

Исследование влияния короны в электропередачах на качество электроэнергии по n -й гармонической составляющей тока и напряжения¹

ШАРОВ Ю. В., НАСЫРОВ Р.Р., ОЛЕКСЮК Б.В., СИМУТКИН М.Г.,
ТУЛЬСКИЙ В.Н., ШАМОНОВ Р.Г.

Приведена модель воздушной линии электропередачи переменного тока для оценки влияния короны на качество электроэнергии. Приведены результаты натурного эксперимента на линии 500 кВ, а также сопоставление их с результатами математического моделирования. Показано, что влияние короны на провода высоковольтных линий электропередачи на качество электроэнергии по n -й гармонической составляющей напряжения незначительно.

Ключевые слова: линии электропередачи, коронный разряд, качество электроэнергии, гармоники тока, моделирование

Измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ), проведенные на подстанциях (ПС) в высоковольтных электрических сетях 220–750 кВ, показали, что в спектре напряжения содержатся 3-, 5-й и 7-я гармоники, значения которых в ряде случаев превышают нормально и предельно допустимые стандартом уровни [1]. Подобные превышения наблюдаются и в электрических сетях, не содержащих мощных нелинейных электроприемников, из чего следует необходимость оценки влияния основного оборудования энергосистемы на качество электроэнергии (КЭ) и искажения синусоидальности напряжения, в частности.

Одной из возможных причин искажения синусоидальности напряжения и тока на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи рассматривается корона. Линии напряжением 220 кВ и выше, на проводах которых возникает коронный разряд, являются источниками высших гармоник тока [2, 3] из-за несинусоидальности тока короны (рис. 1). В спектре тока короны ток 3-й гармоники составляет около 30% активной составляющей тока 1-й гармоники, а токи 5-й и 7-й гармоник 12 и 4% соответственно [4]. Гармонические составляющие тока короны более высокого порядка незначительны.

Известно также, что при короне увеличение заряда вблизи проводов эквивалентно увеличению емкости фаз ВЛ [5], что приводит к росту реактив-

An overhead AC power line model intended for estimating the effect of corona on the quality of electric power is presented. The results from a field experiment carried out on a 500 kV power line are presented, and their comparison with the results of mathematical simulation is given. It is shown that corona on the wires of high-voltage power lines has an insignificant influence on the quality of electric power determined by the n th harmonic component of voltage.

Key words: power lines, corona discharge, quality of electric power, harmonic components of current, simulation

ной мощности, генерируемой высоковольтными линиями электропередачи.

Для экспериментальной оценки влияния ВЛ на КЭ в электрической сети 500 кВ (рис. 2) проведены измерения. В ходе эксперимента было осуществлено одностороннее включение линии 500 кВ, находившейся изначально в отключенном состоянии, со стороны исследуемой подстанции ПС 1. Показатели КЭ по напряжению на шинах ПС 1 и току линии измерялись с помощью средства измерения (СИ) ПКЭ, которое позволяет регистрировать действующие значения гармонических составляющих токов и напряжений и их фазы, осредненные на интервалах 160 мс. При этом значения ПКЭ регистрировались непрерывно на протяжении всего эксперимента, как при отключенной линии, так и в режиме одностороннего включения, в том числе в момент коммутации.

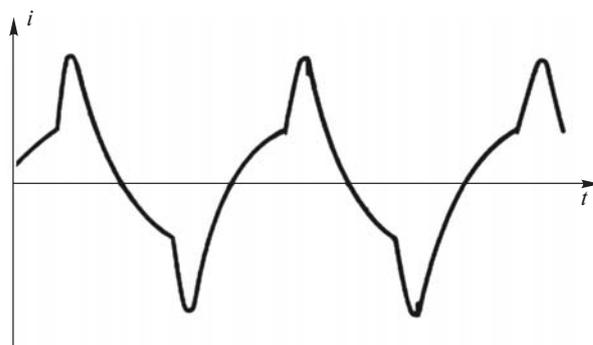


Рис. 1. Осциллограмма тока короны

¹ Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Наука и научно-педагогические кадры инновационной России» (грант № 14.В37.21.0348 от 27.07.2012 г.).

В качестве объекта исследования выбрана ВЛ протяженностью 49 км, что обеспечивает незначительную разницу напряжений основной частоты по ее концам в режиме одностороннего включения. Также протяженность выбранной ВЛ позволяет считать, что сток токов высших гармоник, генерируемых короной, через емкость фаз линии на землю незначителен.

Условия проведения эксперимента и основные параметры исследуемой линии электропередачи 500 кВ, при которых проводился эксперимент, были следующими:

Атмосферное давление	762 мм рт. ст.
Температура воздуха	-3,0 °С
Относительная влажность воздуха	96,97%
Осадки	Снег
Протяженность линии электропередачи	49 км
Расположение фаз над землей	Горизонтальное
Расстояние между соседними фазами	11 м
Расстояние между проводами в фазе	0,4 м
Число и марка проводов фазы	3 x АСО-500

Схема подключения СИ ПКЭ в ходе эксперимента показана на рис. 2. Для повышения точности получаемых результатов подключение СИ ПКЭ ко вторичным цепям линейных трансформаторов тока осуществлялось напрямую без токоизмерительных клещей.

Зарегистрированные в ходе эксперимента действующие значения гармонических составляющих напряжения (при отключенной линии – $U_{\Phi(n)}$; после одностороннего включения – $U_{\Phi(n)}$), соответствующие коэффициенты n -й гармонической составляющей напряжения для 3, 5 и 7-й гармоник, а также действующие значения гармонических составляющих тока линии при ее одностороннем включении на шины ПС 1 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гармоника n	Составляющие напряжения, В		Коэффициенты составляющих напряжения, %		Составляющая тока линии, $I(n)$, А
	$U_{\Phi(n)}$	$U_{\Phi(n)}$	$K_{\Phi(n)}$	$K_{\Phi(n)}$	
1-я	296851	297706	–	–	60,6
3-я	687	706	0,23	0,24	0,1
5-я	2170	2330	0,73	0,78	0,6
7-я	598	666	0,20	0,22	0,3

Примечание: в таблице показаны средние для трех фаз действующие значения фазных напряжений и токов.

Из табл. 1 видно, что перед односторонним включением линии напряжение на шинах 500 кВ ПС 1 искажено, однако коэффициенты n -й гармонической составляющей напряжения для 3, 5 и 7-й гармоник находятся в пределах нормально допустимых значений [1]. Также видно, что после одностороннего включения линии на шинах подстанции повышается как напряжение основной частоты, так и напряжения гармонических составляющих. Повышение напряжения на основной частоте связано со стоком реактивной мощности с односторонне включенной ВЛ в сторону ПС 1, а повышение напряжения гармонических составляющих обусловлено током короны. Важно отметить, что при одностороннем включении линии значения гармонических составляющих напряжения и коэффициенты n -й гармонической составляющей напряжения на шинах ПС 1 возросли незначительно, что говорит о незначительном влиянии короны на КЭ в электрической сети.

Интервал времени между измерением гармонических составляющих напряжения на шинах подстанции при отключенной линии ($U_{\Phi(n)}$) и после затухания переходного процесса, сопровождающего одностороннее включение линии ($U_{\Phi(n)}$), составил менее 1 с. Таким образом, можно ожидать, что изменения в действующем значении напряжения на основной частоте и на высших гармониках обусловлены лишь включением линии, а не какими-либо иными событиями в прилегающей электрической сети. Для подтверждения этого необходимо определить ток короны, выделив его из измеренного тока линии, и рассчитать создаваемое этим током повышение действующего значения гармонических составляющих напряжения на шинах ПС 1.

Для определения тока короны $i_{кор}(t)$ необходимо рассчитать ток $i_{pc}(t)$, стекающий с линии в режиме одностороннего включения на шины ПС 1 без учета коронного разряда. При расчете тока $i_{pc}(t)$ к линии приложено искаженное короной напряжение U_{Φ} т.е. соответствующее напряжению на шинах ПС 1 после включения линии. Затем из по-

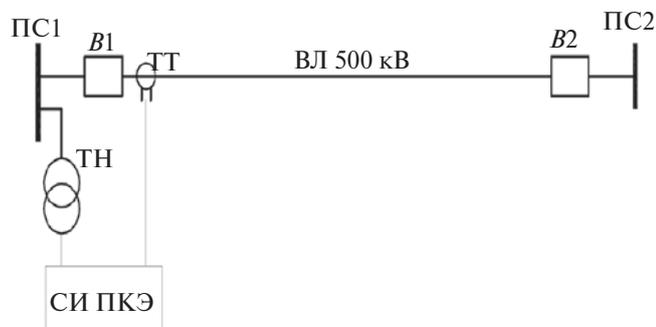


Рис. 2. Схема исследуемой линии электропередачи в ходе эксперимента: в режиме одностороннего включения выключатель $B1$ включен, $B2$ отключен

лученного расчетного тока необходимо вычесть измеренный с помощью СИ ПКЭ ток $i_{\text{изм}}(t)$. Разница между измеренным и полученным при расчете по заданному напряжению токами определит искомым ток короны:

$$i_{\text{кор}}(t) = i_{\text{изм}}(t) - i_{\text{рс}}(t). \quad (1)$$

Расчет выполнен для П-образной схемы замещения линии, представленной в модели (рис. 3), параметры которой определяются по следующим формулам [6]:

$$R = \frac{r_0 l}{n_{\text{пр}}}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где r_0 – активное сопротивление провода в фазе ВЛ на единицу длины; $n_{\text{пр}}$ – число проводов в расщепленной фазе ВЛ; l – длина моделируемого участка ВЛ:

$$L = L_0 l = \frac{m_0 \varepsilon \ln \frac{D_{\text{сг}}}{R_3}}{2 p \varepsilon} + \frac{m \ddot{\sigma}}{n_{\text{пр}} \varnothing} l, \text{ Гн}, \quad (3)$$

где $D_{\text{сг}}$ – среднегеометрическое расстояние между фазами ВЛ; R_3 – эквивалентный радиус расщепленной фазы; $m_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ – магнитная постоянная:

$$C = C_0 l = \frac{2 p \varepsilon_0}{\ln \frac{D_{\text{сг}}}{R_3}} l, \text{ Ф}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ – электрическая постоянная.

Полученная с помощью модели (рис. 3) кривая тока $i_{\text{кор}}(t)$ фазы С представлена на рис. 4. Форма

тока короны для других фаз качественно совпадает с представленной кривой.

Разложив кривую тока короны на гармонические составляющие, можно определить значение напряжения n -й гармоники, создаваемого короной, а также влияние тока короны на изменение напряжения n -й гармоники на шинах подстанции [7]. Напряжение n -й гармоники $U_{\text{кор}(n)}$ (фазное значение), создаваемое короной на сопротивлении системы, можно определить по известному действующему значению соответствующей гармоники фазного тока короны:

$$U_{\text{кор}(n)} = I_{\text{кор}(n)} j x_{\text{с}} n, \quad (5)$$

где $x_{\text{с}}$ – эквивалентное индуктивное сопротивление системы на шинах ПС 1 на основной частоте при отключенной исследуемой ВЛ.

Сопротивление $x_{\text{с}}$ больше, чем эквивалентное сопротивление системы при включенной ВЛ (при нормальной схеме). Для расчета $x_{\text{с}}$ необходимо знать действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания $I_{\text{к}}^{(3)}$ на шинах 500 кВ ПС 1 при отключенной исследуемой ВЛ:

$$x_{\text{с}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{к}}^{(3)}}. \quad (6)$$

Расчетное (диспетчерское) значение тока $I_{\text{к}}^{(3)}$ на шинах 500 кВ ПС 1 известно и составляет 23,8 кА, следовательно $x_{\text{с}} = 12,1$ Ом.

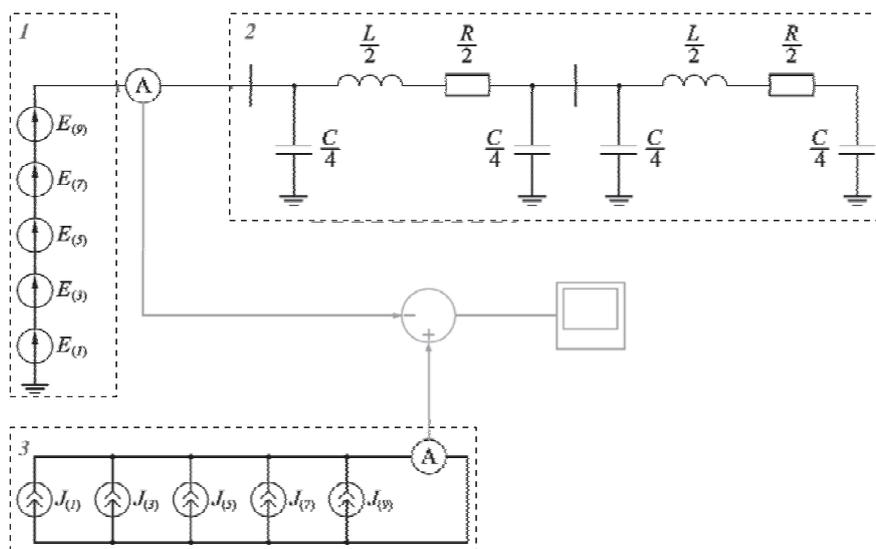


Рис. 3. Модель для расчета тока короны по результатам эксперимента: 1 – каскад источников напряжения, моделирующий искаженное напряжение на шинах подстанции; 2 – модель фазы ВЛ, состоящая из двух П-образных звеньев; 3 – цепь источников тока, моделирующая измеренный с помощью СИ ПКЭ ток, стекающий с исследуемой линии в режиме одностороннего включения

Влияние тока короны на изменение напряжения n -й гармонической составляющей на шинах ПС 1:

$$U_{кор(n)от} = \frac{\left| \frac{\Delta U_{кор(n)}}{\Delta U_{(n)}} \right|}{\left| \frac{\Delta U_{кор(n)}}{\Delta U_{(n)}} \right|} 100 = \frac{I_{кор(n)} x_{\phi n}}{\Delta U_{(n)}} 100, \quad (7)$$

где $\Delta U_{(n)} = U_{(n)} - U_{(n)}$ – изменение действующего значения n -й гармонической составляющей фазного напряжения на шинах ПС 1 после односторон-

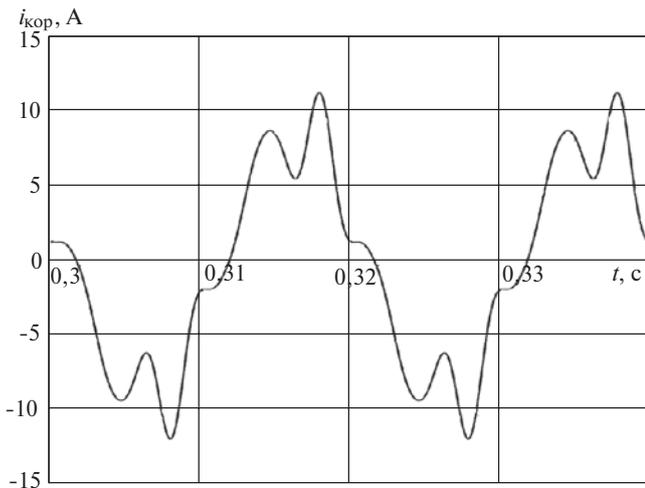


Рис. 4. Кривая расчетного тока короны фазы С

него включения линии.

Результаты разложения кривой полученного тока короны в спектр гармонических составляющих с использованием модели на рис. 4, расчета напряжения n -й гармоники, создаваемого короной, а также влияния тока короны на изменение напряжения n -й гармоники на шинах ПС 1 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Гармоника n	Ток $I_{кор(n)}$, А	Напряжение		Изменение напряжения, $\Delta U_{(n)}$, В
		$U_{кор(n)}$, В	$U_{кор(n)от}$, %	
1-я	6,3	–	–	–
3-я	0,3	11	59	18
5-я	1,6	100	63	160
7-я	0,7	58	86	68

Из анализа табл. 2 следует, что влияние тока короны на изменение напряжения n -й гармоники на шинах подстанции в эксперименте составляет около 60% и более. Это говорит о том, что ток короны исследуемой линии, полученный на модели (рис. 3) по данным эксперимента, близок к реальному току короны. Следует обратить внимание на то, что в полученном спектре тока короны преоб-

ладает 5-я гармоника, в то время как в [4, 5] в спектре тока короны преобладающей является 3-я гармоника. Кроме того, увеличение действующего значения гармоник фазного напряжения при одностороннем включении линии не превышает 20 В для 3-й гармоники, 200 В для 5-й и 100 В для 7-й, из чего можно сделать вывод о весьма незначительном ухудшении синусоидальности кривой напряжения под действием тока короны.

Ток короны на основной частоте имеет активно-емкостной характер. Его активная составляющая определяет потери активной мощности на корону, которые в ходе эксперимента составили 947 кВт, а емкостная связана с увеличением эквивалентной емкости фазы при коронировании за счет образования в пространстве вблизи проводов фаз объемного заряда. Зарядная мощность исследуемой ВЛ без учета короны в условиях эксперимента составляет 49,4 Мвар, в то время как с учетом короны зарядная мощность линии составила 54,0 Мвар, что говорит об эквивалентном увеличении емкости фазы ВЛ на 9% при указанных ранее условиях.

Для оценки влияния короны на уровни n -й гармоники тока и напряжения предлагается представить ВЛ в виде цепочечной схемы замещения, составленной из П-образных звеньев, дополненных источниками тока $J_{(n)}/2$, включенными параллельно емкостям между фазой и землей. Электри-

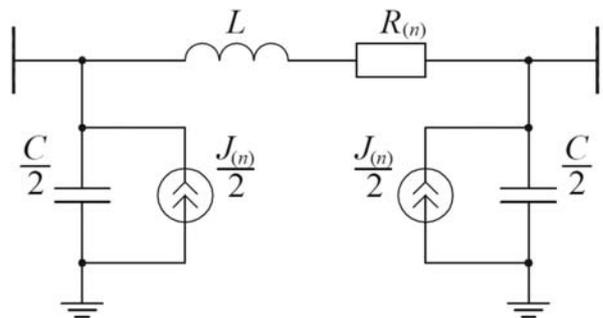


Рис. 5. Звено цепочечной модели ВЛ для оценки влияния короны на коэффициент n -й гармонической составляющей тока и напряжения

ческая схема звена модели представлена на рис. 5.

В представленной на рис. 5 модели активное сопротивление определяется по формуле

$$R_{(n)} = \frac{\sqrt{nr_0}l}{n_{пр}}, \quad \text{Ом}, \quad (8)$$

где n – номер гармоники; l – длина моделируемого участка линии.

Ток источников тока может быть рассчитан по потерям активной мощности на корону:

$$J_{(n)} = h_{(n)} \frac{P_{кор}}{\sqrt{3}U} \frac{l}{l_{л}}, \quad \text{А}, \quad (9)$$

где $P_{кор}$ — потери активной мощности на корону, определяются по известным методикам (например [8]); I_L — общая протяженность ВЛ; $h_{(n)}$ — безразмерный коэффициент, показывающий отношение действующих значений тока n -й гармоники и активной составляющей тока основной частоты в токе короны [4].

Значения коэффициента $h_{(n)}$ для 3-й и 5-й гармоник могут быть получены по кривым на рис. 6 [5], а для 7-й гармоники значение коэффициента может быть принято в 3 раза меньшим значения коэффициента для 5-й гармоники.

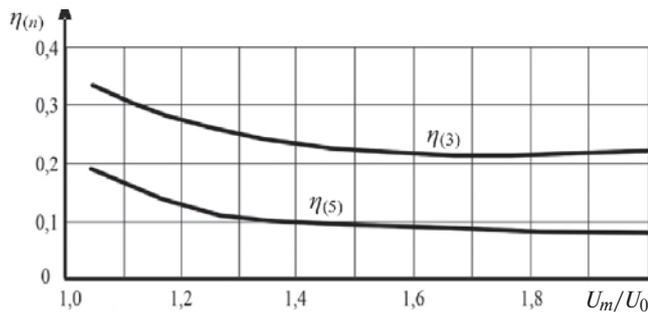


Рис. 6. Зависимость коэффициентов $h_{(n)}$ от относительного напряжения на линии: U_m — амплитуда приложенного к линии напряжения; U_0 — начальное напряжение короны

Расчетные значения 3, 5 и 7-й гармоник тока короны, полученные с использованием модели линии (рис. 5) при подстановке в формулы (3), (4), (8), (9) параметров, соответствующих режиму одностороннего включения исследуемой ВЛ 500 кВ, и также полученные по результатам проведенного эксперимента, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Гармоника n	Коэффициент $h_{(n)}$	Значения составляющих тока, А	
		при эксперименте $I_{кор(n)}$	при моделировании $J_{(n)}$
3-я	0,25	0,3	0,27
5-я	0,10	1,6	0,11
7-я	0,03	0,7	0,04

Из табл. 4 видно, что полученное по результатам эксперимента значение 3-й гармоники тока короны и ток 3-й гармоники в модели практически совпадают. При этом полученные экспериментально значения 5-й и 7-й гармоник тока короны более чем на порядок превышают полученные на модели по методике [5] значения. Столь существенную разницу можно объяснить тем, что в [5] приведены данные, полученные на экспериментальных установках при идеальных условиях. Измерения в ходе описанного эксперимента проводились на реальной линии в условиях повышенной влажности и

снегопада. Под влиянием таких погодных условий следует ожидать увеличения тока, которое отразится на его амплитуде и форме кривой. Важно отметить, что при значениях тока короны 5-й и 7-й гармоник, полученных по результатам проведенного эксперимента, влияние их на увеличение коэффициентов 5-й и 7-й гармонических составляющих напряжения на шинах подстанции незначительно.

Выводы. 1. Исследование формы кривой тока короны показало, что в условиях натурального эксперимента в его спектре преобладающей является 5-я гармоника, при этом под действием коронного разряда эквивалентная емкость фаз исследуемой ВЛ превышает геометрическую примерно на 9%.

Предложенная математическая модель воздушной линии электропередачи 220–750 кВ позволяет оценить воздействие коронного разряда на проводах линии на качество электроэнергии в электрической сети. Достоверность предложенной модели подтверждается близкими результатами эксперимента и математического моделирования, полученными для 3-й гармоники. Однако на 5-й и 7-й гармониках наблюдаются существенные расхождения между результатами моделирования и экспериментальными данными.

Инструментально зафиксировано и подтверждено расчетами на математической модели ВЛ незначительное влияние короны на коэффициенты n -й гармонической составляющей тока линии и напряжения на шинах подстанций.

Высшие гармоники тока, создаваемые линиями электропередачи высокого напряжения под действием короны, даже на крупных узловых подстанциях энергосистемы не могут стать причиной существенного искажения формы кривой напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения 13109-97. — Минск: ИПК «Издательство стандартов», 1998.
2. Peeks F.W. (Jr.) Voltage and Current Harmonics Caused by Corona. — TRANS. A.I.E.E., 1921.
3. Gardiner M.F. Corona Investigation on an Artificial Line. — TRANS. A.I.E.E., 1925.
4. Змазов Е.Ю., Крайчик Ю.С., Минин В.Т., Сохранский А.С. Корона на проводах высоковольтных линий электропередачи как источник третьей гармоники тока в электрических сетях. — Электрические станции, 1989, № 12.
5. Левитов В.И. Корона переменного тока. — М.: Энергия, 1969.
6. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А. и др. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. для электроэнерг. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. /Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. — М.: Высшая школа, 1998.
7. Каргашев И.И., Насыров Р.Р., Олесюк Б.В. и др. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220–500 кВ. — Электричество, 2013, № 1.

7. РД 34.20.172. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330 — 750 кВ и постоянного тока 800 — 1500 кВ. — М.: ОРГРЭС, 1975.

[23.01.13]

Авторы: Карташев Илья Ильич окончил Московский энергетический институт МЭИ) по специальности Электрические системы и сети в 1962 г. В 1974 г. защитил диссертацию «Статические источники реактивной мощности» в МЭИ. Заместитель заведующего кафедрой «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Насыров Ринат Ришатович окончил МЭИ (ТУ) по направлению «Электроэнергетика» в 2010 г. Младший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Олексюк Борис Викторович окончил МЭИ (ТУ) по специальности «Электроэнергетические системы и сети» в 2010 г. Инженер, кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Симуткин Максим Геннадьевич окончил «НИУ «МЭИ» по направлению «Электроэнергетика» в 2012 г. Инженер кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Тульский Владимир Николаевич окончил МЭИ (ТУ) по специальности «Электроэнергетические системы и сети» в 2001 г. В 2004 г. защитил диссертацию «Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения» в МЭИ (ТУ). Заместитель заведующего кафедрой «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

Шамонов Роман Геннадьевич окончил МЭИ по специальности «Электроэнергетические системы и сети» в 2000 г. В 2003 г. защитил диссертацию «Разработка методики оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности и энергии в электрических сетях» в МЭИ (ТУ). Заместитель начальника службы организации систем оперативно-диспетчерского управления ОАО «ФСК ЕЭС».