

ВЛИЯНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ЗАЖИМОВ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОВОДА

АВТОРЫ:

Е.Д. КИМ,
Д.Т.Н.,
УКРАИНСКАЯ
ИНЖЕНЕРНО-
ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Б.М. ЖУКОВ,
К.Т.Н.,
ООО «ФОРЭНЕРГО-
ИНЖИНИРИНГ»

Надежность воздушной линии электропередачи определяется качеством всех ее структурных элементов. Спиральная арматура является новой и весьма перспективной разновидностью арматуры традиционных видов, предназначенной для проводов высоковольтных воздушных

линий электропередачи, молние-защитных тросов, оптических кабелей. Обладая достаточно высокой гибкостью, такие спиральные элементы хорошо сочетаются с проводом и после монтажа фактически образуют с ним единое целое, что дополнительно формирует своеобразный защитный слой.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; спиральная арматура; ферромагнитные материалы; потери на перемагничивание; нагрев провода.

Металлические зажимы являются необходимым элементом линейной арматуры воздушных линий электропередачи



ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией при разработке новых воздушных высоковольтных линий (ВЛ) в течение многих лет являлось стремление разработчиков к уменьшению количества деталей арматуры, выполненных из ферромагнитных материалов, что связано с существенными потерями, возникающими при перемагничивании таких материалов. Последние возникают в случае, когда элементы ферромагнитной арматуры охватывают снаружи токопроводящие повивы провода. К таким элементам (в составе конструкций линейной арматуры, применяемой в настоящее время) относятся:

- корпуса поддерживающих зажимов (лодочки) ПГН-3-5, выполненные из листовой стали;
- чугунные корпуса натяжных зажимов НБ-2-6 и НБ-3-6;
- спиральные натяжные зажимы;
- протекторы-фиксаторы из стальных проволок соединительных и ремонтных спиральных зажимов;
- защитные спиральные протекторы из стальных проволок;
- спирали из стальных проволок, предназначенные для крепления различных устройств к проводам (зажимы гасителей вибрации, пляски, распорок и т.д.).

Тем самым возникает проблема определения допустимой длительности токовых нагрузок. Такой выбор обусловлен допустимой температурой нагрева провода, которая установлена в Правилах устройства электроустановок [1]. Заметим, что рекомендации по выбору данных нагрузок приведены в различной технической литературе [2]. Длительно допустимые токовые нагрузки приняты из расчета допустимой температуры их нагрева $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре воздуха $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. ГОСТ 839-80 устанавливает длительно допустимую температуру, равную $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ЗАЖИМОВ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И НАГРЕВ ПРОВОДА

Задача исследований заключалась в оценке влияния спиральных зажимов на потери мощности и температуру нагрева провода. Экспериментальные исследования проводились на стенде, предназначенном для испытания линейной арматуры с проводами на магнитные потери по МЭК 61284:1997 [3].

Исследования проводились со спиральными соединительными и натяжными зажимами, содержащими наружные повивы из стальных алюминированных и оцинкованных проволок, которые получили в России широкое распространение при строительстве и ремонте ВЛ 35–750 кВ.

Наиболее распространенная в России конструкция соединительного зажима приведена на рис. 1 [4].

Для определения температуры нагрева провода был проведен ряд экспериментов на проводах АС 120/19, АС 240/32, АААС-Z455-2Z. Эксперименты проводились с зажимами, конструкция которых приведена на рис. 1.

Для оценки влияния спиральных зажимов на процесс нагрева проводов в результате перемагничивания для всей номенклатуры неизолированных проводов необходима разработка расчетной методики.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА

Как известно [5], нагрев любого провода, помещенного в некоторую

СОЕДИНИТЕЛЬНЫЙ ЗАЖИМ ДЛЯ ПОЛНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДА МАРКИ АС, СОДЕРЖАЩИЙ ПРОТЕКТОР- ФИКСАТОР ИЗ СТАЛЬНЫХ ПРОВОЛОК

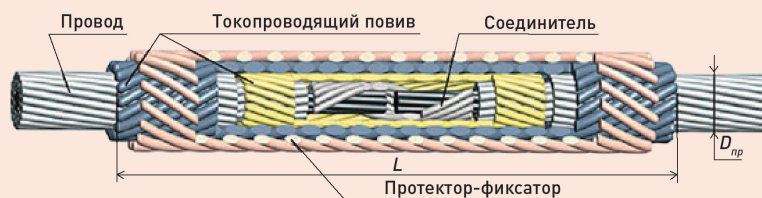


Рис. 1

среду с температурой T_{cp} , описывается уравнением, основанным на законе Джоуля — Ленца:

$$T = \frac{I^2 R}{kF} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{cp}, \quad (1)$$

где k — общий коэффициент теплоотдачи; F — поверхность охлаждения; τ — постоянная нагрева; t — время, I — сила тока, R — общее сопротивление провода.

Учитывая, что испытываемые провода представляют собой протяженные цилиндрические объекты, и пренебрегая теплоотдачей от торцов провода, получаем в установившемся режиме $t \rightarrow \infty$:

$$T = \frac{I^2 R_{01}}{k\pi D_0} + T_{cp}, \quad (2)$$

где R_{01} — сопротивление одного метра провода;

D_0 — диаметр испытуемого провода, мм.

Коэффициент теплоотдачи k характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Коэффициент k показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности провода к воздушной среде в единицу времени при разности температур между стенкой и средой в 1 °С. В общем случае коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов: вида и режима движения окружающей среды, ее физических свойств, размеров и формы стенки, шероховатости стенки. Обычно при определении коэффициента пользуются методами теории подобия.

Поскольку в нашем случае опыты по нагреву проводились в идентичных условиях с подобными объектами, то этот коэффициент можем принять в качестве постоянной величины, которую несложно определить как среднестатистическую величину по результатам испы-

ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА ПРОВОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОКАХ: 1 — АС 120/19, $T_{CP} = 20$ °С; 2 — АС 240/32, $T_{CP} = 25$ °С

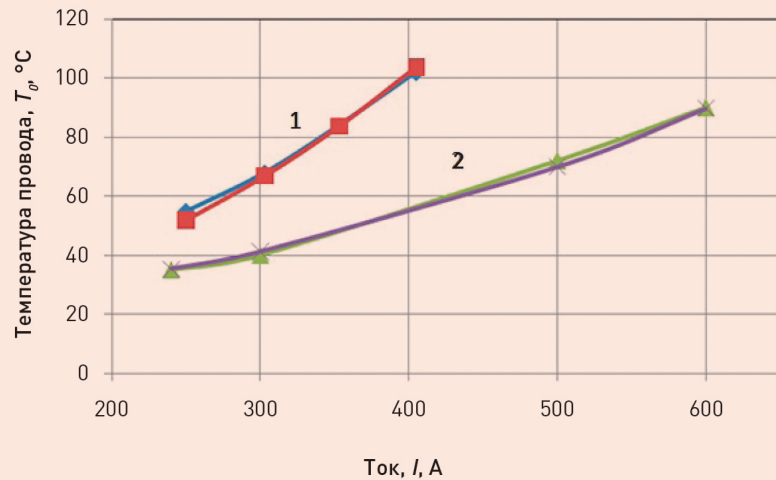


Рис. 2

Ток I, А	Мощность потерь, P, Вт	Приращение мощности потерь, ΔP, Вт	Температура T, °С		Наличие зажима	Примечание
			измеренная	расчетная		
250	73		55	52,1	Нет	Приращение мощности ΔP равно разности между мощностью потерь провода с зажимом и провода без зажима при одинаковых значениях тока.
300	107		68	67,1		
350	146		84	83,9		
400	192		102	104		
250	150	77	112	97	Есть	Температура окружающей среды 25 °С
300	193	86	127	113		
350	250	104	146	137		
400	323	131	175	169		

Таблица 1

таний проводов различного типа и при различных токах:

$$k = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Вт/°С} \cdot \text{м} \cdot \text{мм)}.$$

Справедливость приведенных соотношений иллюстрирует рис. 2, на котором сопоставлены измеренные и рассчитанные по формуле (2) величины температур проводов

для данного коэффициента теплоотдачи.

Обратимся к нагреву провода со спиральными зажимами, содержащими спирали из стальных алюминированных проволок. В качестве примера в табл. 1 приведены данные измерений, выполненных в процессе испытания провода

АС 120/19 без спирального зажима и с соединительным спиральным зажимом, аналогичным показанному на рис. 1.

Для рассмотренного примера, как видно из табл. 1, мощность потерь при испытаниях провода со спиральным зажимом возросла более чем в 1,5 раза. Схема измерения потерь приведена на рис. 3.

Существенное увеличение общей мощности потерь в испытуемом объекте с зажимом и соответствующее повышение температуры провода в месте его установки, вероятнее всего, связаны с маг-

нитными потерями в стали спирального зажима, под которыми понимаются потери на гистерезис, вихревые токи, а также потери вследствие поверхностных эффектов [6].

Примем следующие положения :

- тепловой процесс провода с зажимом согласуется с основным законом электрического нагрева проводника, описываемого уравнением (1);
- увеличение мощности потерь непосредственно связано с присутствием стальных спиралей зажима;

- спиральный зажим не только приводит к приращению потерь ΔP , но также увеличивает поверхность охлаждения провода.

Иными словами, при выводе общей взаимосвязи между мощностью потерь и температурой следует учесть геометрические параметры спирального зажима, в том числе соотношения между длинами и радиальными размерами зажима и основного провода. Принимаемые положения позволяют formalизовать следующую конструкцию параметрической связи между температурой нагрева и мощностью потерь, приведенную к единице длины по аналогии с выражением (2):

$$T = \frac{FR_{st}}{k\pi D_0} \left(1 + \frac{AP}{FR_{st} L_{пр}}\right) \frac{D_0}{D_{н.пр}^*} + T_{сп}, \quad (3)$$

где $L_{пр}$ — длина стальных спиралей зажима; $D_{н.пр}^*$ — эквивалентный наружный диаметр стальных спиралей $D_{н.пр}$, определяемый степенью заполнения a поверхности провода спиралью:

$$D_{н.пр}^* = D_{н.пр} \left[a + \frac{D_0}{D_{н.пр}} (1 - a) \right] \quad (4)$$

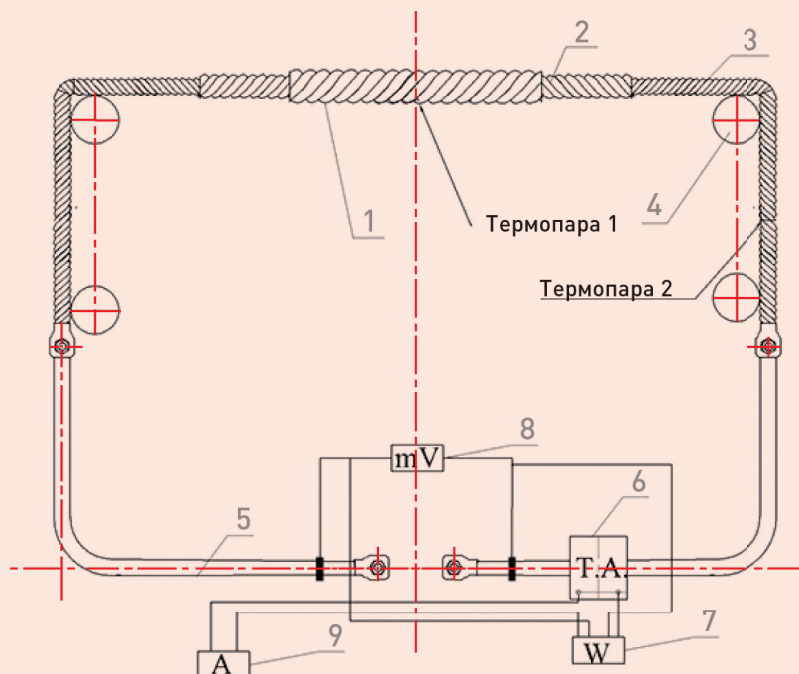
В случае, если $a \rightarrow 1$, то $D_{н.пр}^* \approx a D_{н.пр}$.

Рассчитанные по формуле (3) значения температуры приведены выше в табл. 1. Сравнение их с измеренными величинами показывает, что для рассмотренного примера с проводом АС 120/19 в комплекте со спиральным соединительным зажимом погрешность не превышает 10%.

Для того чтобы расширить применимость предложенной полуэмпирической формулы (3), соотношение мощностей потерь на погонную длину преобразуем в соотношение удельных по объему мощностей $\beta_{пр}$:

$$T = \frac{FR_{st}}{k\pi D_0} \left(1 + \beta_{пр} \frac{N \cdot S_{cm}}{S_0}\right) \frac{D_0}{D_{н.пр}^*} + T_{сп}, \quad (5)$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ В СПИРАЛЬНЫХ ЗАЖИМАХ



1 — протектор-фиксатор спирального зажима; 2 — токопроводящий повив спирального зажима; 3 — провод; 4 — изолирующие ролики; 5 — присоединительные кабели; 6 — трансформатор тока; 7 — ваттметр; 8 — милливольтметр; 9 — амперметр

Рис. 3

ИНФОРМАЦИЯ

ИЗ «МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК ПО УСЛОВИЯМ СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДОВ И ДОПУСТИМЫХ ГАБАРИТОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ» ПАО «ФСК ЕЭС»

Величина k_m (коэффициент, учитывающий магнитные потери) зависит от количества повивов алюминия поверх стального сердечника. Магнитные потери максимальны для одноповивного провода и минимальны при четном количестве повивов, так как вследствие противоположного направления скрутки смежных повивов магнитодвижущие силы, действующие в сердечнике и создаваемые токами повивов, частично взаимно компенсируются. Рекомендуется принимать следующие значения коэффициента:

$k_m = 1,15$ — для 1-го слоя алюминия;

$k_m = 1,04$ — для 2-х слоев алюминия;

$k_m = 1,10$ — для 3-х слоев алюминия.

ПРИРАЩЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛЬНЫХ ПРОВОЛОКАХ ЗАЖИМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ПРОВОДЕ: 1 — АС 240/32; 2 — АС 120/19

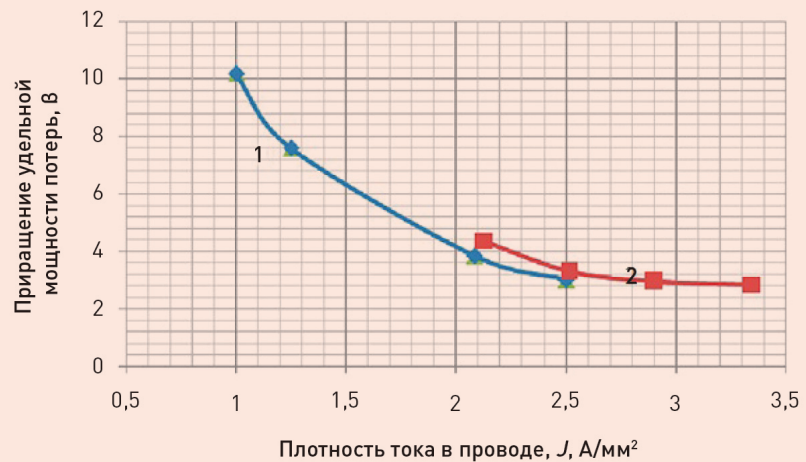


Рис. 4

где

$$\beta_{np} = \frac{AP}{FR_{01}} \frac{S_0}{L_{np} N \cdot S_{cm}};$$

S_0, S_{cm} — сечение алюминия провода и стальных проволок зажима;
 N — число стальных проволок.

Относительная универсальность параметра β_{np} , характеризующего удельное приращение потерь как результат воздействия магнитного поля со стороны провода, обусловлена тем, что геометрические параметры вынесены за пределы этого параметра. На рис. 4 представлены кривые зависимости параметра β_{np} от плотности тока J в проводе; они были построены по результатам испытаний на нагрев проводов АС 240/32 и АС 120/19 с соединительными зажимами.

Основные характеристики составных элементов этих зажимов представлены в табл. 2.

Согласно уравнениям Максвелла [7] в общем случае магнитное поле, обусловленное током, находится в непосредственной корреляции с плотностью тока J . Именно в этой связи значения β_{np} представлены относительно плотности тока J .

На рис. 4 кривые, относящиеся к двум разным объектам, хорошо согласуются между собой, что позволяет их аппроксимировать одной функцией: β_{np} от J , что, в свою очередь, опосредованно подтверждает наличие причинно-следственной связи между переменным магнитным полем и потерей мощности в стальных спиралах. Небезынтересно отметить (см. рис. 4), что объемная плотность мощности потерь в стали спиралей может в несколько раз превышать плотности потерь в самом проводе.

№	Наименование составных элементов	Материал проволоки	Диаметр проволоки, d, мм	Диаметр стали, d _{ст} , мм	Число проволок, N	Длина спирали, L _{сп} , м
Зажим соединительный спиральный для провода АС 240/32						
1	Соединитель	Стальная алюминированная	3,4	2,95	8	0,8
2	Токопроводящий повив	Алюминиевый сплав	4,62	-	15	2,3
3	Протектор-фиксатор	Стальная алюминированная	4,2	3,65	20	2,1
Зажим соединительный спиральный для провода АС 120/19						
1	Соединитель	Стальная алюминированная	2,2	1,9	9	0,8
2	Токопроводящий повив	Алюминиевый сплав	4,2	-	14	1,8
3	Протектор-фиксатор	Стальная алюминированная	3,3	2,9	16	1,7

Таблица 2

НАИБОЛЬШАЯ ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА ПРОВОДА С ПРОТЕКТОРОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОКАХ: 1, 2 — АС 240/32, ИЗМЕРЕННАЯ, РАСЧЕТНАЯ, T_{ср} = 25 °С; 3, 4 — АААС-Z455-2Z, ИЗМЕРЕННАЯ, РАСЧЕТНАЯ, T_{ср} = 25 °С

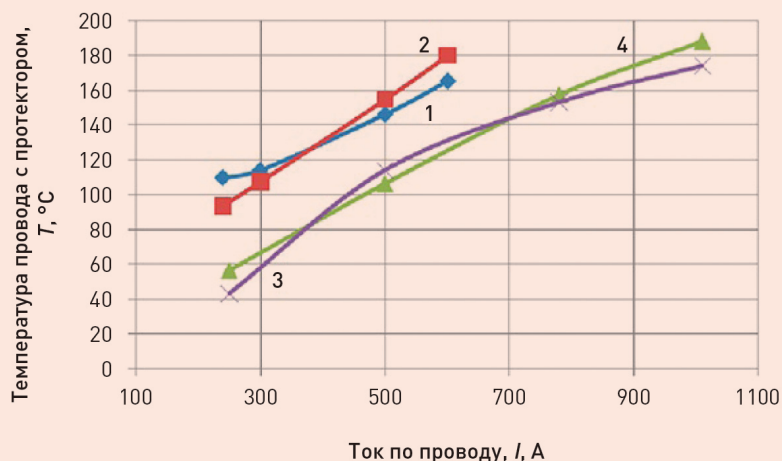


Рис. 5

Из соотношения (5) легко получить формулу расчета температуры провода при отсутствии спирального зажима, приравняв $\beta_{пр}$ к нулю. Следует помнить, что приведенные формулы справедливы для протяженных объектов, в том числе для спиралей, длина которых, как правило, существенно больше их наружного диаметра. Расчет ожидаемой температуры с помощью формулы (5) при известном типе провода, типе зажима и токе по проводу выполняется в следующей последовательности:

- устанавливаем по справочным материалам исходные параметры провода и зажима: R_{0l} — сопротивление погонного метра провода; D_0 — наружный диаметр провода; $NS_{ст}$ — суммарное сечение стальных проволок спирального зажима (протектора-фиксатора; см. рис. 1);
- по соотношению (4) определяем $D_{н.пр}^*$ — эквивалентный наружный диаметр протектора-фиксатора спирального соединительного зажима;
- определяем плотности тока J для заданного тока I и сечения провода S_0 , затем из рис. 4 находим соответствующее значение $\beta_{пр}$;
- подставляем отмеченные выше величины в формулу (5) и находим искомую температуру с учетом температуры среды.

Определенные в результате расчетов наибольшие значения температуры проводов АС 240/32 и АААС-Z455-2Z со спиральными зажимами сравнивались с измеренными в процессе испытаний значениями температуры. Параметры спирального зажима для провода АС 240/32 были представлены в табл. 2, при испытании компактированного провода АААС-Z455-2Z использовался натяжной спиральный зажим длиной 1,9 м из стальных алюминированных проволок

ЛИНЕЙНАЯ АРМАТУРА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Линейную арматуру, применяемую при закреплении проводов в гирляндах подвесных изоляторов, можно подразделить по назначению на пять основных видов:

1. Зажимы, служащие для закрепления проводов и тросов, подразделяющиеся на поддерживающие, подвешиваемые на промежуточных опорах, и натяжные, применяемые на опорах анкерного типа.
2. Сцепная арматура (скобы, серьги, ушки, коромысла), служащая для соединения зажимов с изоляторами, для подвески гирлянд на опорах и для соединения многоцепных гирлянд друг с другом.
3. Защитная арматура (кольца), монтируемая на гирляндах линий напряжением 330 кВ и выше, предназначенная для более равномерного распределения напряжения между отдельными изоляторами гирлянды и для защиты их от повреждения дугой при перекрытиях.
4. Соединительная арматура, служащая для соединения проводов и тросов в пролете, а также для соединения проводов в шлейфах на опорах анкерного типа.
5. Распорки, применяемые для соединения друг с другом проводов расщепленной фазы. Поддерживающие зажимы состоят из лодочки, в которую укладывается провод, плашек и болтов (или болта) для закрепления провода в лодочке, пружин, цапф или кронштейнов для крепления зажима в гирлянде.

диаметром 5 мм в количестве 12 шт. Результаты показали (рис. 5) удовлетворительную для инженерной практики сходимость.

Очевидно, несложно решить обратную задачу: исходя из заданной температуры, определить соответствующий ток, таким образом, прогнозировать уровень длительно допустимого тока по нагреву провода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В заключение приведем результаты испытаний соединительного зажима производства компании PLP (США), предназначенного также для провода АС 120/19. Отличием данного зажима является отсутствие протектора-фиксатора. Единственным ферромагнитным элементом этого зажима является соединитель сердечника провода. При нагреве провода с зажимом PLP температура нагрева зажима на несколько градусов ниже температуры провода, потери мощности на проводе с зажимом менее чем на 5% превышают потери в проводе без зажима. Таким образом, конструкции спиральных зажимов, не имеющих наружных повивов из ферромагнитных материалов, не вызывают перегрева проводов и существенных потерь мощности.

Проведенные исследования показали, что размещение элементов спиральной арматуры из ферромагнитных материалов снаружи токопроводящих повивов провода и спиральной арматуры приводит к дополнительным потерям электроэнергии и существенному повышению температуры провода и арматуры. Разработчикам и изготовителям спиральной арматуры

следует ограничить применение спиралей из ферромагнитных материалов в арматуре, используемой на ВЛ 110–750 кВ, размещаемых снаружи токопроводящих повивов провода и арматуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Температура нагрева провода в месте установки спирального соединительного зажима, содержащего протектор-фиксатор, натяжного спирального зажима существенно превышает температуру нагрева всего провода.
2. Целесообразно ввести требования на магнитные потери для спиральных зажимов по аналогии с монолитными зажимами, согласно МЭК 61284.
3. На основе уравнения нагрева провода под действием электрического тока и экспериментальных исследований предложено полуэмпирическое соотношение для приближенной оценки наибольшей температуры проводов со спиральными зажимами из стальных проволоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПУЭ (Правила устройства электроустановок). (утв. Минэнерго СССР) (6-ое издание).
2. Е.Ф. Макаров. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–750 кВ. Т. 2. М.: Папирус Про, 2003.
3. IEC 61284:1997. Линии передачи воздушные. Требования и испытания для арматуры.
4. Спиральная арматура для подвески и ремонта проводов, грозозащитных тросов ВЛ. Монтажные устройства и приспособления. Каталог продукции АО «Электросетьстройпроект». Выпуск № 22. М., 2014.
5. Основы электрического транспорта. Учебник для вузов / Под общей ред. М.А. Слепцова. М.: Академия, 2006.
6. И.В. Савельев. Курс общей физики. Т. 2. М.: Высшая школа, 1982.
7. Э. Парселл. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1975.