

Информационное обеспечение анализа механической прочности токопроводов с литой изоляцией

Е. В. Москвичев^{1,*}, С. В. Доронин²

¹ООО “Диджитал Майнд Девелопмент”, Красноярск, Россия

²Красноярский филиал Института вычислительных технологий СО РАН, Россия

*Контактный e-mail: jugr@icm.krasn.ru

Сформулирован перечень задач для информационного обеспечения анализа механической прочности токопроводов с литой изоляцией. Такие задачи включают исследование механических свойств материала изоляции, анализ стационарного температурного режима работы токопровода, оценку напряженно-деформированного состояния и анализ деформирования сборок секций токопровода с учетом компенсаторов температурных расширений. Решение задач основано на проведении численного конечно-элементного анализа моделей теплопроводности и термоупругости. С использованием логической схемы информационного обеспечения анализа механической прочности выполнена серия вычислительных экспериментов, моделирующих деформирование участка трассы токопровода сложной конфигурации при различных условиях нагружения. Результаты позволяют сделать выводы о причинах разрушения изоляции токопровода.

Ключевые слова: токопровод, литая изоляция, механическая прочность, информационная поддержка, моделирование.

Введение

На современных электростанциях для передачи электроэнергии большой мощности широкое распространение получают литые токопроводы как зарубежного, так и отечественного производства. Токопроводы состоят из прямолинейных, Т-, Z- и Г-образных секций заводского изготовления, а также компенсаторов температурных расширений. Секции и компенсаторы токопровода имеют по три или более токопроводящих шины, которые находятся в литой изоляции, изготовленной на основе полимерного компаунда. Несмотря на декларируемые высокие показатели надежности, прочности и долговечности литых токопроводов, при эксплуатации в них возникают повреждения, причины которых до настоящего времени не являлись предметом систематических исследований. Одна из точек зрения заключается в том, что более 90 % повреждений вызваны некачественно выполненным монтажом и ненадлежащим хранением элементов токопровода [1].

Изучение повреждений токопровода на одном из предприятий Сибири позволило установить, что в большинстве случаев их причиной было трещинообразование в литой изоляции. Это обусловило проведение расширенного анализа механической прочности, который предполагает наличие информации о свойствах материалов и конструкции

токопроводов, обоснованных и апробированных методических подходов. Однако достоверных данных о свойствах конструкционных материалов литых токопроводов, необходимых для проведения поверочных расчетов при анализе разрушений, не имеется, а характеристики свойств, приводящиеся в открытых источниках, не содержат достаточного объема информации, в частности, не охватывают широкий диапазон температур эксплуатации литых токопроводов. Отсутствуют общепринятые подходы к анализу причин и условий возникновения механических повреждений литых токопроводов, хотя они остро востребованы в связи со случаями трещинообразования и разрушения элементов токопроводов во время эксплуатации.

Таким образом, необходимо развитие информационного обеспечения оценки механической прочности литых токопроводов, включающее как обоснование постановок и алгоритмов решения задач их прочностного анализа, так и экспериментальное изучение свойств и характеристик применяемых материалов. Такое информационное обеспечение является необходимым условием разработки методологии прикладного системного анализа надежности важных элементов инфраструктуры энергетической отрасли.

1. Постановка задачи

В результате логического анализа физико-технических процессов в элементах токопровода на всех стадиях его жизненного цикла определен необходимый минимум задач, постановка и решение которых позволит информационно обеспечить оценку механической прочности как отдельных типовых секций, так и сборок сложной конфигурации, составляющих трассу токопровода:

- 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 напряженно-деформированного состояния секций при температурном нагружении;
- определение на основе расчетных оценок температурных деформаций токопровода минимального количества необходимых компенсаторов температурных расширений;
- анализ особенностей деформированияборок секций в составе участка (трассы) токопровода сложной конфигурации.

Структура этих задач в терминах используемых количественных характеристик может быть представлена следующим образом. Механические свойства материала изоляции в диапазоне эксплуатационных температур описываются экспериментальными зависимостями вида $\{m\} = f(\{t_s\})$, где $\{m\} = \{E, \sigma_b, \alpha\}$ — множество механических свойств материала изоляции; E, σ_b, α — соответственно характеристики жесткости (модуль Юнга), прочности (временное сопротивление) и коэффициент линейного температурного расширения; $\{t_s\} = \{t_{ш}, t_b\}$ — множество эксплуатационных температур; $t_{ш}, t_b$ — температуры токопроводящей шины и окружающего воздуха.

Анализ стационарного температурного режима секций ввиду их произвольной конфигурации сводится к численному решению стационарного уравнения теплопроводности методом конечных элементов, в результате которого определяется множество температур в узлах конечно-элементной модели секции токопровода в зависимости от таких факторов, как:

- геометрические параметры секции, включая габаритные размеры, количество и размеры токопроводящих шин;
- коэффициенты теплопроводности материалов;
- граничные температурные условия, определяемые параметрами $t_{ш}$ и $t_{в}$.

Оценка напряженно-деформированного состояния секций при температурном нагружении осуществляется путем решения связанной задачи стационарной теплопроводности и термоупругости. На первом этапе решается задача стационарной теплопроводности и рассчитываются поля распределения температур, сохраняемые в базе данных решаемой задачи. На втором этапе на основании полей распределения температур и значений коэффициентов линейного температурного расширения определяются смещения узлов конечно-элементной модели, вызывающие деформации и напряжения (задача термоупругости).

Приведенные численные задачи определяют минимально необходимый набор расчетных моделей, используемых при анализе механической прочности токопроводов. Результаты решения этих задач, полученные и обобщенные для типовых серийно выпускаемых секций, могут служить основой для формирования информационной базы обеспечения технической экспертизы современных литых токопроводов, проводимой как при расследовании причин эксплуатационных повреждений, так и при оценке надежности и безопасности схем электроснабжения на стадии их проектирования [2].

2. Задачи прочностного анализа сборок секций токопровода сложной конфигурации

Для анализа характера деформирования и условий разрушения сборок секций токопроводов сложной конфигурации, имеющих индивидуальное исполнение для конкретных энергетических предприятий, необходимо построение модели поведения трассы токопровода с учетом компенсаторов температурных расширений. Такая модель является элементом информационного обеспечения обоснования сценариев повреждений токопроводов большой протяженности с учетом особенностей их взаимодействия с несущими конструкциями рассматриваемого энергетического объекта.

Рабочая часть компенсатора температурных расширений включает два независимых блока с токопроводящими шинами, соединенных токопроводящими упругими элементами, каждый из которых представляет собой изолированный набор из металлических пластин. Наличие упругих элементов обеспечивает смещение блоков относительно друг друга, компенсирующее температурное расширение соседних присоединенных секций токопровода.

Численное моделирование и экспериментальное исследование упругого элемента компенсатора позволило построить модель его поведения $\Delta h = f(F)$, представляющую собой эмпирическую зависимость изменения его длины Δh от внешнего усилия F . Данная модель совместно с расчетными оценками температурных расширений элементов токопровода Δx позволяет рассчитывать минимальное количество компенсаторов температурных расширений, необходимое для обеспечения безаварийной работы протяженных участков токопровода (рис. 1).

Анализ особенностей деформирования протяженного (длиной более 100 м) участка трассы токопровода сложной конфигурации, представленного на рис. 2, предполагает

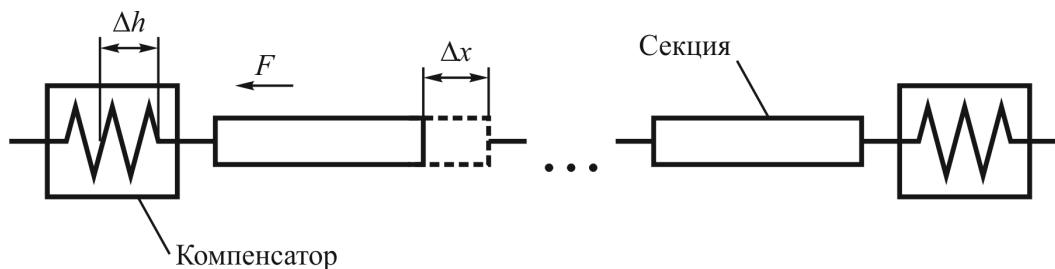


Рис. 1. Схема участка трассы токопровода с компенсаторами температурных расширений

проведение серии вычислительных экспериментов, содержание которых в каждом конкретном случае обусловлено постановкой и решением следующих задач:

- расчет горизонтальных перемещений торцевых участков токопровода и оценка компенсирующей способности участка трассы – превышают ли суммарные перемещения секций величину рабочего хода компенсатора;
- расчет перемещений точек входа вертикальных секций в проемы строительных перекрытий и оценка величины зазора между вертикальной секцией и контуром проема;
- расчет вертикальных смещений горизонтальных участков и оценка возможности образования “волн” и “горбов” вдоль трассы токопровода, наблюдаемых визуально на практике в условиях стесненного деформирования;
- расчет горизонтальных перемещений сечений токопровода при различных условиях закрепления вертикальных секций в перекрытиях, оценка возможности трещинообразования в изоляции по критерию максимальных эквивалентных напряжений.

Формулируется ряд гипотетических сценариев поведения токопровода на основе нескольких расчетных схем и соответствующих граничных условий. Так, для участка токопровода, конфигурация которого представлена на рис. 2, рассматриваются следующие расчетные схемы.

Схема 1. В точках В, Г, Д, Е и Ж расположены шарнирно подвижные опоры, моделирующие возможность смещения вертикальных секций по горизонтали в пределах

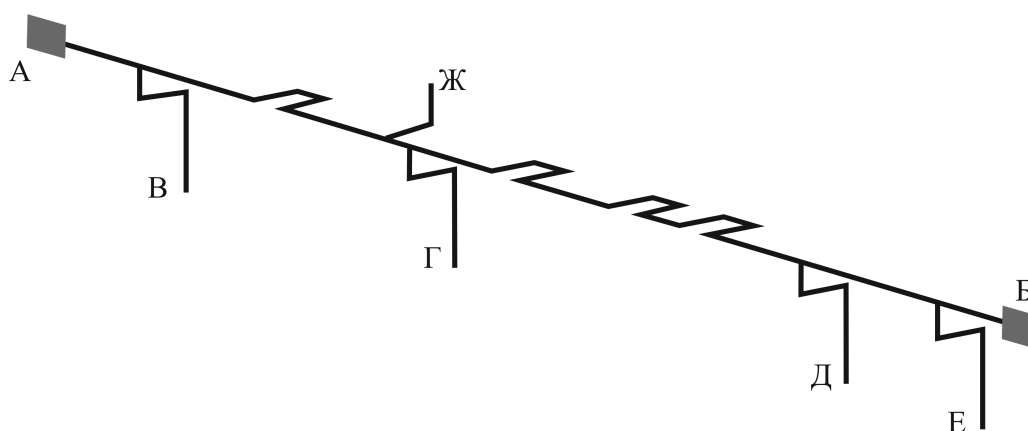


Рис. 2. Пример участка трассы токопровода сложной конфигурации: А, Б — компенсаторы температурных расширений; В, Г, Д, Е, Ж — проемы перекрытий

проема в перекрытии. Эта расчетная схема моделирует ситуацию, когда токопровод, деформируемый при термическом нагружении, не встречает сопротивлений на участке между двумя компенсаторами.

Схема 2. В точке В жесткая заделка моделирует отсутствие зазора между вертикальной секцией и контуром проема либо наличие жесткого заполнителя в проеме. В точках Г, Д, Е и Ж находятся шарнирно подвижные опоры. Эта расчетная схема моделирует ситуацию защемления одной из вертикальных секций при возможности свободного перемещения остальных.

Схема 3. В точках В и Е расположена жесткая заделка, точки Г, Д и Ж шарнирно закреплены. Эта расчетная схема моделирует “замыкание деформаций” на участке между двумя крайними вертикальными секциями и минимальное воздействие на компенсаторы в точках А и Б.

Схема 4. Жесткая заделка находится в точках В, Г, Д, Е и Ж. Эта расчетная схема характеризуется наибольшим стеснением деформаций участка токопровода.

Анализ жизненного цикла энергетического предприятия, эксплуатирующего рассматриваемую трассу токопровода в условиях Сибири, позволил обосновать расчетные случаи термического нагружения, представленные в таблице, при различных режимах работы в широком диапазоне температур окружающей среды.

Результаты многовариантного вычислительного моделирования поведения токопровода сложной конфигурации при данных расчетных случаях нагружения и четырех рассмотренных типах расчетных схем позволили сделать следующие выводы:

- в ряде расчетных случаев горизонтальные смещения секций токопровода превышают величину хода компенсаторов, что означает невозможность компенсации температурных расширений;
- в ряде расчетных случаев горизонтальные смещения превышают зазоры в проемах перекрытий, что приводит к возникновению изгибающих нагрузок и образованию “горбов” вдоль трассы токопровода;
- эквивалентные напряжения в изоляции токопровода для расчетных схем 3 и 4 превышают предел прочности при изгибе в большинстве расчетных случаев, что свидетельствует о возможности трещинообразования в изоляции и повреждения секций.

Расчетные случаи термического нагружения токопровода, °С

Температура окружающего воздуха $t_{в}$	Температура шины $t_{ш}$
На этапе строительства без токовой нагрузки	
-60	-60
+40	+40
На этапе ввода в эксплуатацию при пониженной токовой нагрузке	
-60	-40
-60	-50
0	+20
0	+10
+40	+60
+40	+50
На этапе эксплуатации при номинальной токовой нагрузке	
-60	-10
+40	+90

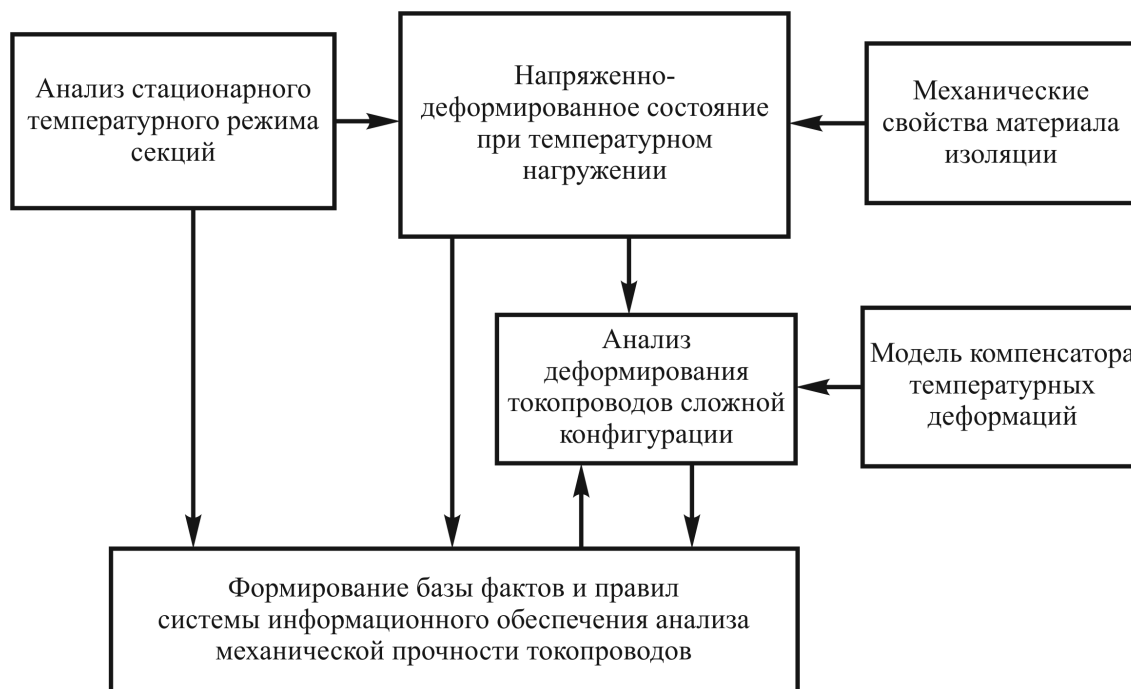


Рис. 3. Логическая схема информационного обеспечения анализа механической прочности токопроводов

Таким образом, для рассматриваемого участка трассы подтверждена возможность разрушения изоляции токопровода в местах фактически наблюдающегося трещинообразования. Отсутствие должного количества компенсаторов температурных расширений привело к возникновению дополнительных усилий и повышенным напряжениям в изоляции.

Заключение

Выполненные расчетно-экспериментальные исследования и построенные модели лежат в основе логической схемы информационного обеспечения анализа механической прочности литых токопроводов, представленной на рис. 3. Логическая схема включает систему взаимосвязанных прикладных задач, результаты решения которых представляют собой необходимый и достаточный объем количественных и качественных данных для установления причин и условий разрушения токопроводов с литой изоляцией.

В перспективе цель анализа механической прочности токопроводов согласно представленной схеме — это регламентация процедур их научно-технической экспертизы. Полученные результаты являются практическим вкладом в развитие прикладного системного анализа конструкционной прочности, живучести и безопасности инфраструктуры энергетических предприятий, эксплуатирующих токопроводы с литой изоляцией.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 16-48-243022.

Список литературы / References

- [1] **Даниелян Н.** Опыт применения литых токопроводов в России // Энергетика и промышленность России. 2014. № 7.
Адрес доступа: http://www.eprussia.ru/epr/243/15956.htm?sphrase_id=593096
Danielyan, N. Experience of using cast resin insulated busbars in Russia // Power and Industry of Russia. 2014. No. 7.
Available at: http://www.eprussia.ru/epr/243/15956.htm?sphrase_id=593096 (In Russ.)
- [2] **Доронин С.В., Москвичев Е.В., Косолапов Д.В., Осокин В.И.** Прикладные задачи научно-технической экспертизы прочности литых токопроводов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 6(66). С. 45–49.
Doronin, S.V., Moskvichev, E.V., Kosolapov, D.V., Osokin, V.I. On scientific and technical inspections of insulated cast-resin busbars durability // Energy-Safety and Energy-Economy. 2015. No. 6(66). P. 45–49. (In Russ.)

Поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

Information support of mechanical strength analysis of cast-resin insulated busbar systems

MOSKVICHEV, EGOR V.^{1,*}, DORONIN, SERGEY V.²

¹Ltd “Digital Mind Development”, Krasnoyarsk, 660049, Russia

²Krasnoyarsk Branch of Institute of Computational Technologies SB RAS, 660049, Russia

*Corresponding author: Moskvichev, Egor V., e-mail: jugr@icm.krasn.ru

Goals and methods. The research is aimed to provide the information support for strength analysis of cast-resin insulated busbar systems. It requires solving the series of tasks which include determination of mechanical properties of insulation material, analysis of stationary temperature mode of elements of busbar system, assessment of stress-strain state and deformation analysis of complex busbar assemblies considering thermal expansion compensators. To solve these tasks the methods of numerical analysis and mechanical testing are considered. Numerical analysis consists of solving the models of heat conduction and thermoelasticity by finite element method.

Results. The discussed problems have been solved in order to analyze the possibility of isolation fracture on a long section of busbar system with complex configuration operated in Siberia region. The thermal conditions and load scheme for corresponding numerical models were defined according to operational modes of busbar system. The results showed the possibility of crack initiation in the insulation in some loading cases.

Conclusion. The information support components for mechanical strength analysis of cast-resin insulated busbar systems are formulated in the form of logical scheme. The analysis carried out according this scheme allows getting the necessary and sufficient data to establish the causes of fracture of cast-resin insulated busbar systems.

Keywords: busbar systems, cast insulator, mechanical strength, information support, modelling.

Acknowledgements. The study was supported by RFBR, Government of Krasnoyarsk region and Krasnoyarsk Regional Science Foundation as part of a research project No 16-48-243022.

Received 24 October 2016