

Прикладные задачи экспертизы прочности литых токопроводов

С. В. Доронин,

*Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
Красноярского научного центра Сибирского отделения РАН,
кандидат технических наук, доцент*

Е. В. Москвичёв,

*Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
Красноярского научного центра Сибирского отделения РАН,
кандидат технических наук*

Д. В. Косолапов,

*Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука»
Красноярского научного центра Сибирского отделения РАН,
кандидат технических наук*

В. И. Осокин,

ООО Инженерный центр «Высокие технологии», директор

Анализ прочности литых токопроводов, накопление и обобщение результатов исследования свойств их материалов в широком диапазоне эксплуатационных температур и конструктивных решений необходимы для получения достоверных выводов при проведении экспертизы литых токопроводов. Предлагаем ознакомиться с выполненным анализом прочности элементов токопровода в объёме, позволяющем оценить возможность трещинообразования и разрушения изоляции токопровода в диапазоне температурных условий.

Ключевые слова: литой токопровод, изоляция, прочность, надёжность.

В настоящее время широкое распространение получают литые токопроводы как зарубежного, так и отечественного производства. Несмотря на декларируемые высокие показатели надёжности, прочности и долговечности литых токопроводов, опыт их эксплуатации свидетельствует о возможности их повреждения, причём более 90 % повреждений возникает в результате некачественного монтажа и ненадлежащего хранения [1]. Отсутствуют общепринятые подходы к анализу причин и условий возникновения механических повреждений литых токопроводов, остро востребованные в связи со случаями трещинообразования и разрушения элементов токопроводов во время эксплуатации. Не имеется достоверной информации о свойствах конструкционных материалов литых токопроводов, необходимой для проведения поверочных расчётов при анализе разрушений, а характеристики свойств, приводящиеся в открытых источниках, не содержат достаточного объёма информации, в частности, не охватывают широкий диапазон температур эксплуатации литых токопроводов.

Научно-техническая экспертиза прочности токопроводов является неотъемлемой частью оценки их работоспособности. Классические результаты исследований в этой области были получены достаточно давно [2–4] и на протяжении многих лет удовлетворяли потребностям инженерной практики. Сегодня

существует необходимость развития методических основ и информационной базы для экспертизы современных литых токопроводов, проводимой как при расследовании причин эксплуатационных повреждений, так и при анализе надёжности и безопасности схем электроснабжения на стадии их проектирования.

Методические подходы к решению указанных задач будем рассматривать на примере протяжённого токопровода, который эксплуатируется на открытом воздухе в температурных условиях Сибири при номинальном токе 6000 А и напряжении 6 кВ. Токопровод состоит из прямолинейных, Т-образных, Z-образных и Г-образных секций заводского изготовления, а также компенсаторов температурных деформаций. Элементы токопровода имеют по 3 токопроводящие шины, которые находятся в литой изоляции, изготовленной на основе полимерного компаунда.

В условиях значительной разницы температур окружающего воздуха и токопроводящих шин существует опасность трещинообразования в изоляции при температурном деформировании токопровода, что актуализирует вопросы определения особенностей нагружения, закономерностей деформирования и оценки прочности рассматриваемого литого токопровода. В связи с этим решались следующие прикладные задачи:

– исследование механических свойств материала изоляции токопровода в диапазоне эксплуатационных температур;

– анализ стационарного температурного режима работы секций, определяемого разницей температур токопроводящих шин и окружающего воздуха;

– оценка напряжённо-деформированных состояний секций при температурном деформировании;

– определение на основе расчётных оценок температурных деформаций токопровода минимального количества необходимых компенсаторов;

– анализ особенностей деформирования сборок секций в составе участка токопровода сложной конфигурации.

Был проведён комплекс расчётно-экспериментальных исследований с применением современного испытательного оборудования и численного моделирования на основе метода конечных элементов. Полученные экспериментальные значения характеристик механических свойств компаунда являлись исходной информацией при расчётах температурного деформирования токопровода, учитывающих количество тепла, выделяемого в шинах при прохождении электрического тока, теплопроводность компаунда и температуру окружающего воздуха. Эти факторы учитывались при конечно-элементном моделировании как отдельных секций, так и протяжённых участков токопровода путём решения связанной задачи стационарной теплопроводности и термоупругости. На первом этапе рассчитывались поля распределения температур, на втором – на основе полученного распределения температур и значений коэффициента линейного расширения выявлялись смещения узлов конечно-элементной модели, определяющие деформации и напряжения.

Исследование механических свойств материала изоляции

Материал изоляции токопровода представляет собой эпоксидный компаунд, получаемый в заводских условиях методом литья. Он насыщен частицами инертных материалов с мелкозернистой структурой [5]. Для изоляции соединений отдельных заводских секций друг с другом применяется компаунд, изготавливаемый на месте монтажа. Таким образом, исследования проводились для двух типов компаунда, условно называемых заводским и заливным.

Наличие эпоксидного связующего и мелкозернистого наполнителя позволяет отнести компаунд как к классу пластмасс, так и к классу композитных материалов. В связи с этим организация экспериментальных исследований базовых физико-механических свойств компаунда осуществлялась с учётом требований ГОСТ 15139-69, ГОСТ 15173-70 и ГОСТ 25.604-82 к механическим испытаниям пластмасс и композиционных материалов с полимерной матрицей.

Экспериментальные исследования проводились в термокамере на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 с использованием приспособления для трёхточечного изгиба, пирометра, термометра и экстензометра и заключались в определении характеристик механических свойств и коэффициента линейного теплового расширения. Для определения характеристик механических свойств (модуля упругости и предела прочности) проводились статические испытания прямоугольных образцов на трёхточечный изгиб, согласно ГОСТ 25.604-82, при температурах -60 , 0 и $+40$ °С. По результатам испытаний шести выборок образцов при трёх температурах определялись средние значения модуля упругости и предела прочности (\bar{E} , $\bar{\sigma}_b$), а также их коэффициенты вариации (V_E , V_{σ}) для каждой выборки (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики механических свойств компаунда

Компаунд	Характеристика	Температура, °С		
		-60	0	+40
Модуль упругости				
Заливной	\bar{E} , МПа	13 530	11 748	10 184
	V_E , %	5,09	9,77	6,03
Заводской	\bar{E} , МПа	13 367	12 043	10 861
	V_E , %	8,70	6,28	3,38
Предел прочности при изгибе				
Заливной	$\bar{\sigma}_b$, МПа	47,36	35,94	32,47
	V_{σ} , %	7,05	9,98	5,84
Заводской	$\bar{\sigma}_b$, МПа	36,42	31,87	30,46
	V_{σ} , %	14,22	9,11	5,13

Для определения коэффициента линейного теплового расширения проводились испытания образцов в виде стержней квадратного поперечного сечения, согласно ГОСТ 15173-70. По результатам испытаний четырёх выборок определялся средний коэффициент линейного теплового расширения $\bar{\alpha}$ и вариация для каждой выборки (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент линейного расширения компаунда

Компаунд	Характеристика	Температура, °С	
		-60	+40
Заливной	$\bar{\alpha} \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	19,59	20,10
	Вариация, %	7,15	20,51
Заводской	$\bar{\alpha} \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	20,26	16,25
	Вариация, %	14,06	20,28

Полученные экспериментальные значения характеристик механических свойств компаунда были использованы при расчёте напряжённо-деформированного состояния токопровода для различных температур эксплуатации.

Анализ стационарного температурного режима работы секций

Исследованы стационарные температурные поля в сечениях основных типов секций токопровода при различных заданных температурах шин и внешних поверхностей изоляции. Температура токопроводящих шин варьировалась в диапазоне от -60 до $+120$ °С в соответствии с тремя режимами эксплуатации токопровода: безтоковой нагрузки, при пониженной токовой нагрузке в период строительства и при номинальной токовой нагрузке. Наружная температура изоляции задавалась равной температуре окружающего воздуха (-60 °С – в зимний период, $+40$ °С – в летний период и 0 °С – в межсезонье). Экспертная оценка комбинаций температурных режимов работы позволила сформулировать 10 расчётных случаев. Задача решалась методом конечных элементов на основе уравнений стационарной теплопроводности.

Полученные результаты показали, что температура внутри секций плавно уменьшается от поверхностей шин к внешним поверхностям изоляции. Отсутствуют зоны повышенных температурных градиентов, потенциально способные привести к концентрации температурных деформаций и напряжений. Полученные распределения температур являлись начальными условиями при моделировании температурных деформаций и напряжений в секциях токопровода.

Оценка напряжённо-деформированного состояния секций при температурном деформировании

Многовариантный анализ напряжённо-деформированного состояния секций был выполнен для рассмотренных стационарных температурных режимов работы токопровода. Эти режимы охватывали основные возможные варианты температурного нагружения в течение жизненного цикла токопровода. Расчёты проводились как без учёта закрепления секций, так и в случае с жёстким закреплением торцов.

Анализ результатов показал, что для незакрепленных секций во всех рассмотренных диапазонах температур напряжения в компаунде не превышают предела прочности. Однако уровень эквивалентных напряжений в компаунде жёстко закреплённых секций вследствие возникающих реакций в ряде расчётных случаев превышает предел прочности, что может приводить к образованию трещин.

Например, при температуре токопроводящих шин $+120$ °С и окружающего воздуха $+40$ °С, что соответствует номинальной токовой нагрузке при работе в летний период, максимальные эквивалентные напряжения в компаунде незакрепленной прямолинейной секции равны 10 МПа. При тех же усло-

виях работы прямолинейной секции, находящейся в жёсткой заделке, максимальные эквивалентные напряжения в компаунде увеличиваются более чем в 3 раза и составляют 34,6 МПа.

Таким образом, при отсутствии факторов, ограничивающих продольные деформации секций, напряжения в компаунде не превышают предела прочности. Однако в случае стеснения деформаций вдоль оси секции эквивалентные напряжения могут превышать предел прочности, что является потенциально опасным в связи с возможностью трещинообразования и разрушения изоляции. Из этого следует, что наличие достаточного количества компенсаторов температурных деформаций на прямолинейных участках, а также в местах отвода и поворота трассы обеспечивает благоприятные условия работы секций, что положительно сказывается на безопасности токопровода.

Определение минимального количества компенсаторов температурных деформаций

С учётом экспериментально определённых значений модуля упругости и коэффициента линейного расширения компаунда для рассматриваемых расчётных случаев термического нагружения получены численные оценки изменения длины Δx прямолинейной секции длиной 4 м как основного конструктивного элемента токопровода (рис. 1). Это позволяет определить необходимое количество компенсаторов температурных деформаций или допустимое расстояние (длину участка токопровода) между двумя соседними компенсаторами.

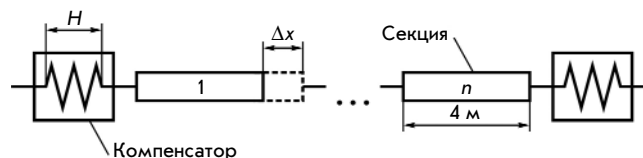


Рис. 1. Схема прямолинейного участка трассы токопровода

Рассмотрим прямолинейный участок трассы, который состоит из n прямолинейных секций длиной 4 м, находящихся между компенсаторами (рис. 1). Если предположить, что при монтаже компенсаторы выставлены в среднее положение, то суммарное изменение длины всех секций не должно превышать суммарного хода компенсаторов. Тогда условие нормальной работы участка выражается формулой:

$$n \cdot \Delta x \leq k \cdot H$$

где Δx – удлинение прямолинейной секции;
 k – количество компенсаторов;
 H – ход компенсатора.

По результатам расчётов напряжённо-деформированного состояния примем значение Δx равным 7,8 мм, что соответствует работе прямолинейной секции при температуре токопроводящих шин, равной $+120$ °С, и окружающего воздуха $+40$ °С. Задав ход

компенсатора $H = 90$ мм, вычислим k . Округлив k до целого значения в большую сторону, получим минимальное количество компенсаторов на рассматриваемом участке. Таким образом, при рассмотренных температурных условиях на каждые 44 метра трассы токопровода необходимо устанавливать по одному компенсатору температурных деформаций. При более редком расположении компенсаторов в ряде расчётных случаев возможно повреждение секций токопровода вследствие температурных деформаций.

Особенности деформирования сборок секций в составе участка токопровода сложной конфигурации

В целях исследования деформирования сборок секций анализировались участки трассы, ограниченные соседними компенсаторами температурных деформаций и имеющие вертикальные секции, проходящие через проёмы перекрытий (рис. 2). В этом случае компенсаторы и проёмы являются естественными граничными условиями, замыкающими силовой поток в пределах рассматриваемого участка. Таким образом, исследования деформирования сборок секций были сфокусированы на ряде особенностей, требующих решения следующих задач:

а) определение перемещений горизонтальных участков токопровода 3 и определение условий, при которых они не превышают величину рабочего хода компенсатора (могут ли быть компенсированы);

б) определение горизонтальных перемещений вертикальных секций 2 в проёмах перекрытий и оценка возможности превышения этими перемещениями допустимой величины зазора D между вертикальной секцией и перекрытием;

в) определение напряжений в изоляции токопровода как в случае свободного перемещения вертикальных секций в проёмах перекрытий (наличие должного зазора или нежёсткого заполнителя), так и в случае зацементирования (отсутствие зазора между вертикальной секцией и перекрытием или наличие жёсткого заполнителя в проёме) с оценкой возможности трещинообразования в изоляции.

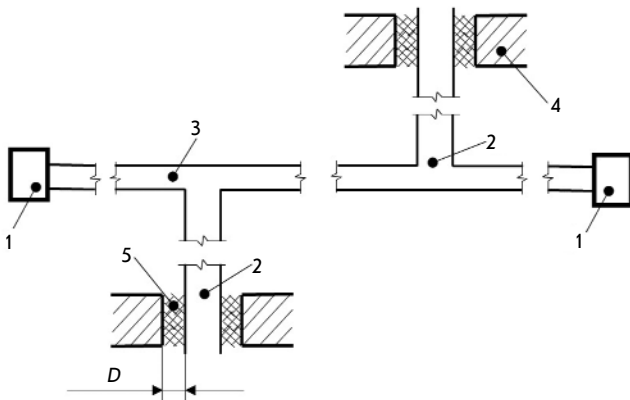


Рис. 2. Элементы участка трассы токопровода:
 1 – компенсаторы температурных деформаций;
 2, 3 – соответственно вертикальная и горизонтальная секции трассы;
 4 – проём перекрытия;
 5 – заполнитель проёма

Для решения этих задач применялись пространственные конечно-элементные модели с использованием трёхмерных конечных элементов, полностью моделирующих геометрию участка токопровода (рис. 3). Полученные оценки перемещений и напряжений для участков трассы токопровода типичной конфигурации, работающих в различных температурных условиях, позволяют утверждать, что при больших длинах участков между соседними компенсаторами (80 м и более) горизонтальные перемещения в ряде расчётных случаев превышают величину рабочего хода компенсаторов. Вследствие этого горизонтальные смещения вертикальных секций трассы в проёмах перекрытий могут превышать величину зазора D , в результате чего в элементах токопровода возникают дополнительные силовые факторы – изгибающие и крутящие моменты, приводящие к локальному росту напряжений и опасности трещинообразования в изоляции.

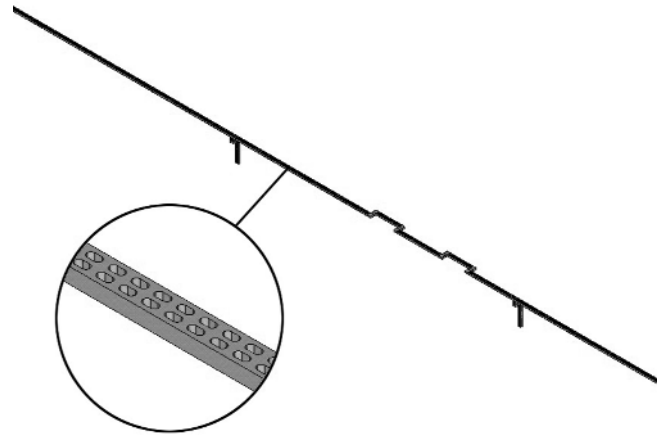


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели участка токопровода

Общие выводы, которые характеризуют закономерности температурного деформирования токопроводов, можно сформулировать следующим образом:

– отсутствие достаточного количества компенсаторов приводит к возникновению разрушающих напряжений в изоляции токопровода вследствие температурных деформаций линейных секций токопровода;

– температурные деформации незакреплённых секций не приводят к возникновению в них разрушающих напряжений. Это свидетельствует о принципиальной возможности эксплуатации токопровода в рассматриваемом диапазоне температур при условии обеспечения качественного монтажа и установки в необходимых местах достаточного количества компенсаторов температурных деформаций;

– при недостаточном количестве компенсаторов горизонтальные смещения вертикальных фрагментов токопровода превышают зазоры в проёмах перекрытий, что приводит к возникновению дополнительных изгибающих моментов в этих зонах и росту напряжений в изоляции токопровода, а следовательно, к образованию трещин.

Полученные экспериментальные оценки механических характеристик компаунда в условиях температурного диапазона $-60...+40$ °С могут быть использованы при проектных расчётах, научно-технической экспертизе токопровода, анализе причин и условий возникновения эксплуатационных повреждений. Необходимо дальнейшее разви-

тие подхода к разработке системы данных прикладных задач с расширением типов возможных воздействий при штатных и нештатных условиях эксплуатации, что в конечном итоге открывает возможности регламентации процедур научно-технической экспертизы рассматриваемого класса технических объектов.

Литература

1. Даниелян Н. Опыт применения литых токопроводов в России // Энергетика и промышленность России. – 2014. – № 7 (243). – С. 34–35.
2. Анастасиев П. И., Ермилов А. А., Зеленецкий М. М., Фролов Ю. А. Электрические сети энергоёмких предприятий. – М.: Энергия, 1971. – 344 с.
3. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Работа и расчёт проводов и тросов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.
4. Денисюк И. Н. Механический расчёт проводов на открытых подстанциях. ОНТИ. – М.; Л.: Энергоиздат, 1933.
5. Сибикин Ю. Д. Электрические подстанции. – М.: Директ-Медиа, 2014. – 414 с.

On scientific and technical inspections of insulated cast-resin busbars durability

S. V. Doronin,

Special Design & Technology Bureau "Nauka", Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, PhD, associate professor

E. V. Moskvichyov,

Special Design & Technology Bureau "Nauka", Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, PhD

D. V. Kosolapov,

Special Design & Technology Bureau "Nauka", Krasnoyarsk Science Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, PhD

V. I. Osokin,

Engineering Center "High Technologies Ltd", CEO

The durability analysis as well as collecting results of material inspection for cast-resin busbars in a wide temperature range and other changing conditions are required in order to have truthful information about cast-resin busbars' check-up. We have performed the durability analysis to estimate possibility of cracks appearing and insulation destroying under specific temperatures.

Keywords: cast-resin busbar, insulation, durability, reliability.