени.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

КУЗЬМИН Сергей Васильевич – доцент, Сибирский федеральный университет, канд. техн. наук.

E-mail: rutas2004@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1209-2961>

КУЗЬМИН Роман Сергеевич – доцент, ООО ГК "Рутас", канд. техн. наук.

E-mail: r.s.kuzmin@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3330-0267>

МЕНЬШИКОВ Виталий Алексеевич – доцент, ООО ГК "Рутас", канд. техн. наук.

E-mail: v.a.menshikov@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3706-0436>

REFERENCES

[1] Elektrobilans i potrebleniye elektroenergii v Rossiyskoy Federatsii. [Electricity balance and electricity consumption in the Russian Federation] Rezhim dostupa: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (data obrashcheniya: 05.06.2023).

[2] Nizkouglerodnyye resheniya dlya izolirovannykh regionov Rossii s vysokimi zatratami na energiyu. [Low-carbon solutions for isolated regions of Russia with high energy costs] Rezhim dostupa: http://www.cenef.ru/file/Low-Carbon_rus.pdf (data obrashcheniya: 05.06.2023).

[3] A. Miron, A.C. Cziker, S. Ungureanu, H.G. Beleiu, C.P. Darab, Reactive Power Compensation at Industrial Consumers: Romanian Study Case, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, (2022) 101–106.

[4] **R. Tiwari, K.K. Prabhakaran, T.R. Chelliah, L.P. Joshi**, Performance Analysis of Extra High Voltage 765 kV and 400 kV Hydro Power fed Transmission Lines, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Bari, Italy, (2021) 1–6.

[5] **Y. Wang, T. Wang, K. Zhou**, Reactive Power Optimization of Wind Farm Considering Reactive Power Regulation Capacity of Wind Generators, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, (2019) 4031–4035.

[6] Yedinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema (YeMISS). Fakticheskiye poteri elektroenergii v seti po tipam napryazheniya. [Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). Actual electricity losses in the network by voltage types.] Rezhim dostupa: <https://fedstat.ru/indicator/61481> (data obrashcheniya: 23.06.2023).

[7] **A.V. Mogilenko**, Snizheniye poter elektroenergii Rossiyskiye realii [Reduction of electricity losses Russian realities] // *Novosti elektrotehniki*. 2015. № 2 (92).

[8] **V.K. Pauli, R.A. Vorotnikov**, Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti kak effektivnoye sredstvo ratsionalnogo ispolzovaniya elektroenergii. [Reactive power compensation as an effective means of rational use of electricity] // *Energoekspert*. 2007. № 2. – S. 16–23.

[9] **I.V. Vlasyuk, S.Yu. Paramonov, S.I. Belov**, Vliyaniye kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na energosberezheniye predpriyatiy APK. [Influence of reactive power compensation on energy saving of agribusiness enterprise] // *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2018. № 2. – S. 40–46.

[10] **I.G. Gordiyevskiy, V.D. Lordkipanidze**, Optimizatsiya parametrov elektricheskikh setey. [Optimization of electrical network parameters] : pod red. G.V. Serbinovskogo M.: Energiya, 1978. 145 s.

[11] **G.Ye. Pospelov, N.M. Sych**, Poteri moshchnosti i energii v elektricheskikh setyakh [Power and energy losses in electrical networks] : pod red. G.Ye. Pospelova M.: Energoizdat, 1981. 216 s.

[12] **V.Z. Manusov, Ye.S. Tretyakova**, Glubokaya kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya proizvodstva. [Deep reactive power compensation in production power supply systems] // *Energoresursosberezheniye i energoeffektivnost*. 2017. № 4. – S. 33–38.

[13] **V.Z. Manusov, Ye.S. Tretyakova**, Povysheniye energoeffektivnosti na promyshlennykh predpriyatiyakh pri vypolnenii glubokoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti. [Improving energy efficiency in industrial plants when performing deep reactive power compensation] // *ELEKTRO*. 2015. № 5. – S. 2–7.

[14] **S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Povysheniye effektivnosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na osnove ustroystv pofaznoy kompensatsii. [Improving the Efficiency of Reactive Power Compensation Based on Individual Phase Compensation Devices] // *Zhurn. Sib. feder. un-ta: Tekhnika i tekhnologii*. 2020. № 13 (1). – S. 14–24.

[15] **J. Hannagan, R. Woszczeiko, T. Langstaff, W. Shen, J. Rodwell**, The Impact of Household Appliances and Devices: Consider Their Reactive Power and Power Factors, *Sustainability*, 15 (1):158, (2023) 1–11.

[16] **L. Arsov, S. Mircevski, I. Iljazi, I. Arsova, M. Cundeva**, Energy efficiency of the new household appliances, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, (2013) 1–9.

[17] **S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Ustroystvo dlya pofaznoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti. [Device for individual phase reactive power compensation]. Pat. 2697259 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H 02 J 3/18; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sibirskiy federalnyy universitet». № 2019105614; zayavl.27.02.2019; opubl. 13.08.2019, Byul. № 23. 9 s.: il.

[18] **X. Xie, D. Chen**, Data-driven dynamic harmonic model for modern household appliances, *Applied Energy*, (312), (2022).

[19] **M.M. Kamolov, Kh.B. Nazirov, S.T. Ismoilov, Sh.D. Dzhurayev, A.S. Amirkhanov**, Eksperimentalnaya otsenka kachestva elektricheskoy energii sovremennykh kommunalno-bytovykh i ofisnykh elektropriyemnikov. [Experimental assessment of the quality of electric energy of modern household and office power receivers] // *Politekhnicheskyy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya*. 2019. № 2 (46). – S. 26–33.

[20] V.I. Panteleyev, I.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, A.V. Tikhonov, Ye.V. Umetskaya, Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya gorno-pererabatyvayushchikh predpriyatiy Rossii. [The quality of electrical energy in the power supply systems of mining and processing enterprises in Russia] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. T. 25. № 3. – S. 356–368.

[21] A.I. Antonov, D.Yu. Rudi, K.V. Khatsevskiy, Issledovaniye kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami. [Investigation of the quality of electricity in electrical networks with semiconductor converters] // Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2023. № 1 (68). – S. 123–130.

[22] R.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.A. Maynagashev, V.A. Menshikov, I.S. Kuzmin, Vliyaniye kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na velichinu perenapryazheniy pri kommutatsii silovykh transformatorov. [Influence of reactive power compensation on the magnitude of overvoltages during switching of power transformers] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2021. T. 332. № 3. – S. 197–209.

[23] S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov, I.S. Kuzmin, Ustroystvo dlya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v vysokovoltnykh setyakh. [Device for reactive power compensation in high-voltage networks]. Pat. 2727148 Rossiyskaya Federatsiya, SPK H02J 3/18; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sibirskiy federalnyy universitet». № 2019143473; zayavl. 19.12.2019; opubl. 21.07.2020, Byul. № 21. 9 s.: il.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem A. ZAVALOV – *Siberian Federal University*.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

Sergey V. KUZMIN – *Siberian Federal University*.

E-mail: rutas2004@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1209-2961>

Roman S. KUZMIN – *LLC GC "Rutas"*.

E-mail: r.s.kuzmin@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3330-0267>

Vitalii A. MENSHIKOV – *LLC GC "Rutas"*.

E-mail: v.a.menshikov@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3706-0436>

Поступила: 05.07.2023; Одобрена: 11.08.2023; Принята: 13.09.2023.

Submitted: 05.07.2023; Approved: 11.08.2023; Accepted: 13.09.2023.