УДК 621.311 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-49-56

Определение электромагнитных влияний многоамперных линий электропередачи на металлические сооружения

Ю.Н. Булатов[1a], А.В. Крюков[2b], А.В. Черепанов[2c], А.Е. Крюков[3d]

[1] Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[2] Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия
[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия
[a] bulatovyura@yandex.ru, [b] and_kryukov@mail.ru, [c] smart_grid@mail.ru, [d] appleforevor@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-3716-5357, [b] https://orcid.org/0000-0001-6543-1790,
[c] https://orcid.org/0000-0002-7712-9537, [d] https://orcid.org/0000-0003-3272-5738.
Статья поступила 02.09.2026, принята 09.09.2026.

На энергоёмких промышленных предприятиях для передачи значительных потоков мощности применяются гибкие симметричные токопроводы (ГСТ), представляющие собой многоамперные линии электропередачи (ЛЭП) напряжением 10 кВ с большим суммарным сечением проводов. Такие ЛЭП могут монтироваться на эстакадах, по которым проложены металлические трубы (МТ), имеющие изоляционные покрытия. Вследствие электромагнитных влияний (ЭМВ), создаваемых ГСТ, на МТ могут наводиться напряжения, опасные для обслуживающего персонала. Кроме того, они могут усиливать коррозию металла сооружения. Для снижения этих негативных эффектов применяются различные мероприятия, выбор которых должен осуществляться на базе результатов компьютерного моделирования. Для проведения расчётов наведённых напряжений (НН) необходима разработка адекватных методов и моделей. В статье представлены результаты исследований, направленных на создание таких моделей, реализованных в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC. На основе проведённого моделирования установлено, что уровни НН значительно превышают допустимую величину в 20 В для труб, смонтированных на высоте. Для их снижения можно использовать современные средства в виде активных компенсаторов НН. Предложенный подход к определению ЭМВ ГСТ на протяжённые металлические конструкции отличается комплексностью и универсальностью. Он позволяет моделировать токопроводы различного конструктивного исполнения, гибкие и жёсткие, выполненные на основе шин различного профиля. В результате моделирования может быть получена детальная картина распределения токов по окружности труб, что даёт возможность точного анализа вопросов электромагнитной совместимости ГСТ и МТ.

Ключевые слова: гибкие симметричные токопроводы; прокладка на эстакадах; электромагнитные влияния на проводящие конструкции; моделирование.

Determination of electromagnetic influences of high-ampere power lines on metal structures

Yu.N. Bulatov[1a], A.V. Kryukov[2b], A.V. Cherepanov[2c], A.E. Kryukov[3d]

[1] Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[2] Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky, Irkutsk, Russia
[3] Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a] bulatovyura@yandex.ru, [b] and_kryukov@mail.ru, [c] smart_grid@mail.ru, [d] appleforevor@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0000-0002-3716-5357, [b] https://orcid.org/0000-0001-6543-1790,
[c] https://orcid.org/0000-0002-7712-9537, [d] https://orcid.org/0000-0003-3272-5738.
Received 02.09.2026, accepted 09.09.2026.

At energy-intensive industrial facilities, flexible symmetrical busducts are used to transmit high power flows. These are high-amperage 10 kV power lines with a large total cross-section of conductors. These transmission lines can be mounted on overpasses carrying metal pipes with insulating coatings. Due to electromagnetic influences generated by the busducts, voltages can be induced in the pipes, posing a hazard to maintenance personnel. Furthermore, these voltages can increase corrosion of the structure's metal. To mitigate these negative effects, various measures are implemented, the selection of which should be based on the results of computer modeling. Calculating induced voltages requires the development of adequate methods and models. This article presents the results of research aimed at creating such models, implemented in the Fazonord AC-DC industrial software package. Based on the conducted modeling, it is established that induced voltage levels significantly exceed the permissible value of 20 V for pipes installed at elevated heights. Modern means, such as active induced voltage compensators, can be used to reduce these voltages. The proposed approach to determining the electromagnetic effects of flexible symmetrical busbars on extended metal structures is comprehensive and versatile. It enables the modeling of busbars of various designs, flexible and rigid, and those based on busbars of various profiles. The modeling process yields a detailed picture of the current distribution around the pipe circumference, enabling an accurate analysis of the electromagnetic compatibility of flexible symmetrical busbars and extended conductive structures.

Keywords: flexible symmetrical busbars; overpass installation; electromagnetic effects on conductive structures; modeling.

Введение и обзор литературы. Для передачи значительных потоков мощности на энергоёмких промышленных предприятиях применяются гибкие симметричные токопроводы (ГСТ), представляющие собой многоамперные ЛЭП с большим суммарным сечением проводов. Монтаж ГСТ может выполняться на эстакадах, по которым проложены металлические трубы (МТ). За счёт электромагнитных влияний ГСТ на МТ могут возникать наведённые напряжения (НН), опасные для обслуживающего персонала. Кроме того, НН усиливают коррозию металла сооружения. Для снижения этих негативных эффектов применяются различные мероприятия, выбор которых должен осуществляться на базе результатов компьютерного моделирования. Для проведения расчётов НН необходима разработка адекватных методов и моделей.

Решению задач моделирования многоамперных токопроводов (ТПр) высокого и низкого напряжения посвящено значительное число работ. Так, например, вопросы внедрения ТПр с литой изоляцией в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий рассмотрены в [1]. Особенности применения ТПр данного типа при проектировании СЭС описаны в [2]. Оценка сопротивления ТПр с учётом несинусоидальности и несимметрии дана в [3]. Задача определения свойств экранированного ТПр решена в [4]. Методика тепловизионного контроля ТПр описана в [5]. Анализ распределения напряжённостей электрического поля (ЭП) внутри коаксиальных ТПр 110 кВ выполнен в [6]. Особенности электродинамики ТПр при коротких замыканиях (КЗ) изучены в [7]. Задача определения термической стойкости экранированных ТПр решена в [8]. Принципы контроля частичных разрядов в экранированных ТПр сформулированы в [9]. Тепловая модель ТПр с газовой изоляцией представлена в [10]. Тенденции развития изоляции ТПр описаны в [11]. Методика учёта воздействия токов КЗ при проектировании ТПр 6−10 кВ приведена в [12]. Компактная конструкция ГСТ предложена в [13]. Результаты расчёта гибких ТПр с учётом особенностей конструктивных элементов представлены в [14, 15]. Исследование распределения напряжённостей магнитного поля в ТПр выполнено в [16]. Расчёты допустимого тока ТПр приведены в [17]. Задача определения электромагнитной силы при испытании на КЗ в трёхфазной шинной системе решена в [18]. Анализ магнитного поля экранированной шинной системы проведён в [19]. Исследование электромагнитной силы, на которую влияет ток КЗ при вертикальном и горизонтальном расположении шинной системы, проведено в [20]. Анализ системы шин с эпоксидным покрытием, используемой в низковольтном шинопроводе с номинальным током 2000 А, выполнен в [21]. Задача прогнозирования температуры в трёхфазной шинной системе решена в [22].

Представленный обзор публикаций по вопросам моделирования многоамперных ТПр позволяет сделать следующие выводы:

1. Решение задач определения режимов и электромагнитных полей ТПр имеет важное значение при проектировании и эксплуатации современных систем электроснабжения.

2. Методика моделирования ТПр, проложенного по эстакаде с МТ и определения его электромагнитных влияний на трубы в описанных выше работах не представлена. Для реализации такой методики может использоваться подход, базирующийся на мультифазном представлении СЭС, предложенный в [23–25].

Ниже приведены результаты исследований, направленных на разработку компьютерных моделей для вычисления ЭМВ многоамперных линий электропередачи на металлические сооружения.

Результаты моделирования. Моделирование проведено в промышленном программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC для схемы СЭС с ГСТ, представленной на рис. 1. Поперечное сечение ГСТ показано на рис. 2, *а*. На рис. 2, *б* приведены координаты расположения токоведущих частей ГСТ, а также труб, смонтированных на эстакаде токопровода. Для точного моделирования труб, позволяющего определить распределение токов по их окружностям, использовался подход, базирующийся на их моделировании набором проводников, суммарное сечение которых равнялось сечению металла МТ. Такой подход обеспечивал корректный учёт эффекта близости [26]. Часть схемы расчётной модели, реализованной в ПК Fazonord AC-DC, приведена на рис. 3. Моделирование режимов СЭС осуществлялось с учётом изменяющихся во времени активных и реактивных нагрузок на приемном конце ГСТ. Протяжённость ГСТ принята равной двум километрам. Графики нагрузок показаны на рис. 4. Для учёта вариаций наведённых напряжений на МТ по длине участка сближения ГСТ с МТ модель была разбита на пять участков, протяжённостью в 400 метров. На концах МТ предполагалось наличие заземлений с сопротивлением 10 Ом.

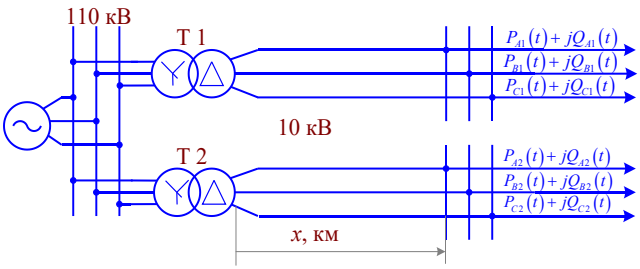
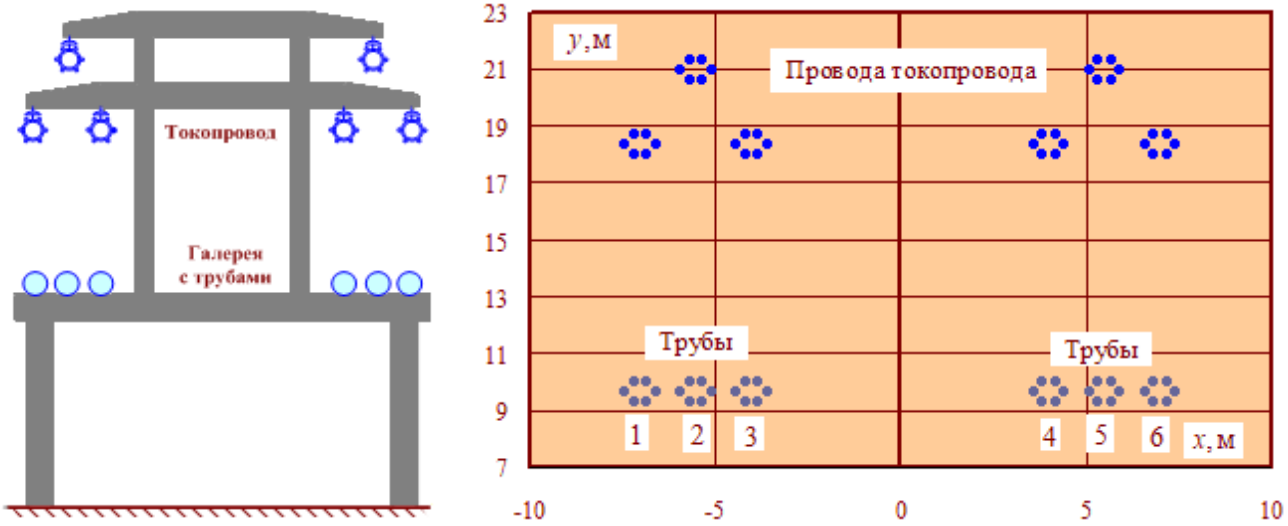


Рис. 1. Схема СЭС

Результаты моделирования представлены на рис. 5–12. На рис. 5 показаны графики зависимостей напряжений на приёмном конце ГСТ от времени. Из них видно, что из-за различия активных и реактивных нагрузок ГСТ по фазам, а также вследствие значительных взаимных электромагнитных влияний токоведущих частей ГСТ на приёмном конце токопровода возникает несимметрия напряжений, уровни которой в отдельные моменты времени превышают нормально допустимые величины в 2 % (рис. 6, *а*). Для снижения величин коэффициента несимметрия напряжения по обратной последовательности k_{2U} могут применяться пофазно управляемые источники реактивной мощности. График изменения потерь мощности на головном участке ГСТ приведён на рис. 6, *б*. Он свидетельствует о значительной вариабельности этого параметра, вызванной изменением нагрузок на

приёмном конце ГСТ. На рис. 7 представлены зависимости максимумов напряженности электромагнитного поля (ЭМП) на высоте 1,8 м от координаты Z оси, расположенной перпендикулярно ГСТ. Указанные зависимости рассчитаны для двух ситуаций: при наличии труб и при отсутствии МТ. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о значительном уровне экранирования электрического поля трубами. Для магнитного поля влияние труб проявляется в меньшей степени. Величины напряжённостей ЭМП не превышают допустимых значений.



а) *б*)

Рис. 2. Поперечное сечение ГСТ (*а*) и координаты токоведущих частей

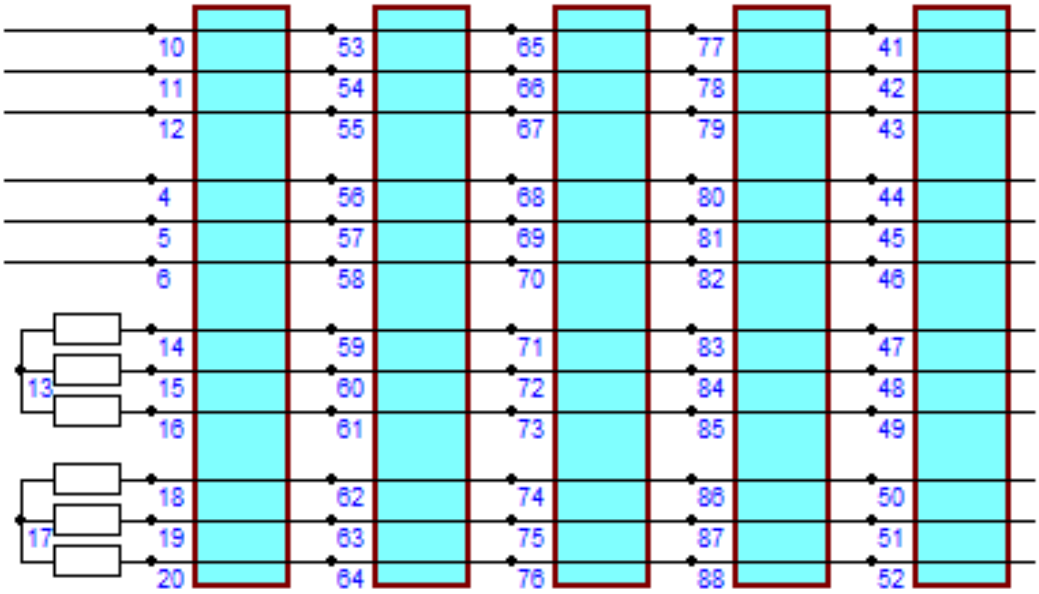


Рис. 3. Часть схемы расчётной модели

На рис. 8 представлены результаты определения тепловых режимов трансформаторов, питающих ГСТ. Представленные данные иллюстрируют возможность проведения комплексного моделирования систем электроснабжения, построенных с использованием гибких симметричных токопроводов. Из них видно, что температуры наиболее нагретых точек не превышают допустимых значений.

На рис. 9 и 10 приведены результаты определения электромагнитных влияний ГСТ на расположенные вблизи него трубопроводы. На рис. 9, *а* показаны зависимости НН, вычисленных в точке с координатой $x = 0$, от времени (рис. 1), а на рис. 9, *б* графики максимумов НН как функции этой координаты. Так как трубы смонтированы на высоте 9 м, то допустимая величина НН должна приниматься на основе правил безопасности для ЛЭП равной 20 В. Использование значения 60 В [27] для труб, проложенных на земле, в данном случае не допустимо.

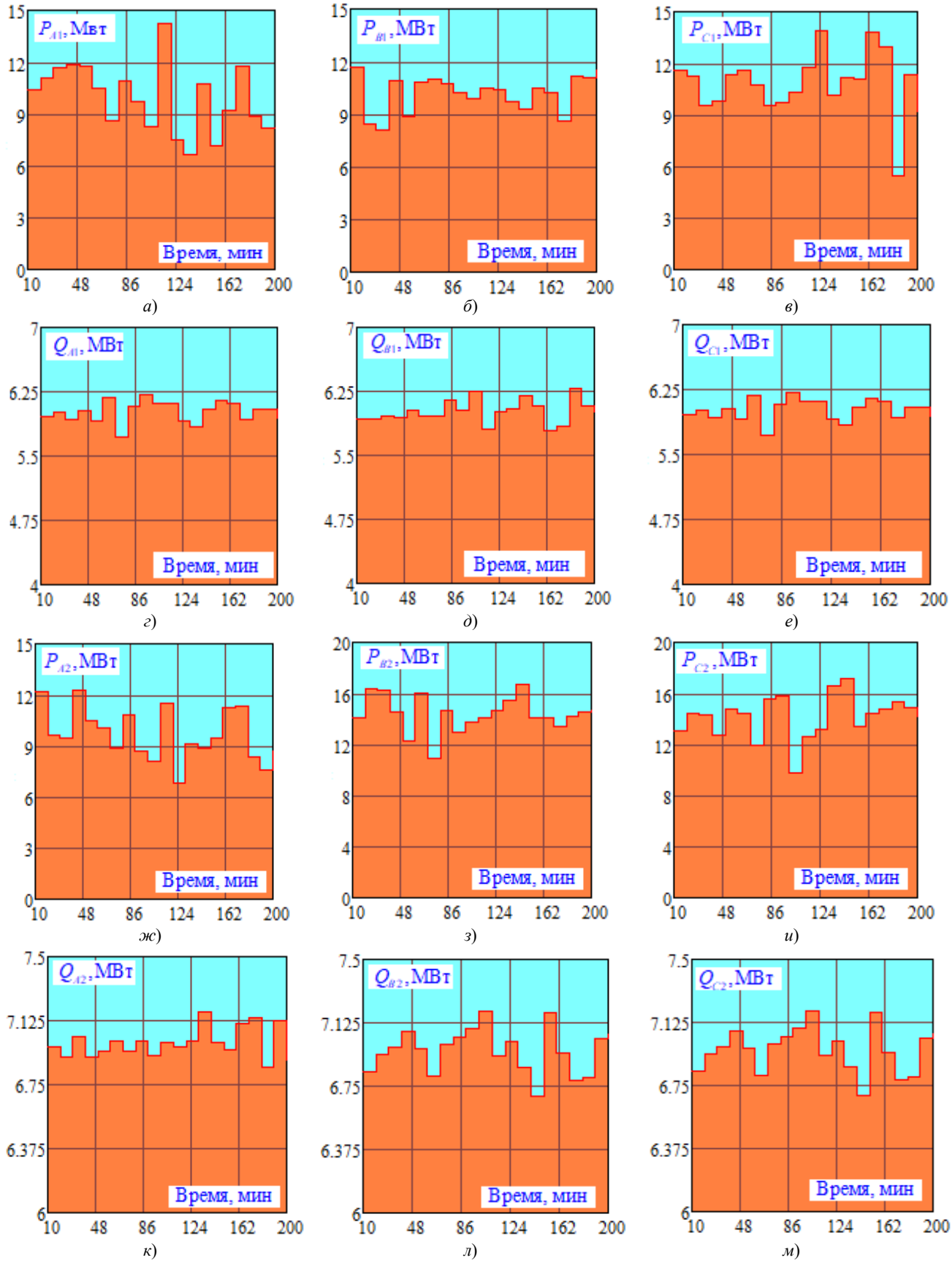
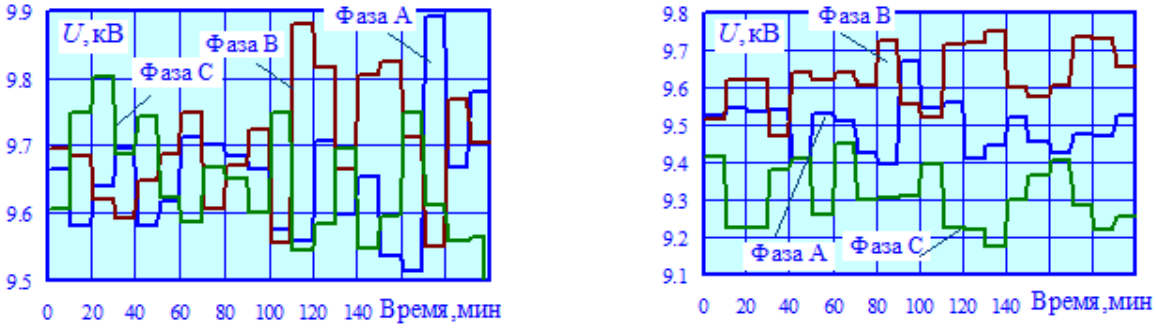
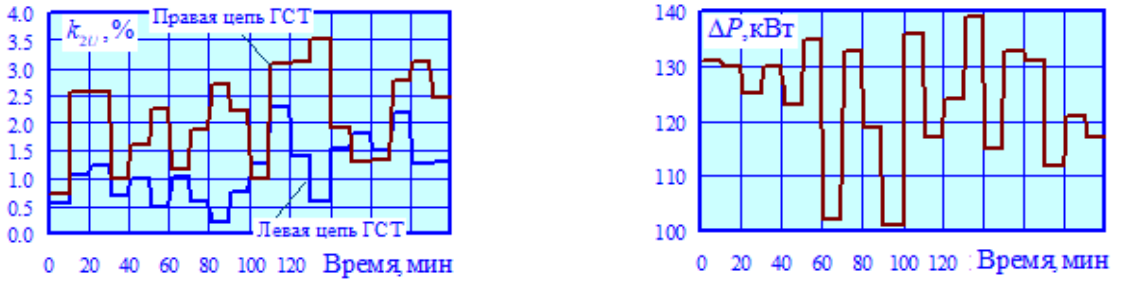


Рис. 4. Графики активных (*а, б, в, ж, з, и*) и реактивных (*г, д, е, к, л, м*) нагрузок



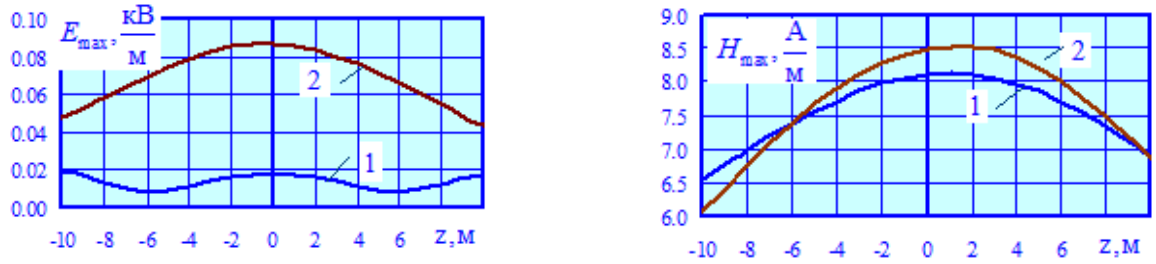
а) *б*)

Рис. 5. Напряжения на приёмном конце ГСТ



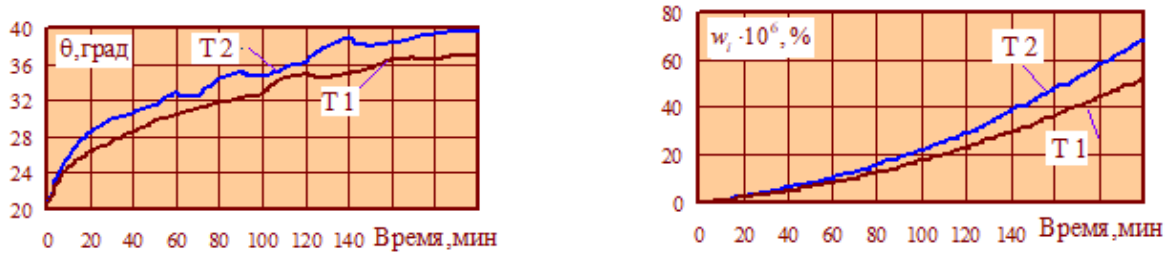
а) *б*)

Рис. 6. Несимметрия на приёмном конце ГСТ (*а*) и потери на головном участке токопровода (*б*)



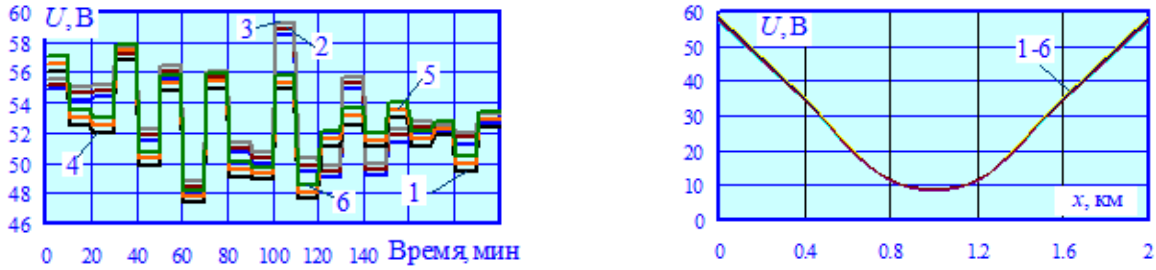
а) *б*)

Рис. 7. Максимальные значения амплитуд напряжённостей электрического (*а*) и магнитного (*б*) полей на приёмном участке ГСТ: 1 – при наличии труб; 2 – при отсутствии МТ



а) *б*)

Рис. 8. Температуры наиболее нагретых точек трансформаторов (*а*) и тепловой износ изоляции (*б*)



а) *б*)

Рис. 9. Напряжения на трубах в точке с координатой $x = 0$: *а* – зависимости $U = U(t)$; *б* – зависимости $U_{max} = U_{max}(x)$; цифрами обозначены номера труб по рис. 1

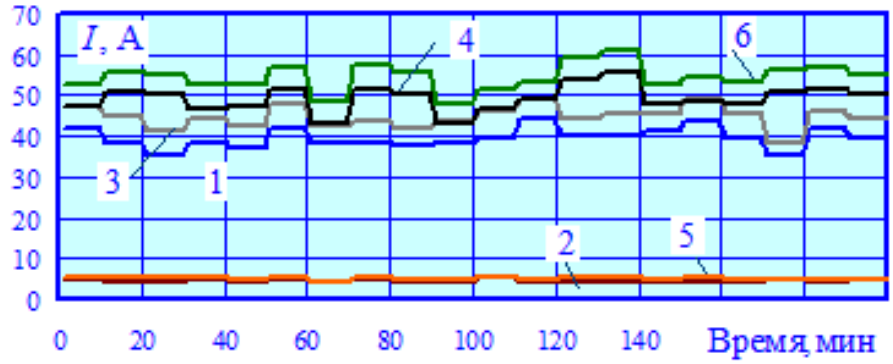
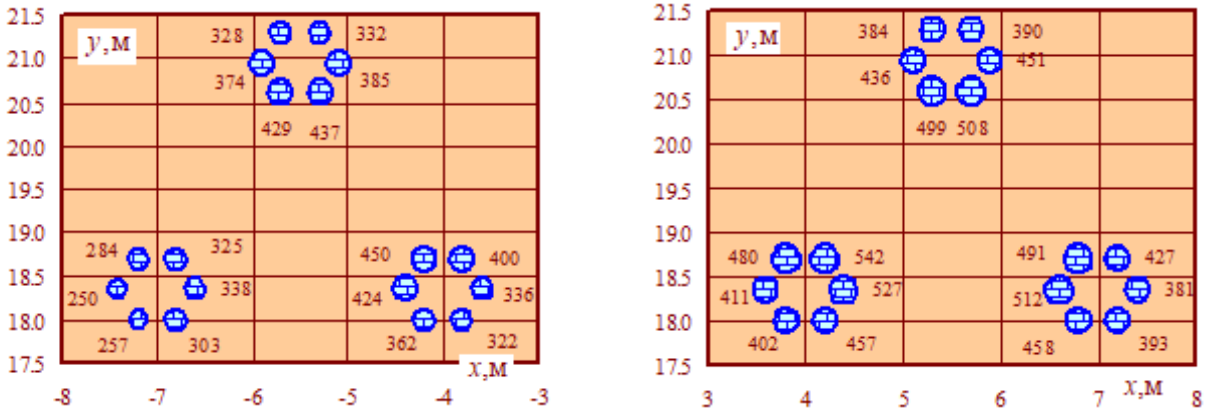


Рис. 10. Токи, протекающие по трубам: цифрами обозначены номера труб по рис. 1

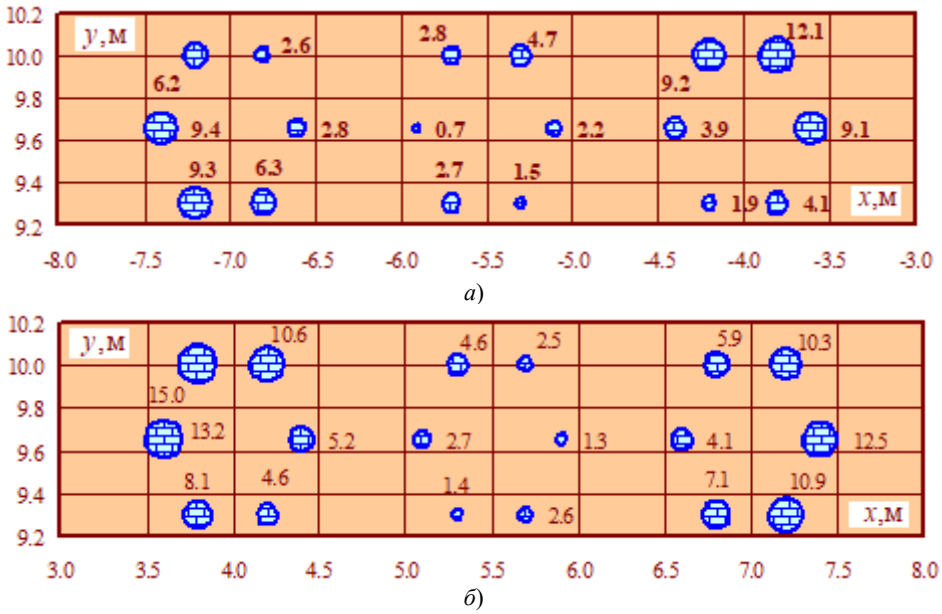
Из рис. 9, *б* видно, что величины НН на значительной длине трассы МТ превышают 20 В. Для их снижения можно использовать современные средства в виде активных компенсаторов НН, а также устанавливать дополнительные заземления путем соединения труб с заземленными опорами эстакады. На рис. 10 показаны зависимости токов, протекающих по трубам, от времени. Они показывают, что по отдельным трубам протекают токи, превышающие 40 А, что может негативно сказываться на работе устройств электрохимической защиты при их наличии.

На рис. 11 показаны диаграммы, характеризующие распределение токов по проводам ГСТ. Из него видно, что токи лежат в пределах от 250 до 542 А и не превышают допустимых значений по нагреву. Распределение токов по окружностям труб показано рис. 12, из которого видно, что токи распределяются по поверхности МТ неравномерно.



а) *б*)

Рис. 11. Распределение токов пор проводам ГСТ: *а* – левая цепь; *б* – правая цепь; цифрами указаны величины токов в амперах



а)

б)

Рис. 12. Распределение токов по элементарным проводникам, имитирующим трубы: цифрами указаны величины токов

Заключение. Разработаны методы, алгоритмы и компьютерные модели, обеспечивающие проведение расчётов НН на металлических трубах, проложенных на эстакаде совместно с многоамперной линией электропередачи в виде гибкого симметричного токопровода. Модели реализованы в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC. На основе проведённого моделирования установлено, что уровни НН значительно превышают допустимую величину в 20 В для труб, смонтированных на высоте. Для их снижения можно использовать современные средства в виде активных компенсаторов НН. Предложенный подход к определению электромагнитных влияний ГСТ на протяжённые металлические конструкции отличается комплексностью и универсальностью. Он позволяет моделировать токопроводы различного конструктивного исполнения, гибкие и жёсткие, выполненные на основе шин различного профиля. В результате моделирования получена детальная картина распределения токов по окружности труб, что даёт возможность точного анализа вопросов электромагнитной совместимости ГСТ и МТ.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

Литература

1. Соловьев Д.Ю., Анчарова Т.А. Внедрение литых токопроводов в СЭС промышленного предприятия // Фёдоровские чтения – 2019. 2019. С. 234–238.
2. Соловьев Д.Ю., Сабайкин Н.А., Конюшенко Е.В. Применение литых токопроводов марок ТПЛА/ТКЛС при проектировании системы электроснабжения промышленных предприятий // Наука. технологии. инновации. Новосибирск, 2019. С. 46–50.
3. Савина Н.В. Оценка сопротивления токопроводов энергоемких предприятий при несинусоидальности и несимметрии в сети // Известия Российской академии наук. Энергетика. № 4. 2008. С. 63–68.
4. Машрапов Б.Е., Мусаев Ж.Б., Талипов О.М. Определение экраниранирующих свойств оболочки пофазно-экранированного токопровода // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. 2022. № 1. 2022. С. 121–130.
5. Мамонтов А.Н., Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Тепловизионный контроль токопроводов промышленных агрегатов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 8. С. 111–118.
6. Распределение электрического поля внутри коаксиальных токопроводов 110 кВ с твердой изоляцией / Д.И. Ковалев, В.Н. Вариводов, Д.В. Голубев [и др.] // Электротехника. № 8. 2022. С. 2–6.
7. Шульга Р.Н. Электродинамика токопроводов при коротких замыканиях // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 5. 2023. С. 48–57.
8. Шульга Р.Н Термическая стойкость экранированных токопроводов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 6. 2023. С. 27–35.
9. Твердохлеб А.П., Угольникова А.Е., Угольников А.В. Принципы мониторинга и контроля частичных разрядов в пофазно-экранированных токопроводах // Уральская горная школа - регионам. материалы Международной научно-практической конференции, в рамках Уральской горно-промышленной декады. Екатеринбург, 2024. С. 154–155.
10. Голубев Д.В., Ковалев Д.И., Елфимов С.А. Разработка тепловой модели токопровода с полимерно-газовой изоляцией для передачи электроэнергии оффшорных ветроустановок // Энергетические системы. № 3. 2022. С. 36–47.
11. Развитие систем изоляции применительно к высоковольтным токопроводам с твердой изоляцией / Д.И. Ковалев, В.Н. Вариводов, Д.В. Голубев [и др.] // Электротехника. № 4. 2021. С. 6-14.
12. Учёт электродинамического действия токов короткого замыкания при проектировании гибких токопроводов 6−10 кВ систем электроснабжения / И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко, Е.Г. Пономаренко, Б.Д. Цемехман [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. № 5. 2005. С. 21–28.
13. Петренко В.Н., Селиверстов Г.И. Трехфазный гибкий токопровод переменного тока компактной конструкции // Современные проблемы машиноведения : мат-лы науч.-техн. конф., научные чтения, посвящённые 105 годовщине со дня рождения Павла Осиповича Сухого. Гомель, 2000. С. 131–134.
14. Бладыко Ю.В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учётом конструктивных элементов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Т. 61. № 3.2018. С. 220–234.
15. Бладыко Ю.В. Механический расчет гибких токопроводов с сосредоточенными нагрузками // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Т. 63. № 2. 2020. С. 103–115.
16. Численное исследование распределения магнитного поля в токопроводах с твёрдой изоляцией напряжением 10 кВ / Голубев Д.В., Ковалев Д.И., Вариводов В.Н. [и др.] // Электротехника. № 8. 2023. С. 38–42.
17. Вихарев А.П. Методика расчёта длительно допустимого тока токопроводов с литой изоляцией // Электрические станции. № 4 (1053). 2019. С. 32–36.
18. Farhana Mohamad Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak, M. Husaini and S. Masri. «Investigation of electromagnetic force during short-circuit test in three-phase busbar system» 2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering, Penang, Malaysia, 2011, pp. 340–344, doi: 10.1109/CHUSER.2011.6163747.
19. Z. Piątek, T. Szczegielniak, D. Kusiak and P. Jabłoński "Magnetic field of a shielded three-phase busbar system" 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2015, pp. 146–148, doi: 10.1109/CPEE.2015.7333361.
20. F.M. Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak and S. Masri "Study on the electromagnetic force affected by short-circuit current in vertical and horizontal arrangement of busbar system" International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE), Kuantan, Malaysia, 2011, pp. 196–200, doi: 10.1109/INECCE.2011.5953875.
21. C. Viswanatha and K.G. Rakesh "Investigation of epoxy coated Busbar system enclosed in LT busduct of rating 2000A" 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584207.
22. M. Muhammood, M. Kamarol, D. Ishak and S. Masri "Temperature rise prediction in 3-phase busbar system at 20 °C ambient temperature" 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, Malaysia, 2012, pp. 736–740, doi: 10.1109/PECon.2012.6450313.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск. 2005. 273 с.

24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с.
25. Крюков А.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Иркутск: ИрГУПС, 2022. 189 с.
26. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Соколов В.Ю. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами. Иркутск: ИрГУПС. 2010. 84 с.
27. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. 80 p.

References

1. Soloviev D.Yu., Ancharova T.A. Implementation of Cast Busducts in the Power Supply Systems of an Industrial Enterprise // Fyodorovskie Readings - 2019. 2019. pp. 234–238.
2. Soloviev D.Yu., Sabaikin N.A., Konyushenko E.V. Use of Cast Busducts of the TPLA/TKLS Brands in the Design of Power Supply Systems of Industrial Enterprises // Science. Technologies. Innovations. Novosibirsk, 2019. pp. 46–50.
3. Savina N.V. Evaluation of the Resistance of Busducts of Energy-Intensive Enterprises with Non-Sinusoidality and Asymmetry in the Network // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. No. 4. 2008. pp. 63–68.
4. Mashrapov B.E., Musaev Zh.B., Talipov O.M. Determination of the shielding properties of the sheath of a phase-shielded busduct // Bulletin of Toraigyrov University. Power engineering series. 2022. No. 1.2022. Pp. 121–130.
5. Mamontov A.N., Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A. Thermal imaging inspection of industrial unit busducts // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. Pp. 111–118.
6. Distribution of the electric field inside 110 kV coaxial busducts with solid insulation / D.I. Kovalev, V.N. Varivodov, D.V. Golubev [et al.] // Electrical engineering. No. 8. 2022. Pp. 2–6.
7. Shulga R.N. Electrodynamics of Busducts during Short Circuits // Electrical Equipment: Operation and Repair. No. 5. 2023. Pp. 48-57.
8. Shulga R.N. Thermal Stability of Shielded Busducts // Electrical Equipment: Operation and Repair. No. 6. 2023. Pp. 27–35.
9. Tverdokhleb A.P., Ugolnikova A.E., Ugolnikov A.V. Principles of Monitoring and Control of Partial Discharges in Phase-Shielded Busducts // Ural Mining School – to the Regions. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, within the Framework of the Ural Mining Decade. Ekaterinburg, 2024. Pp. 154–155.
10. Golubev D.V., Kovalev D.I., Elfimov S.A. Development of a Thermal Model of a Busduct with Polymer-Gas Insulation for the Transmission of Electric Power from Offshore Wind Turbines // Power Systems. No. 3. 2022. Pp. 36–47.
11. Development of Insulation Systems Applied to High-Voltage Busducts with Solid Insulation / D.I. Kovalev, V.N. Varivodov, D.V. Golubev [et al.] // Electrical Engineering. No. 4. 2021. Pp. 6–14.
12. Taking into account the electrodynamic effect of short-circuit currents in the design of flexible busducts for 6–10 kV power supply systems / I.I. Sergey, Yu.V. Bladyko, E.G. Ponomarenko, B.D. Tsemekhman [et al.] // Power Engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. No. 5. 2005. Pp. 21–28.
13. Petrenko V.N., Seliverstov G.I. Three-phase flexible AC busduct of compact design // Modern problems of mechanical engineering. Proceedings of the scientific and technical conference, scientific readings dedicated to the 105th anniversary of the birth of Pavel Osipovich Sukhoi. Gomel, 2000. Pp. 131–134.
14. Bladyko Yu.V. Mechanical Calculation of Flexible Busducts When Replacing a Concentrated Load with a Distributed Load Taking into Account Structural Elements // Power Engineering. News of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS. Vol. 61. No. 3.2018. Pp. 220–234.
15. Bladyko Yu.V. Mechanical Calculation of Flexible Busducts with Concentrated Loads // Power Engineering. News of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS. Vol. 63, No. 2, 2020, pp. 103–115.
16. Numerical Study of Magnetic Field Distribution in 10 kV Busducts with Solid Insulation / Golubev D.V., Kovalev D.I., Varivodov V.N. [et al.] // Electrical Engineering. No. 8, 2023, pp. 38–42.
17. Vikharev A.P. Methodology for Calculating the Long-Term Permissible Current of Busducts with Cast Insulation // Electric Power Plants. No. 4 (1053). 2019. pp. 32–36.
18. Farhana Mohamad Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak, M. Husaini and S. Masri "Investigation of electromagnetic force during short-circuit test in three-phase busbar system" 2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering, Penang, Malaysia, 2011, pp. 340–344, doi: 10.1109/CHUSER.2011.6163747.
19. Z. Piątek, T. Szczegielniak, D. Kusiak and P. Jabłoński "Magnetic field of a shielded three-phase busbar system" 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2015, pp. 146–148, doi: 10.1109/CPEE.2015.7333361.
20. F.M. Yusop, M.K.M. Jamil, D. Ishak and S. Masri, "Study on the electromagnetic force affected by short-circuit current in vertical and horizontal arrangement of busbar system" International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE), Kuantan, Malaysia, 2011, pp. 196–200, doi: 10.1109/INECCE.2011.5953875.
21. C. Viswanatha and K.G. Rakesh "Investigation of epoxy coated Busbar system enclosed in LT busduct of rating 2000A" 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584207.
22. M. Muhammood, M. Kamarol, D. Ishak and S. Masri, "Temperature rise prediction in 3-phase busbar system at 20 °C ambient temperature", 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, Malaysia, 2012, pp. 736–740, doi: 10.1109/PECon.2012.6450313.
23. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk. 2005. 273 p.
24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates. Moscow: Direct-Media, 2023. 156 p.
25. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modeling of electromagnetic influences of power transmission lines and traction networks on extended metal structures. Irkutsk: 2022. 189 p.
26. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Sokolov V.Yu. Modeling of power supply systems with powerful busbars. Irkutsk, 2010. 84 p.
27. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. 80 p.