УДК 620.9

Анисов П.В.
магистрант 2 курса
кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций,
электроэнергетических систем и электрических сетей
Саяно-Шушенский филиал
Сибирский федеральный университет
(г. Саяногорск, Россия)

Научный руководитель:
Скоробрюхов А.В.
инженер службы релейной защиты, автоматики и метрологии
Филиал «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожнего»
ПАО «РусГидро»
(г. Саяногорск, Россия)

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ШИНОПРОВОД 6 КВ

Аннотация: *в статье рассмотрено тепловое воздействие токов короткого замыкания на шинопроводы 6 кВ с литой изоляцией типа ТПЛМ-6-1600-51. Приведен расчет активного сопротивления и количества теплоты, выделяемой при протекании токов короткого замыкания, для крайних положений регулятора напряжения под нагрузкой (РПН) питающего трансформатора. Проведено компьютерное моделирование тепловых полей в программном комплексе ELCUT. Доказано, что при коротких замыканиях в токопроводе возникают температуры, значительно превышающие допустимые для изоляционного материала, что приводит к его термической деградации. Полученные результаты могут быть использованы для оценки состояния аналогичных токопроводов на различных энергообъектах.*

Ключевые слова: *шинопровод 6 кВ, литая изоляция, термическая стойкость, нагрев проводника, короткое замыкание, тепловое моделирование.*

Шинопроводы с литой изоляцией часто применяются в системах электроснабжения промышленных предприятий и собственных нужд электростанций. Одной из распространенных конструкций являются токопроводы серии ТПЛМ, в которых медная жила заключена в изоляционный слой на основе эпоксидного компаунда. Такое исполнение обеспечивает высокую механическую прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

При коротком замыкании (КЗ) в сети по токопроводу протекают токи, многократно превышающие номинальные значения. Выделяющаяся при этом теплота приводит к интенсивному нагреву токоведущей жилы и изоляции. Литая изоляция обладает низкой теплопроводностью, отвод тепла от жилы затруднен, вследствие чего возникают высокие температуры и выделение повышенной тепловой энергии. Чрезмерный нагрев вызывает разрушение структуры эпоксидного компаунда, потерю диэлектрических свойств и механическое разрушение конструкции [1, с. 3].

Целью работы является количественная оценка теплового состояния токопровода ТПЛМ-6-1600-51 при коротких замыканиях. Для достижения этой цели решаются задачи по расчету тепловыделения и построению температурных полей. Исследование представляет интерес для широкого круга энергообъектов, эксплуатирующих аналогичное оборудование.

Рассмотрим находящийся на Саяно-Шушенской ГЭС токопровод 6 кВ, питающийся от трансформатора собственных нужд ТДНС-16000/35. Расчет тепловыделения выполнялся для двух крайних положений РПН трансформатора (минимального и максимального), которые определяют диапазон возможных токов КЗ. Исследованию подлежат двухфазный и трехфазный виды металлического КЗ. Результат расчета токов КЗ представлен в таблице 1.

Таблица 1. Токи КЗ в различных положениях РПН.

Положение РПН	**k_R**	**Iкз 2-х фазный, кА**	**Iкз 3-х фазный, кА**
Минимальное	0,77	16,58	19,06
Максимальное	1,25	10,20	11,70

Максимальное положение РПН соответствует минимальному напряжению на стороне НН трансформатора, а минимальное положение РПН – максимальному напряжению НН.

Для расчета количества теплоты, выделяемого токопроводами необходимо рассчитать активное сопротивление. Расчет активного сопротивления производится на основе данных силового трансформатора СН, к которому подключаются токопроводы. Необходимые для расчета параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2. Паспортные данные ТДНС-16000/35.

	$\Delta P_{КЗ}$, Вт	**$U_н$, В**	**$S_н$, ВА**
ТДНС-16000/35	85 000	6 300	16 000 000

На основе представленных данных, найдено активное сопротивление токопровода 6кВ:

$$R = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_Н^2}{S_Н^2} = \frac{85\,000 \cdot 6\,300^2}{16\,000\,000^2} = 0{,}013 \text{ Ом}, (1).$$

Для РПН ТСН в минимальном положении имеем активное сопротивление:

$$R_{min} = k_{R\,min} \cdot R = 0{,}77 \cdot 0{,}013 = 0{,}010 \text{ Ом}, (2).$$

Для РПН ТСН в максимальном положении имеем активное сопротивление:

$$R_{max} = k_{R\,max} \cdot R = 1{,}25 \cdot 0{,}013 = 0{,}016 \text{ Ом. (3).}$$

Для расчета количества теплоты выделяемой токопроводом используется формула закона Джоуля — Ленца. Для наглядной оценки и сравнения результатов расчета t принимается 2,5 и 0,1с.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \text{ (Дж), (4).}$$

Рассчитанные значения количества теплоты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета количества теплоты.

Длительность воздействия тока КЗ	**Положение РПН**	**Вид КЗ**	**Q, кДж**
t=2,5	Максимальное	3-фазное	$11{,}7^2 \cdot 0{,}016 \cdot 2{,}5 = 5475{,}6$
	Максимальное	2-фазное	$10{,}2^2 \cdot 0{,}016 \cdot 2{,}5 = 4161{,}6$
	Минимальное	3-фазное	$19{,}1^2 \cdot 0{,}010 \cdot 2{,}5 = 9120{,}3$
	Минимальное	2-фазное	$16{,}6^2 \cdot 0{,}010 \cdot 2{,}5 = 6889{,}0$

Длительность воздействия тока КЗ	**Положение РПН**	**Вид КЗ**	**Q, кДж**
t=0,1	Максимальное	3-фазное	$11{,}7^2 \cdot 0{,}016 \cdot 0{,}1 = 219{,}0$
	Максимальное	2-фазное	$10{,}2^2 \cdot 0{,}016 \cdot 0{,}1 = 166{,}5$
	Минимальное	3-фазное	$19{,}1^2 \cdot 0{,}010 \cdot 0{,}1 = 364{,}8$
	Минимальное	2-фазное	$16{,}6^2 \cdot 0{,}010 \cdot 0{,}1 = 275{,}6$

Выполнено моделирование в ПО elcut токопровода 6 кВ типа ТПЛМ-6-1600-51, его теплораспределение, которое учитывает температуру окружающей среды - 23 ºС, теплопроводность материала токоведущей части – медь (390 Вт/(К·м)), плотность (8950 кг/м^3). Способ охлаждения – воздушный, естественный. Объемная плотность тепловыделения q_v, Вт/м^3, которая зависит от вида КЗ и положения РПН представлена в таблице 4.

Таблица 4. Объемная плотность тепловыделения для различных режимов.

Режим	**q_v, Вт/м^3**
Нормальный	23 800
КЗ 3-фазное (макс. РПН, 11,8 кА)	1 540 000
КЗ 2-фазное (макс. РПН, 10,2 кА)	1 150 000
КЗ 3-фазное (мин. РПН, 19,06 кА)	4 030 000
КЗ 2-фазное (мин. РПН, 16,6 кА)	3 060 000

Для визуальной оценки теплового состояния токопровода в программе ELCUT было выполнено моделирование распределения температурных полей.

На рисунке 1 представлен результат для нормального режима работы. Как видно из шкалы, при номинальном токе объемная плотность тепловыделения невелика, а максимальная температура медной жилы и изоляционного слоя находится в пределах допустимых эксплуатационных значений. Тепло равномерно распределяется по сечению и эффективно отводится в окружающую среду. Максимальная температура составляет 53,6 ºС.

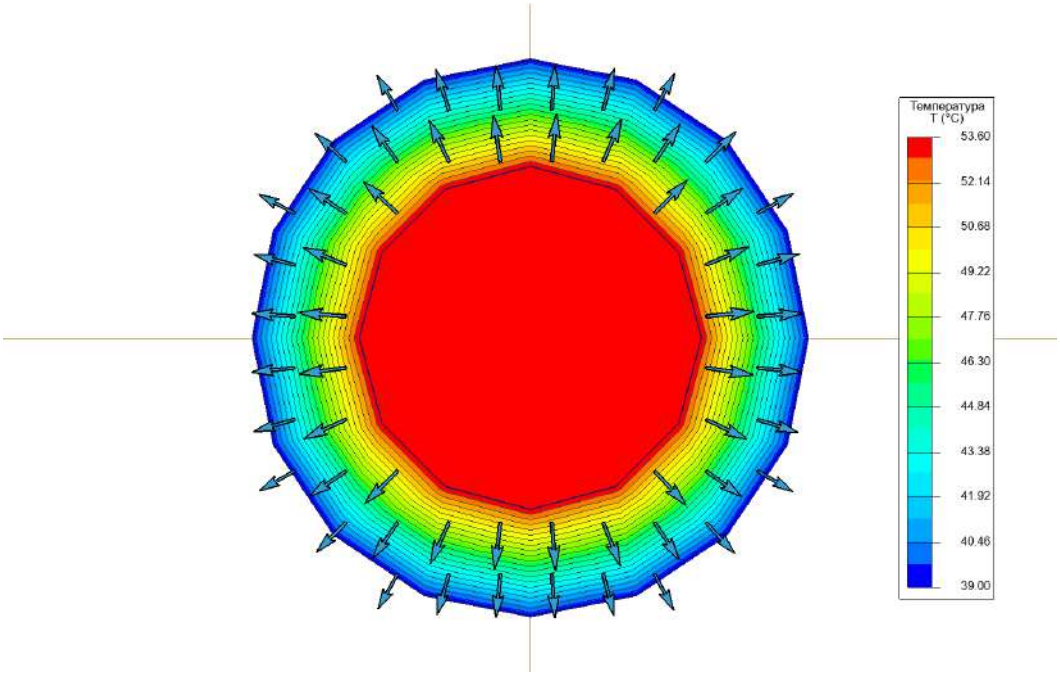


Рис. 1. Теплораспределение в нормальном режиме.

На рисунке 2 показано распределение температур при трехфазном КЗ и максимальном положении РПН (ток 11,8 кА). Этот режим характеризуется наименьшим током КЗ из рассматриваемых. Температура в центре токоведущей жилы достигает 1871 ºС. Литая изоляция, обладающая низкой теплопроводностью, не успевает отвести тепло, что приводит к образованию зоны перегрева.

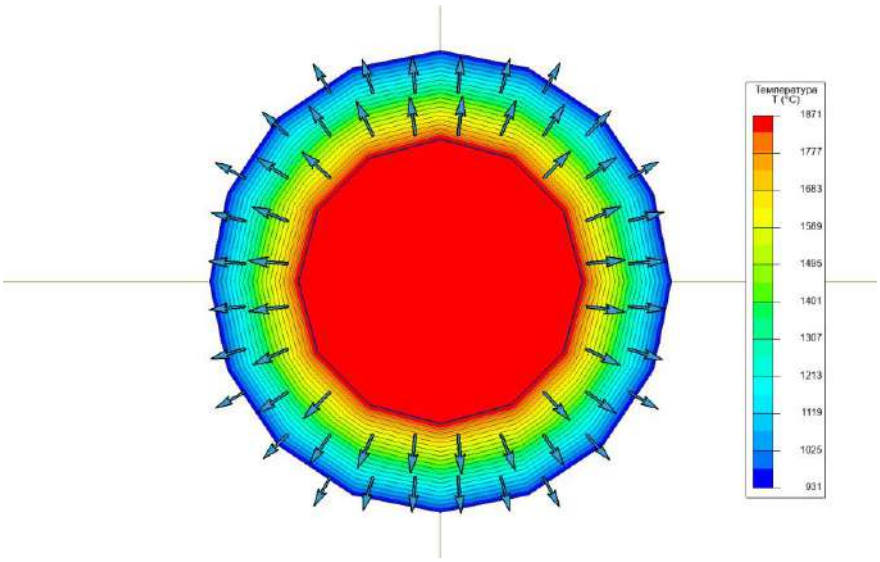


Рис. 2. Теплораспределение при 3-фазном КЗ (макс. РПН).

Результат моделирования двухфазного КЗ при максимальном положении РПН (ток 10,2 кА) представлен на рисунке 3. В данном режиме максимальная температура фиксируется на уровне 1401 ºС. Нагрев, многократно превышающий допустимые значения для эпоксидного компаунда.

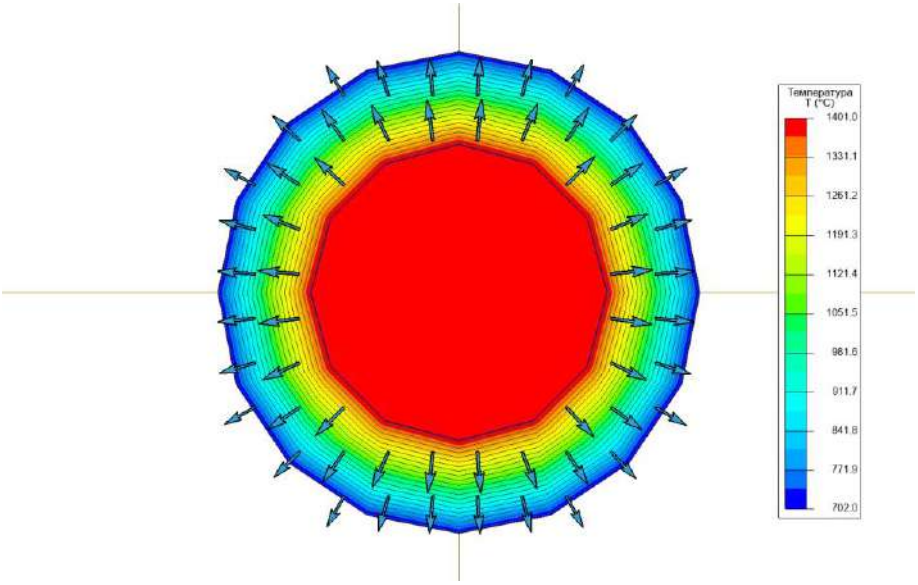


Рис. 3. Теплораспределение при 2-фазном КЗ (макс. РПН).

Наиболее тяжелый термический режим наблюдается при трехфазном КЗ и минимальном положении РПН (ток 19,06 кА). Как показано на рисунке 4, температура медной жилы достигает экстремальных значений в 4860 ºС. При

таких температурах происходит мгновенное обугливание и термическое разложение изоляции с выделением газов, что неизбежно приводит к полному разрушению токопровода.

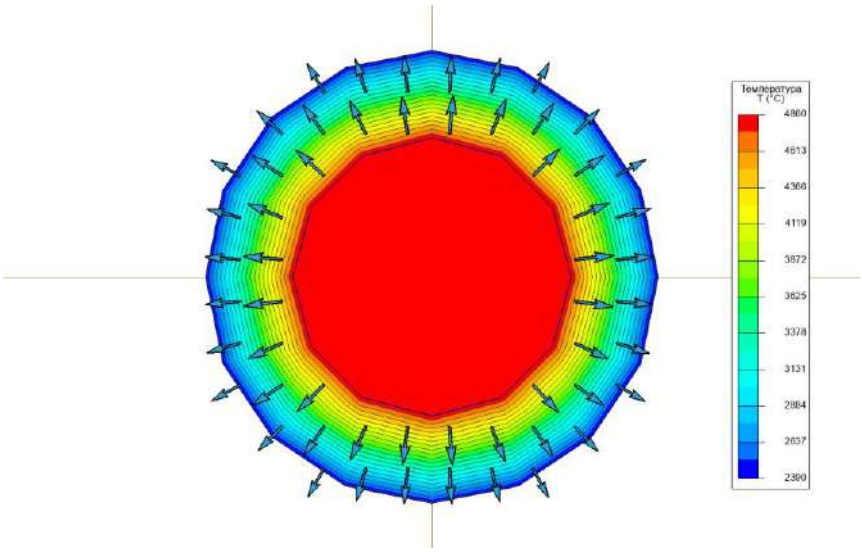


Рис. 4. Теплораспределение при 3-фазном КЗ (мин. РПН).

На рисунке 5 отображено распределение температуры при двухфазном КЗ и минимальном положении РПН (ток 16,6 кА). При данном виде замыкания максимальная температура достигает 3700 ºС.

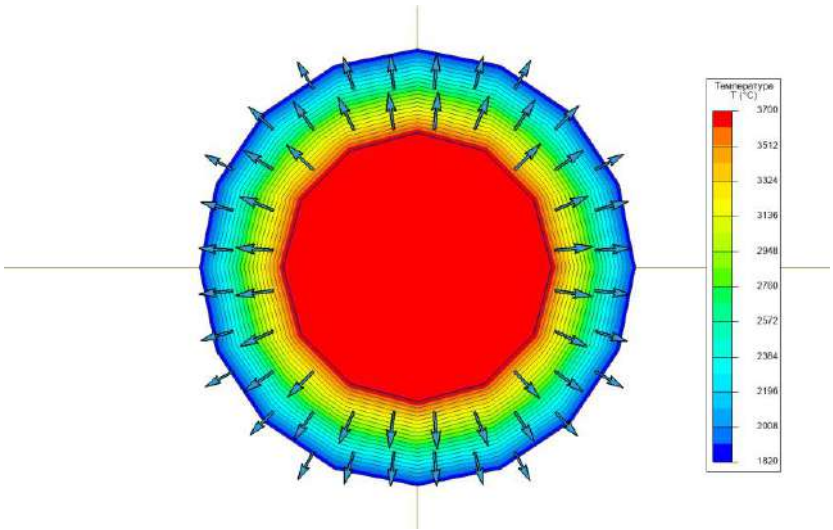


Рис. 5. Теплораспределение при 2-фазном КЗ (мин. РПН).

Проведенное в программном комплексе ELCUT моделирование тепловых полей подтвердило, что при коротких замыканиях в токопроводе возникают температуры от 1401 ºС до 4860 ºС в зависимости от вида КЗ и положения РПН. Эпоксидная изоляция теряет свои свойства при 150–200 ºС. При температурах, как на рисунках 2–5, происходит распад компаунда.

Поскольку тепловые процессы определяются исключительно физическими свойствами меди и изоляции, полученные результаты имеют универсальный характер и могут быть использованы для оценки термического состояния токопроводов типа ТПЛМ на различных энергообъектах. Дальнейшее исследование направлено на поиск технических решений, обеспечивающих снижение времени протекания аварийных токов для предотвращения термического повреждения шинопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Баранов М.И. Локальный нагрев токопроводов силового электроэнергетического оборудования при аварийных режимах и токовых перегрузках: научное издание // Электротехника. 2014. № 6. С. 13–17
2. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита электрических систем: учебное пособие для техникумов. Москва: Энергоатомиздат, 1998. 800 с.
3. СТО 34.01-23-004-2019. Диагностирование экранированных токопроводов и токопроводов с литой изоляцией. Москва: ПАО «Российские сети», 2019. 63 с.
4. Долин А.П., Долин С.А. Диагностика экранированных токопроводов и токопроводов с литой изоляцией. Электроинжиниринг, диагностика и сервис, 2017. 26 с.
5. Токопроводы 0,4–35 кВ с литой и воздушной изоляцией. Шинопроводы. Москва: ОАО «Мосэлектрощит», 2017. 36 с.

Anisov P.V.
master's degree student of 2nd year
Department of Hydropower Engineering, Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Grids
Sayano-Shushensky Branch
Siberian Federal University
(Sayanogorsk, Russia)

Scientific advisor:
Skorobryukhov A.V.
engineer, Relay Protection, Automation and Metrology Department
«Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Plant
named after P.S. Neporozhny» Branch
RusHydro
(Sayanogorsk, Russia)

ASSESSMENT OF SHORT-CIRCUIT THERMAL EFFECTS ON 6 KV BUSBAR TRUNKING

Abstract: *this article examines the thermal effects of short-circuit currents on TPLM-6-1600-51 cast-resin-insulated 6 kV busbar trunking. Active resistance and heat generated by short-circuit currents are calculated for the extreme positions of the supply transformer's on-load tap changer (OLTC). Thermal fields are simulated using ELCUT software. The results show that short circuits in the busbar trunking produce temperatures far above those permissible for the insulating material, causing thermal degradation. The findings can be used to assess the condition of similar busbar trunking systems at various power facilities.*

Keywords: *6 kV busbar trunking, cast-resin insulation, thermal withstand capability, conductor heating, short circuit, thermal modeling.*