

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ  
СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

**А.В. ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ\*, В.А. ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ\*, Д.А. ИВАНОВ\*,  
Р.А. ХУСНУТДИНОВ\*, Г.Д. МАРДАНОВ\*, И.А. ЕВДОКИМОВ\*\***

\* Казанский государственный энергетический университет

\*\* ОАО «Сетевая компания»

*С помощью разработанного двухканального метода дистанционного контроля высоковольтных изоляторов были изучены особенности характеристик частичных разрядов (ЧР), позволяющие определять рабочее состояние изоляторов, находящихся под высоким напряжением. На этой основе были установлены диагностические принципы выделения неработоспособных изоляторов, а так же прогностические признаки дальнейшего срока службы работоспособных изоляторов.*

*Ключевые слова: дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, частичные разряды, электромагнитные и акустические датчики.*

**Введение**

Выделение дефектных изоляторов из общей системы высоковольтных изоляторов (ВИ), находящихся под рабочим напряжением и расположенных на определенных расстояниях друг от друга на распределительных узлах и подстанциях, представляет весьма сложную задачу, особенно при одностороннем расположении измерительных датчиков на расстоянии 5–10 м от ВИ. В предыдущей статье [1], во многом основанной на изложенном в патенте [2] дистанционном способе диагностики полимерных ВИ, был приведен ряд характеристик ЧР, позволяющих разделять работоспособные и неработоспособные изоляторы. Однако, как показали наши дальнейшие исследования, набор этих характеристик недостаточен для более точной оценки рабочего состояния малодефектных и условно работоспособных изоляторов и прогнозирования их дальнейшего срока службы. Вследствие этого обстоятельства были усовершенствованы методика и технические возможности разработанного метода измерений набора характеристик ЧР с использованием более узконаправленных электромагнитной и акустической антенн, повышенного частотного интервала (до 600 МГц) приема электромагнитных излучений от ЧР. Также была разработана новая методика одновременной компьютерной обработки сигналов ЧР от электромагнитного и акустического датчиков, относящихся к одному и тому же фазовому интервалу [3]. Особое внимание было обращено на возможность прогнозирования дальнейшего срока службы полимерных ВИ. Для этой цели был использован уже ранее наблюдавшийся в модельных образцах из эпоксидной смолы [4, 5] эффект изменения ряда характеристик ЧР в более продолжительном интервале измерений (~ 30–100 минут). Причем ранее этот эффект в полимерных ВИ не наблюдался, также как и не было единого мнения о его природе.

## Методика и результаты исследований

Измерения характеристик ЧР в полимерных ВИ выполнялись на лабораторном стенде кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС), позволяющем выполнять измерения характеристик ЧР как контактным методом согласно ГОСТу, так и комплексным дистанционным методом. Во втором случае имитируются полевые условия: использование нормативного рабочего напряжения (35 кВ) при расстоянии узконаправленных электромагнитной и акустической антенн от изолятора ~ 5–7 метров. Импульсы ЧР характеризуются длительностью от  $10^{-7}$  до  $10^{-11}$  с, кажущимся электрическим зарядом  $10^{-8} \leq q \leq 10^{-12}$  Кл, импульсом тока  $10^{-8} \leq I \leq 10$  А.

Частичные разряды создают временной пробой изоляции с размерами  $\Delta L$   $10 \leq e \leq 10^4$  мкм. Процесс ЧР сопровождается изучением импульсов высокочастотного электрического поля, спектральный состав которых расположен в интервале  $10^4 \leq \beta_{эм} \leq 10^{16}$  Гц. Одновременно возникает пульсирующее излучение акустических волн в воздушное пространство, окружающее области ЧР в спектральном интервале  $20 \text{ Гц} \leq f_a \leq 200 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ .

Поле излучения от любых источников характеризуется тремя параметрами размерности длины: масштабом источника излучения  $\Delta L$ , длиной волны  $\lambda$ , расстоянием от источника излучения  $r$ . Эти параметры являются основой классификации самих источников и создаваемых ими полей.

При выполнении условий  $\Delta L \ll \lambda$  область ЧР можно рассматривать как точечный сосредоточенный источник, излучающий сферические волны. Параметр  $r/\lambda$  определяет характер излучаемого поля в зависимости от удаления от источника. Для электромагнитных волн на расстояниях  $r < \lambda$  поле излучения представлено квазистатическими полями (поля индукции), быстро убывающими в зависимости как  $r^{-2}$  или  $r^{-3}$ . На больших расстояниях  $r \gg \lambda$  затухание волн убывает как  $r^{-1}$ . Эту область определяют как волновую зону, содержащую чисто бегущие волны, переносящие энергию.

Использование электромагнитных и акустических волн, излучаемых ЧР, наиболее эффективно именно в волновой зоне, где наблюдаются наименьшие изменения в затухании при пространственном перемещении электромагнитных или акустических датчиков.

Одновременно двумя датчиками измерялись число и интенсивность импульсов ЧР в каждом узком фазовом интервале высокого напряжения ( $20^0$ ) с их накоплением в течение 18 с, что вполне удовлетворяло стохастическому характеру возбуждения ЧР. Компьютерный процесс обработки сигналов ЧР заканчивался построением следующих характеристик: числа и амплитуды импульсов в каждом узком фазовом интервале  $\Delta\phi$ ; распределения числа ЧР по амплитудам; изменения числа амплитуд в течение одного часа приложения высокого напряжения. Следует подчеркнуть определенные отличия построенных нами характеристик ЧР от приведенных в ГОСТ Р 55191–2012 [6], в котором рекомендуется измерять среднее число и интенсивность импульсов ЧР за определенный временной интервал (1 секунду) без привязки к отдельным фазовым интервалам.

В начале измерений электромагнитный и акустический приемники градуируют по чувствительности с учетом расстояния до источника ЧР, используя параметры характеристик (частичный разряд  $q$ , средний ток  $I$ ), полученные контактным методом для бездефектного изолятора того же типа. При использовании модельного представления ЧР в виде диполя [7], а расстояние  $z$ —между источником ЧР и

приемником, соответствующим дальней зоне, напряженность электромагнитного поля  $E_d$  можно представить в виде

$$E_d = k I \Delta L / f \varepsilon r,$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $f$  – частота излучения;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $I$  – ток ЧР. При неизменности  $\Delta L$  во время измерений вполне уместно использовать значения  $E_d$  как эквивалент  $q$ . Измерения, проводившиеся на двух расстояниях:  $r = 1$  и  $6$  м, показали хорошую сопоставимость с точностью до 25–30% результатов, полученных с помощью электромагнитных и акустических датчиков для каждого образца ВИ, а также с характеристиками ЧР, полученными с помощью контактного метода.

Была изучена серия подвесных полимерных ВИ ЛК 70/35 в составе 10 экземпляров, выведенных из эксплуатации после окончания нормативного срока службы в Казанских электрических сетях. Изучение полученных комплексным методом характеристик ЧР, в упомянутых выше ВИ, позволило разделить их на три группы.

ВИ с минимальными по числу  $n$  и интенсивности ( $q \leq 20$  пКл) ЧР, расположенными в фазовых интервалах  $\Delta\phi$  вблизи  $90$ – $270^\circ$  (табл. 1) и не изменяющими характеристики ЧР со временем. Они были отнесены к бездефектным и полностью работоспособным ВИ.

Таблица 1

Характеристики ЧР для трех групп полимерных ВИ: № – номер изолятора;  $U_i$  – напряжения начала возникновения ЧР;  $\Delta\phi +$  и  $\Delta\phi -$  – фазовые интервалы ЧР для положительных и отрицательных полувольт высокого напряжения;  $q_i$  – интенсивность ЧР;  $n$  – число ЧР;  $\Delta q_{max}$ ,  $\Delta q_{i max}$  и  $n_{max}$  – интервал, интенсивность и число максимальных ЧР, превышающих среднее значение за период

Группа	№	$U_i$ , кВ	$\Delta\phi +, ^\circ$	$\Delta\phi -, ^\circ$	$n$	$q_i$ , пКл	$\Delta q_{max}$	$\Delta q_{i max}$	$n_{max}$
1	2	35	75 – 85	250-265	85	20	75 - 85	30	10
2	3	28	60 - 80	210-240	210	50	65-75 235-240	100	15
2	4	23	60 – 80	210-240	300	55	65-85 240-250	100	20
2	1	25	60 – 80	210-240	270	45	60-80 245-245	110	20
3	5	20	20 – 60	190-240	350	400	40-50 190-210	800	30
3	6	20	15 – 60	190-230	250	370	15-25 195	750	20

Ко второй группе отнесены ВИ, содержащие ЧР ( $n \leq 300$  и  $q \leq 100$  пКл) с максимумами при  $\Delta\phi = 600$ – $800^\circ$  и  $2100$ – $2400^\circ$ , а также небольшое количество мощных ЧР с  $n=20$  при  $q=100$ – $150$  пКл, не имевших макроскопических дефектов. Они отнесены к бездефектным и работоспособным в настоящее время ВИ.

В третью группу вошли ВИ, имеющие макроскопические дефекты с размерами порядка нескольких ммс ЧР, расположенными в фазовых интервалах  $200$ – $600^\circ$  и  $1900$ – $2400^\circ$  со средней интенсивностью порядка 350 пКл. Кроме того, наблюдались отдельные ( $n=20$ ) ЧР с интенсивностью 800 пКл. Эти ВИ были отнесены к дефектным и условно работоспособным изоляторам.

На рис. 1, 2 показаны характеристики ЧР, типичные для изоляторов второй и третьей групп. Сравнение параметров фазовых интервалов для наиболее интенсивных и многочисленных ЧР групп 2 и 3, представленных на рис. 1, 2 и в табл. 1, показывает, что существует значительный фазовый сдвиг (более, чем в 2–3 раза) полос ЧР в сторону меньших фазовых углов как для положительных, так и отрицательных фаз высокого напряжения. Кроме того, наблюдалось значительное отличие в распределении числа ЧР в зависимости от интенсивности ЧР для бездефектных и дефектных полимерных ВИ (рис. 2).

Были изучены временные зависимости характеристик ЧР при приложении рабочего напряжения 35 кВ в течение 1–2 часов. Необходимая длительность определялась на основе полученных ранее результатов на модельных образцах полимеров [4, 5]. Однако ранее в реальных полимерных ВИ характеристики ЧР при длительном воздействии не изучались. В ходе изучения было установлено, что в бездефектных и условно бездефектных образцах при длительном воздействии рабочего напряжения характеристики ЧР сохраняются неизменными с точностью до 5%. Однако в дефектных образцах третьей группы наблюдалось уменьшение средней интенсивности малых ЧР ( $q \leq 100$  пКл) на 15–20% и почти также – уменьшение их числа (рис. 2).

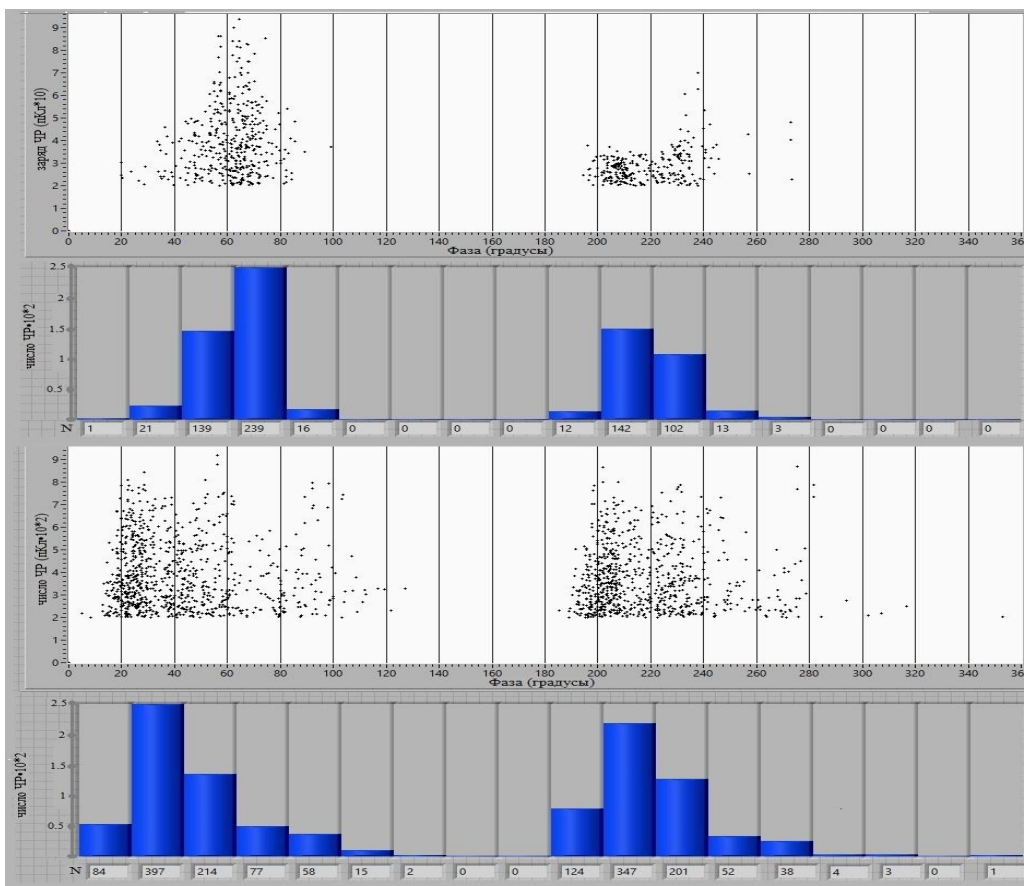


Рис. 1. Характеристики ЧР для изоляторов: сверху – бездефектного (группа 2); внизу – дефектного (группа 3); а – интенсивность ( $q_i$ ); б – число ( $n$ ) ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения

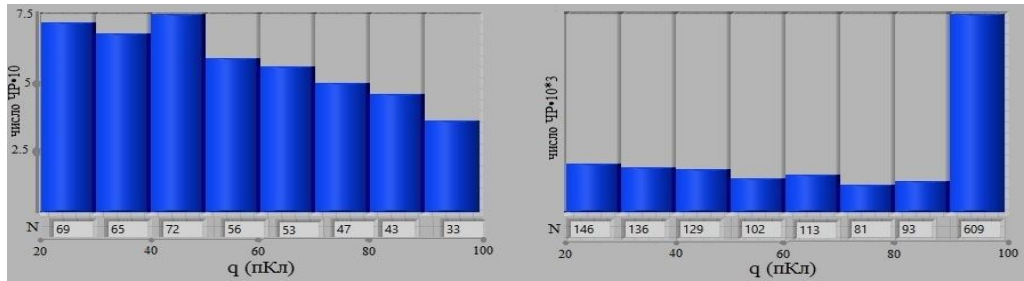


Рис. 2. Распределения числа ЧР в зависимости от интенсивности ( $q$ ):  
слева – для бездефектного, справа – дефектного изоляторов

Одновременно фаза начала ЧР сдвигалась в сторону меньших углов. Более неожиданным было увеличение числа и интенсивности самых мощных ЧР ( $q \geq 2,5$  нКл) более чем на 10–15%, а их фазовые интервалы становились более узкими и сдвигались в сторону больших значений (рис 3).

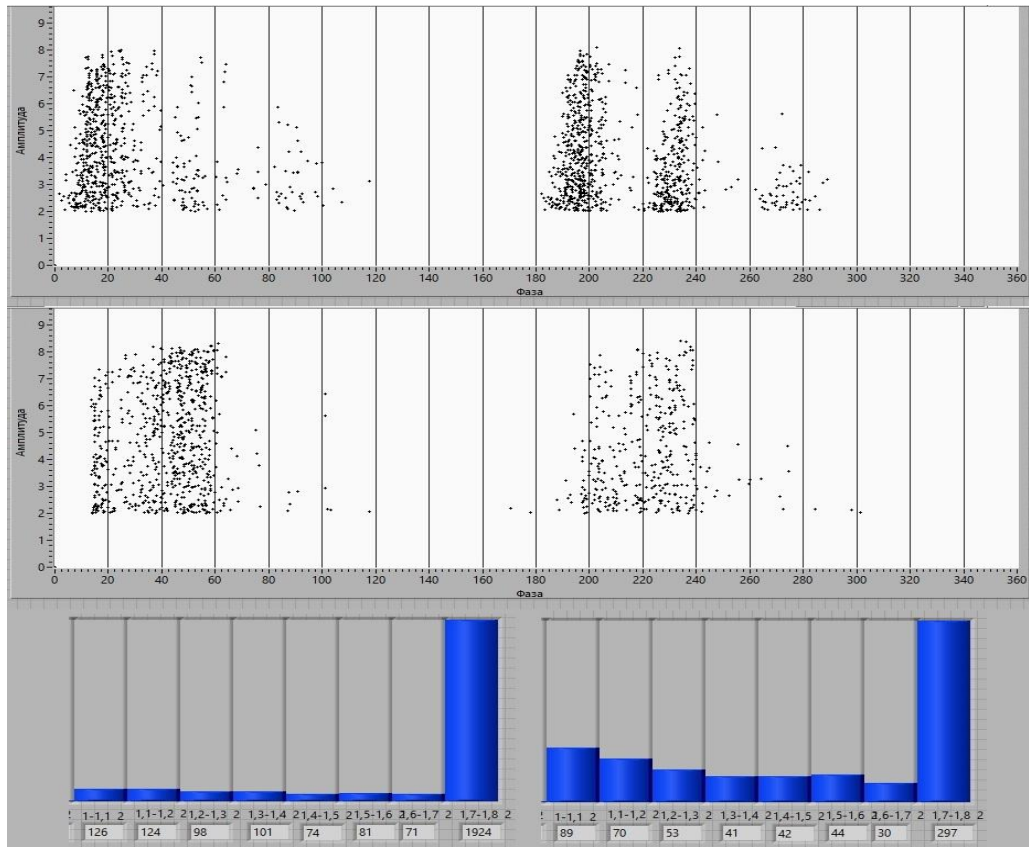


Рис. 3. Амплитудно-фазовые характеристики условно дефектного изолятора в начале измерений (верх) и через 1 час воздействия высокого напряжения (низ).  $a, b$  – распределение числа ЧР в зависимости от интенсивности  $q$ : слева – при  $t = 0$ , справа – при  $t = 1$  час

Хотя до настоящего времени нет какой-либо единой модели, с помощью которой можно было бы однозначно объяснить подобные временные изменения в характеристиках ЧР [5, 8], но мы полагаем, что эти результаты можно использовать для

прогнозирования дальнейшего рабочего состояния полимерных ВИ. По-видимому, изменение характеристик ЧР в дефектных изоляторах, а также и в модельных образцах с искусственно созданными дефектами, является следствием нескольких причин, вызванных длительным воздействием электрического поля. Среди них: уменьшение площади ЧР вследствие деградации поверхности распределения зарядов в объеме полимера, динамики процессов в электронных ловушках. На наш взгляд, наиболее вероятной из этих причин является перераспределение зарядов на дефектах, поскольку после выключения высокого напряжения в течение нескольких часов в образцах с дефектами происходило восстановление первоначальных характеристик малых ЧР ( $q \leq 100$  пКл). Причиной тому могут быть релаксационные процессы в системе электрических зарядов ионов и перемещенных электронов и дырок, что ранее было обнаружено в работах [8, 9]. Следует подчеркнуть, что приведенные выше изменения во временных характеристиках ЧР наблюдались только в образцах полимерных ВИ, не имевших электрических пробоев с образованием проводящего канала между электродами. Некоторое увеличение числа и интенсивности мощных ЧР ( $q \geq 1$  пКл) вблизи фазовых углов, близких к  $90$  и  $270^\circ$ , связано с дефектами, которые необратимо изменяются при длительном воздействии высокого напряжения. Следовательно, обнаруженные обратимые временные изменения характеристик ЧР могут характеризовать процесс накопления локальных изменений в полимерных ВИ, приводящих его к зарождению и развитию магистрального пробоя.

#### **Выводы**

Оценивая результаты изучения характеристик ЧР в полимерных ВИ при приложении нормированного высокого напряжения, можно сделать следующие выводы.

1. В отличие от контактного стендового метода испытания изоляции высоким напряжением (ГОСТ Р 55191–2012), где в основу положен принцип измерения таких характеристик ЧР, как интенсивность, частота повторения и момент возникновения за определенный интервал времени (секунда), измерение подобных характеристик при бесконтактном дистанционном методе связано с большими погрешностями, зависящими от расстояния до ВИ, влияния климатических и внешних помех.

2. Наиболее важными и достоверными характеристиками ЧР при дистанционном контроле рабочего состояния полимерных ВИ являются изменения фазовых интервалов, соответствующих наиболее мощным ЧР, интенсивности и частоты повторения, по сравнению с бездефектными ВИ того же типа.

3. Повышению точности измерений соответствует одновременное использование нескольких методов: электромагнитного и акустического, а также дополнительно оптического, с накоплением сигналов ЧР не менее чем за 10 секунд и последующей компьютерной обработкой.

4. Диагностический прогноз дальнейшего срока рабочего состояния положительных ВИ возможен по оценке изменения фазовых углов начала ЧР, числа и интенсивности самых мощных импульсов ЧР за длительный период (не менее одного часа) воздействия высокого напряжения.

#### **Summary**

*With the help of the developed two-channel method for remote control of high-voltage insulators have been studied peculiarities of characteristics of partial discharges (PD) for determining a working condition of insulators under high voltage. Therefore, they have established diagnostic principles for the allocation of faulty insulators, as well as predictive signs of the future lifetime of healthy insulators.*

**Keywords: remote diagnostics, high voltage insulators, partial discharges, electromagnetic and acoustic sensors.**

#### Литература

1. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д.// Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7- 8.
2. Пат. 2483315 Российская Федерация, МПК GOIR 31/12. Способ бесконтактной диагностики состояния высоковольтных полимерных изоляторов / Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Евдокимов Л.И., Черномашенцев А.Ю. 27.05.2013 г.
3. Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И., Синюгин И.Е., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д. Структура компьютерной системы измерения характеристик частичных разрядов в высоковольтных изоляторах / XIII ежегодная конференция компании National Instruments. М., 2014. 402 с.
4. Hikita M, Yamada K, Nakamura A, Measurements of partial discharge by computer and analysis of partial discharge distribution by the Monte Carlo method. IEEE Transactione on Electric Insulation. 1990. v 25. №3.
5. Wu K, Suzuoki J, Dissado L.A. The contribution of discharge area variation to partial discharge pattern in disk – voids, J. Phys.D 2004. V 37. № 6.
6. ГОСТ Р 55191–2012. Метод испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов М.: Стандартиформ, 2014.
7. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007.
8. Слуцкер А.И., Поликарпов Ю.И., Гиляров В.Л. Об элементарных актах в кинетике электрического разрушения полимеров // Журнал техн. физики. 2006. №12.
9. Pan C. Meng Y, Wuk, Han Z, Qin K, Cheng Y Simulayion of partial discharge sequences using bluid equations. J. Phys D. 2004. V 44. № 6.

**Поступила в редакцию**

**07 июня 2016 г.**

**Голенищев-Кутузов Александр Вадимович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843) 519-42-78; 8-917-250-06-35. E-mail: alex.kutuzov@mail.ru.

**Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843) 519-42-78.

**Иванов Дмитрий Алексеевич** – к.т.н., старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843) 519-42-78; 8-927-248-37-13. E-mail: divanale@gmail.com.

**Марданов Георгий Дамирович** – аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843) 519-42-78; 8-987-237-30-56.  
E-mail: mardanov1992@mail.ru.

**Хуснутдинов Раиль Алексеевич** – аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843) 519-42-78; 8-987-270-96-75. E-mail: 666plotter666@gmail.com.

**Евдокимов Игорь Анатольевич** – главный инженер филиала ОАО «Сетевая компания» Казанские Электрические Сети.

© Проблемы энергетики, 2016, № 5-6