



УДК 621.31.015.038

А.Г. Золотых, Ф.Х. Халилов

ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТНЫМ АППАРАТАМ НЕЙТРАЛИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6–35 кВ

A.G. Zolotykh, F.H. Halilov

REQUIREMENTS FOR PROTECTIVE DEVICES NEUTRAL POWER TRANSFORMERS 6–35 kV

Проанализирована аварийность трансформаторов, связанная с нейтралью и дугогасящими реакторами. Показано, что причиной аварийности являются импульсные перенапряжения и неправильный выбор характеристик защитных аппаратов. Приведены результаты исследования перенапряжений. Изложены технические требования к защитным аппаратам на 6, 10 и 35 кВ. НЕЙТРАЛЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ. ИЗОЛЯЦИЯ. КООРДИНАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ. ЗАЩИТНЫЕ АППАРАТЫ. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ.

Analyzed faults of transformers, associated with neutral and ground-fault neutralizers. It is shown that the cause of the accident is a pulse overvoltage characteristics and the wrong choice of protective devices. The results of the surges exploration are given. The technical requirements for protective devices at 6, 10 and 35 kV are given.

NEUTRAL TRANSFORMERS. OVERVOLTAGE. INSULATION. COORDINATION OF INSULATION. PROTECTIVE DEVICES. SURGE ARRESTERS.

Электрические сети 6–35 кВ в России работают в режиме изолирования нейтрали или в режимах заземления нейтрали через дугогасящий реактор при токах замыкания на землю больше нормированных [1]. В обоих режимах имеются многочисленные случаи повреждения нейтрали трансформаторов 6–35 кВ, которые происходят чаще всего по двум причинам [2]:

из-за разрушения вентильных разрядников (РВ), которые защищают нейтраль и дугогасящий реактор (ДГР) от возможных молниевых и внутренних перенапряжений [3];

при повреждении изоляции нейтрали.

Результаты анализа актов аварийности энергосистем и электрических сетей промышленных предприятий позволяют сделать вывод, что РВ разрушаются преимущественно при воздействии на них длительных перенапряжений.

Цель данной статьи — установить параметры молниевых и внутренних перенапряжений в нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ для определения требований к защитным аппаратам нейтрали.

В табл. 1 приведены испытательные напряжения изоляции силовых трансформаторов 6–35 кВ по ГОСТ 1516.3–96, а в табл. 2 — амплитуды и кратности, допустимые для изоляции нейтрали напряжений.

В последней таблице: $U_{вн}$ — допустимое на нейтрали напряжение при внутренних перенапряжениях; $U_{гн}$ — то же при молниевых перенапряжениях; $K_{вн}$, $K_{гн}$ — соответствующие допустимые кратности перенапряжений.

Рассмотрим теперь величины возможных в эксплуатации молниевых и внутренних перенапряжений.

Наиболее предпочтительный способ физического исследования молниевых перенапряжений в нейтрали — импульсный обмер «живых» трансформаторов при пониженных напряжениях. При таких обмерах была использована методика и комплекс аппаратуры, получивший название анализатора переходных процессов (АПП) в протяженных цепях [4–6].

Используя исследования на реальных объектах и в реальном масштабе времени, методика

Таблица 1

Испытательные напряжения силовых трансформаторов 6–35 кВ и их нейтрали (ГОСТ 1516.3–96)

$U_{ВП}$, кВ	Испытательное напряжение (одноминутное) изоляции, кВ _{действ}			Выдерживаемое напряжение (при плавном подъеме) для внешней изоляции, кВ _{действ}				Нормированное испытательное напряжение молниевых импульсов, кВ	
	трансформатора	нейтрали трансформатора	ввода нейтрали, испытываемого отдельно	трансформатора		нейтрали трансформатора		трансформатора	нейтрали трансформатора
				в сухом состоянии	под дождем	в сухом состоянии	под дождем		
6	25	25	32	34	26	34	26	60	60
10	35	35	42	45	34	45	34	80	80
35	85	85	95	150	85	105	85	200	200

Таблица 2

Амплитуды и кратности напряжений, допустимые для изоляции нейтрали

Изоляция нейтрали	$U_{ном}$, кВ	$U_{исп}$, кВ	$U_{вн}$, кВ	$K_{вн}$	$U_{гн}$, кВ	$K_{гн}$
полная	35	85	146	4,45	238	7,2
полная	10	35	45	4,6	77	7,8
полная	6	25	34	5,8	59	10,0

позволяет устранить погрешности, характерные для исследований с помощью физического и математического моделирования. Напряжения и токи с помощью соответствующих масштабов приводятся к низковольтным диапазонам (до 1000 В). С учетом этого обстоятельства элементы сети с нелинейными вольтамперными характеристиками (например, РВ) при таком способе исследований нуждаются в замене их моделями.

В полевых измерениях на одну, две и три фазы обмотки высокого напряжения (ВН) силового трансформатора 6–35 кВ через сопротивление, равное волновому, подается апериодическая волна в соответствии с рис. 1. Свободные фазы этой обмотки и вторичные обмотки трансформатора замыкаются на землю через волновые сопротивления.

При помощи осциллографа регистрируется напряжение на входе трансформатора (U_0) и напряжение в нейтрали (U_n). Изучалось влияние формы и амплитуды молниевой волны на величину перенапряжений в нейтрали силовых

трансформаторов. Наиболее полно молниевые перенапряжения были исследованы для силовых трансформаторов 6 и 10 кВ (например, в сети 10 кВ обмер был произведен на 24 трансформаторах). Это позволило получить обобщенные зависимости величины молниевых перенапряжений от амплитуды и формы проходящей молниевой волны. Анализ экспериментальных данных выявил следующие закономерности:

1. С увеличением длины волны T_B на линейных вводах трансформатора увеличивается амплитуда перенапряжений в нейтрали.

2. Величина перенапряжений в нейтрали прямо пропорциональна числу фаз, по которым одновременно приходит волна на линейные вводы трансформатора.

3. Величина перенапряжений в нейтрали силового трансформатора зависит от периода колебаний обмоток трансформатора.

Вид кривых $U_n/U_0 = f(T_B)$ для всех исследованных трансформаторов однотипен, следовательно, величина U_n/U_0 — функция двух вели-

чин — T_B и T . Графические и численные отображения функций $U_H/U_0 = f(T_B/T)$ для всех исследованных трансформаторов совпали и дали единую зависимость, представленную на рис. 2.

Таким образом, можно привести формулу для определения максимальных значений перенапряжений в нейтрали силовых трансформаторов классов 6–35 кВ:

$$U_{\text{макс}} = n/3 U_0 f(T_B/T), \quad (1)$$

где n — число фаз, по которым одновременно приходит волна; U_0 — амплитуда волны перенапряжений на линейных вводах трансформатора; $f(T_B/T)$ — функция, график которой приведен на рис. 2.

Сказанное позволяет сделать следующие выводы:

1. Молниевые перенапряжения представляют опасность для изоляции нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ, поэтому применение защитных аппаратов необходимо.

2. Защитные аппараты, установленные на подстанции, снижают величину напряжения в нейтрали, но она продолжает оставаться опасной для изоляции нейтрали при приходе волны по трем фазам.

3. Увеличение числа отходящих линий снижает величину напряжения в нейтрали, но при этом оно продолжает оставаться опасным для изоляции нейтрали силовых трансформаторов.

4. Защитный аппарат, установленный в нейтрали трансформатора, обеспечивает надежную защиту изоляции нейтрали и работает в облегченных условиях, так как импульсное сопротивление обмоток трансформатора ограничивает ток через разрядник. Ток, протекающий через разрядник, даже при приходе молниевой волны по трем фазам не может превысить величину 0,6–0,9 кА для трансформаторов 6–35 кВ.

5. Максимально возможный импульсный ток в нейтрали определяется как допустимое напряжение молниевой волны для фазных выводов, деленное на импульсное сопротивление обмотки трансформатора (например, он будет равен 0,9 кА для трансформаторов 35 кВ).

Перейдем к вопросу о внутренних перенапряжениях в нейтрали.

В эксплуатации на изоляцию нейтрали в симметричном трехфазном режиме воздействует напряжение небаланса $\dot{U}_H = \dot{U}_A + \dot{U}_B +$

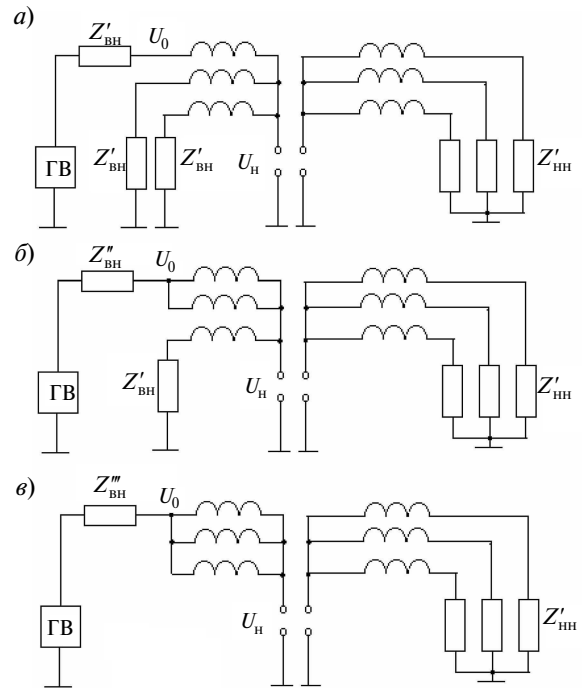


Рис. 1. Схемы измерений напряжения U_H в нейтрали

$+\dot{U}_C$, модуль которого обычно не больше нескольких десятков вольт.

Несимметричные режимы в сетях 6–35 кВ возникают при замыканиях одной фазы на землю и при неполнофазных (однофазных и двухфазных) режимах питания ненагруженных трансформаторов через ВЛ или кабельные линии.

При замыканиях одной из фаз на землю в сетях 6–35 кВ в нейтрали следует ожидать предельную величину U_H на время замыкания

$$U_H = U_{\text{мр}}/\sqrt{3},$$

где $U_{\text{мр}}$ — максимальное рабочее напряжение сети.

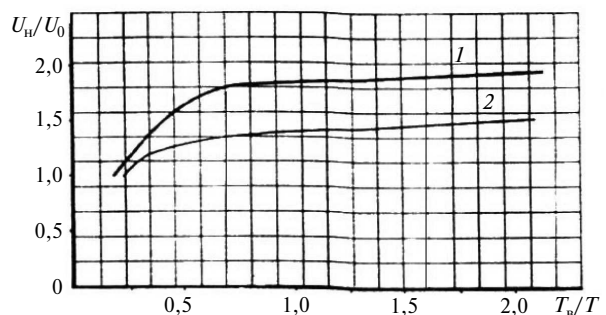


Рис. 2. Обобщенная кривая $U_H/U_0 = f(T_B/T)$ для трансформаторов 35 кВ (кривая 1) и 6–10 кВ (кривая 2)

Поскольку в сетях 6, 10 и 35 кВ соответственно $U_{\text{мр}6} = 1,2 \cdot 6 = 7,2$ кВ; $U_{\text{мр}10} = 1,2 \cdot 10 = 12$ кВ и $U_{\text{мр}35} = 1,15 \cdot 35 = 40,5$ кВ, то в нейтрали трансформаторов следует ожидать напряжения $U_{\text{н}6} = 7,2 / \sqrt{3} = 4,15$ кВ; $U_{\text{н}10} = 12 / \sqrt{3} = 6,9$ кВ; $U_{\text{н}35} = 40,5 / \sqrt{3} = 23,4$ кВ.

При неполнофазном включении трансформатора с изолированной нейтралью происходит последовательное включение индуктивности одной фазы с соединенными в параллель индуктивностями двух других фаз. Такое соединение обмоток фаз замещается индуктивностью (магнитным потоком), увеличенной в 1,5 раза по отношению к индуктивности (магнитному потоку) одной фазы.

Для уточнения характеристик намагничивания для трехстержневого трансформатора с учетом распределения магнитных потоков при его работе в неполнофазном режиме произведены соответствующие измерения.

На рис. 3 представлены результаты замеров и построены кривые намагничивания для силового трансформатора 35 кВ. При этом на графиках точками отмечены данные, полученные в процессе экспериментального определения названных зависимостей. Экспериментальные величины потока Ψ получены путем интегрирования напряжения.

Анализ результатов натуральных измерений и численных расчетов позволяет утверждать, что

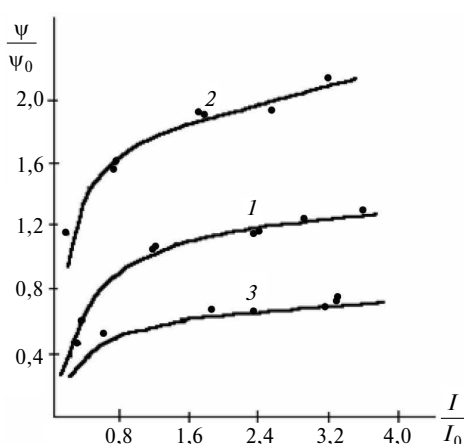


Рис. 3. Характеристики намагничивания: 1 — теоретическая зависимость для одной фазы трансформатора; 2 — экспериментальная зависимость при последовательном соединении обмоток трансформатора при неполнофазных режимах; 3 — экспериментальная зависимость при параллельном соединении двух фаз трансформатора

при неполнофазных режимах работы линии с трансформатором, имеющим изолированную нейтраль, в сети возможно возникновение феррорезонансных перенапряжений на частоте 50 Гц с кратностями $K_{\text{max}} \leq 1,75$. Амплитуда этих перенапряжений зависит от отношения основных параметров — длины линии (l) и тока холостого хода трансформатора ($i_{\text{хх}}$).

И, наконец, на изоляцию нейтрали трансформаторов 6–35 кВ будут воздействовать коммутационные перенапряжения. Однако они в нейтрали вызывают переходные процессы с кратностью $K_{\text{max}} \leq 2,0$, что не представляет особой опасности как для нейтрали, так и для ДГР.

Таким образом, для изоляции нейтрали трансформаторов 6–35 кВ наибольшую опасность представляют молниевые перенапряжения. Для защиты нейтрали весьма успешно могут быть применены ограничители перенапряжений (ОПН).

Параметры ОПН для установки в нейтрали трансформаторов 6–35 кВ определяются по соответствующим электрическим и неэлектрическим воздействиям. ОПН, устанавливаемый в нейтрали, должен обеспечить защиту изоляции нейтрали от молниевых перенапряжений и выдержать без разрушения воздействия внутренних перенапряжений.

К электрическим воздействиям на ОПН для установки в нейтрали относятся: наибольшее рабочее напряжение ($U_{\text{нр}}$), наибольшее расчетное рабочее напряжение ($U_{\text{рнр}}$), разрядный ток ($I_{\text{р}}$), ток коммутационных перенапряжений ($I_{\text{к}}$), расчетный ток короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$).

Приведенные выше результаты исследования полнофазных и неполнофазных режимов работы сети показывают, что в нейтрали трансформатора 6–35 кВ уровень квазистационарных перенапряжений не превышает значения фазного напряжения $U_{\text{ф}}$ и может продолжаться от полупериода промышленной частоты до времени ликвидации неполнофазного режима. Поэтому имея в виду возможные повышения напряжения в сети до $(1,15–1,2)U_{\text{ф}}$, с учетом 5 %-го запаса наибольшие рабочие напряжения для выбора защитных аппаратов для сетей 6–35 кВ нужно принять следующие:

для сети с $U_{\text{ном}} = 35$ кВ

$$U_{\text{нр}} = 1,15 U_{\text{ном}} / \sqrt{3} = 1,15 \cdot 35 / \sqrt{3} = 23,4 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{рнр}} = 1,05 U_{\text{нр}} / K_{\text{в}} = 1,05 \cdot 23,4 / 1,0 = 24,6 \text{ кВ};$$

для сети с $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$

$$U_{нр} = 1,2 U_{ном} / \sqrt{3} = 1,2 \cdot 10 / \sqrt{3} = 6,94 \text{ кВ};$$

$$U_{рнр} = 1,05 U_{нр} / K_B = 1,05 \cdot 6,94 / 1,0 = 7,3 \text{ кВ};$$

для сети с $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$

$$U_{нр} = 1,2 U_{ном} / \sqrt{3} = 1,2 \cdot 6 / \sqrt{3} = 4,16 \text{ кВ};$$

$$U_{рнр} = 1,05 U_{нр} / K_B = 1,05 \cdot 4,16 / 1,0 = 4,4 \text{ кВ}.$$

Если в сети с трансформаторами 6–35 кВ имеется защита от замыкания одной фазы на землю с уставкой $t_y(c)$, то наибольшее расчетное рабочее напряжение $U_{рнр}$ для ОПН можно определить по формуле $U_{рнр} = U_{нр} / K_B$, где K_B — коэффициент, определяемый по вольтвременным характеристикам ОПН при времени t_y .

Так, например, если $t_y = 0,5 \text{ с}$ для ОПН 6–35 кВ, то $K_B = 1,43–1,51$. Примем нижнюю границу этой области. При этом $U_{рнр6} = 4,4 / 1,43 = 3,07 \text{ кВ}$; $U_{рнр10} = 7,3 / 1,43 = 5,1 \text{ кВ}$; $U_{рнр35} = 24,6 / 1,43 = 17,2 \text{ кВ}$;

Ограничители перенапряжений 6–35 кВ для установки в нейтрали, как отмечалось, работают в облегченных условиях: импульсный ток через них ограничен большим по величине эквивалентным импульсным сопротивлением трансформатора и составляет не более 0,6–0,9 кА. Поэтому ток от молниевых воздействий для этих ОПН можно принять равным 3 кА — минимальному значению импульсного тока, приведенному в ГОСТ.

Расчетный ток коммутационных перенапряжений через ОПН 6–35 кВ для установки в нейтрали трансформаторов — не более 80–100 А. С большим запасом его принимаем 200 А.

Обычно допустимая величина тока КЗ через ОПН ($I_{доп}$) несколько отличается от тока однофазного или трехфазного КЗ ($I_{кз}$) для данной установки. Так, для выбора ограничителей с токами срабатывания противозрывного устройства до 40 кА значение $I_{доп}$ должно быть на 15–20 % больше значения $I_{кз}$. Для ОПН с $I_{доп} > 40 \text{ кА}$ введение запаса не требуется, т. к. в подавляющем большинстве случаев расчетные токи короткого замыкания в сетях 6–35 кВ меньше 30 кА.

Что же касается работы противозрывных устройств защитных аппаратов, то, как показывают результаты испытаний, при максимальных значениях токов они должны эффективно обеспечивать необходимый результат за несколько сотых долей секунды, а при минимальных токах (порядка 0,5 кА) — за время до 0,5 с.

Ограничители перенапряжений эксплуатируются в районах с различными условиями загрязнения. Поэтому обычно для их внешней изоляции нормируется путь утечки в соответствии с ГОСТ 9920. При этом удельная длина пути утечки для ОПН выбирается не менее чем на 20 % выше, чем таковая для остального электрооборудования электроустановки, например подстанции.

Если удельная длина пути утечки λ_y не оговаривается, то она должна быть не менее 1,8 см на 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения сети. Вместе с тем для загрязненных районов величина λ_y может составить $\lambda_y = 3,1–3,5 \text{ см}$ на 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения сети.

Высота выше уровня моря, не оказывая существенного влияния на конструкцию, сказывается главным образом на внешней изоляции ограничителей перенапряжений.

Так, например, если ОПН рассчитан на работу на открытом воздухе на высоте не более $H = 1000 \text{ м}$, то его эксплуатация на высоте $H > 1000 \text{ м}$ при пониженной плотности воздуха может привести к перекрытию внешней изоляции аппарата должна быть усилена.

В табл. 3 приведены требования к нелинейным ограничителям для установки в нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ.

В таблице: $U_{ном}$ — номинальное напряжение аппарата; $U_{ндл}$ — наибольшее длительное напряжение, допустимое на аппарате; $I_{рком}$ — расчетный коммутационный ток через аппарат, имеющий параметры 1,2/2,5 мс, выдерживаемый не менее 20 раз; $U_{ост}$ — остающееся напряжение при расчетном токе волны 1,2/2,5 мс; $I_{гн}$ — расчетный ток молниевых импульсов (8/20 мкс), выдерживаемый не менее 20 раз; $U_{оств}$ — остающееся напряжение при расчетном токе волны 8/20 мкс.

Кроме того, следует отметить, что ОПН средних классов напряжения должны выдерживать механические нагрузки от вибрации по группе условий эксплуатации ГОСТ 17516, обладать сейсмоустойчивостью по MSC-64 и иметь соответствующее климатическое исполнение по ГОСТ 15150–89.

В последние десятилетия в ОАО НПО «Стример» (г. Санкт-Петербург) разработан и внедрен в эксплуатацию ряд новейших аппаратов, устанавливаемых на воздушных линиях для

Таблица 3

Требования к ОПН для установки в нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ

$U_{\text{ном}}$, кВ	$U_{\text{н.дл}}$, кВ	$I_{\text{р.ком}}$, А	$U_{\text{ост}}$, кВ	$I_{\text{г.и}}$, А	$U_{\text{ост.в}}$, кВ
6	4,4	200	7,6	2,5	10,5
10	7,3	200	12,4	2,5	17
35	25	200	42	2,5	60

улучшения показателя их молниезащиты. Самый новый из них — полимерный изолятор разрядник мультикамерный (ПИРМК) [7].

Применение ПИРМК-35 на подходах к подстанциям позволяет:

снизить вольт-секундную характеристику (ВСХ) линии электропередачи 35 кВ и тем самым улучшить молниезащиту подстанций;

существенно уменьшить вероятность токов короткого замыкания вблизи подстанций 35 кВ, влияющих на электродинамические усилия в обмотках силовых трансформаторов и вызывающих в неблагоприятных случаях повреждение их изоляции.

Таким образом, в нашем исследовании:

Оценена величина импульсных перенапряжений на изоляцию нейтрали силовых трансформаторов 6–35 кВ и дугогасящих реакторов для компенсации токов однофазного замыкания на землю. Показано, что эти перенапряжения представляют серьезную опасность для названной изоляции.

Установлено, что квазиустановившиеся напряжения при замыканиях одной фазы на землю и коммутационные перенапряжения практически не представляют опасности для изоляции нейтрали и ДГР.

Сделан вывод, что с помощью схемных мероприятий следует избегать неполнофазные режимы питания ненагруженных трансформаторов 6–35 кВ, при которых возможны опасные феррорезонансные перенапряжения.

Изучены электрические и неэлектрические воздействия на ОПН 6–35 кВ для нейтрали и разработаны соответствующие технические требования.

Установлено, что применение ПИРМК-35 на подходах ВЛ 35 кВ уменьшает воздействие на электрооборудование подстанции набегающих волн, вызванных молниевыми перенапряжениями на линии.

Работы, описанные в статье, проводятся в рамках НИОКР Министерством образования и наука РФ (ГК 16.526.12.6006 от 13 мая 2011 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халилов, Ф.Х. Защита сетей 6–35 кВ [Текст] / Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокучина, А.И. Таджибаева— СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002.— 259 с.

2. Гольдштейн, В.Г. Электромагнитная совместимость и разработка мероприятий по улучшению защиты от перенапряжений электрооборудования сетей 6–35 кВ [Текст] / В.Г. Гольдштейн, В.П. Степанов, Г.В. Подпоркин, Ф.Х. Халилов.— М.: Энергоатомиздат, 2009.— 344 с.

3. Алиев, Ф.Г. Перенапряжения в нейтрали силовых трансформаторов 6–220 кВ и методы их ограничения [Текст] / Ф.Г. Алиев, А.К. Горю-

нов, А.Н. Евсеев, А.И. Таджибаев, Ф.Х. Халилов— СПб.: Изд. ПЭИПК, 2001. — 166 с.

4. Костенко, М.В. Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта [Текст] / М.В. Костенко, Ю.М. Невретдинов, Ф.Х. Халилов— Л.: Наука, 1984. — 112 с.

5. Созинов, А.В. Анализатор переходных процессов в протяженных цепях [Текст]: Информационный листок/ А.В. Созинов, Ф.Х. Халилов— Л., 1979.— С. 2.

6. Гольдштейн, В.Г. Сопоставление расчетных и экспериментальных исследований атмосферных перенапряжений на подстанциях 110 кВ [Текст] / В.Г. Гольдштейн, А.В. Покровский,



Ф.Х. Халилов— Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.— 1977, № 3.— С. 16.

7. **Подпоркин, Г.В.** Грозозащита ВЛ 10–35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядни-

ков и изоляторов-разрядников [Текст] / Г.В. Подпоркин, Е.Ю. Енькин, Е.С. Калакутский, В.Е. Пильщиков, А.Д. Сиваев.— Электричество.— 2010. № 10.— С. 11.

ЗОЛОТЫХ Андрей Георгиевич — директор по развитию ОАО «НПО «Стример»».

195220, ул. Гжатская, д. 27, Санкт-Петербург, Россия

(812) 248-90-37

andrey.zolotykh@streamer.ru

ХАЛИЛОВ Фирудин Халилович — доктор технических наук, профессор кафедры техники высоких напряжений, электроизоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195220, ул. Гжатская, д. 27, Санкт-Петербург, Россия

(812) 555-45-85

natalia-shilina@yandex.ru