

Научная статья
УДК 621.316
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.004

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ВЛ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ольга Валерьевна Залесова

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, o.zalesova@ksc.ru*

Аннотация

Статья посвящена вопросу изменения интенсивности электромагнитного влияния контактной сети переменного тока на отключённую линию электропередачи высокого напряжения в результате модернизации участка железной дороги. Построены расчётные модели тяговой сети переменного тока и линии электропередачи в программе АТР-ЕМТР. Проведено сравнение результатов расчётов влияния контактной сети одно- и двухпутного участков железной дороги переменного тока.

Ключевые слова:

линия электропередачи высокого напряжения, электрифицированная железная дорога переменного тока, контактная сеть, наведённое напряжение

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Залесова О. В. Прогнозирование влияния электромагнитного поля контактной сети модернизированного участка Октябрьской железной дороги на ВЛ высокого напряжения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 39–48. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.004.

Original article

FORECASTING THE INFLUENCE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE MODERNIZED SECTION OVERHEAD CONTACT SYSTEM OF OKTYABRSKAYA RAILWAY ON THE HV OVERHEAD LINES

Olga V. Zalesova

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, o.zalesova@ksc.ru*

Abstract

The article is devoted to the issue of changing the intensity of the electromagnetic influence of the AC overhead contact system on the disconnected HV transmission line as a result of the modernization of the railway section. Calculation models of AC traction network and power transmission line are built in the ATP-EMTP program. The comparison of the results of calculations of the induced voltage on the disconnected transmission line caused by the influence of the AC overhead contact system of a single- and double-track sections of an AC current railway is carried out.

Keywords:

HV transmission line, AC electric railway, overhead contact system, induced voltage

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Zalesova O. V. Forecasting the influence of the electromagnetic field of the modernized section overhead contact system of Oktyabrskaya railway on the HV overhead lines // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 39–48. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.004.

Введение

В настоящее время провозная способность железнодорожных подходов к Мурманскому транспортному узлу (МТУ) составляет порядка 20–25 млн т в год. На участке Петрозаводск —

Мурманск она практически исчерпана [1]. Это обстоятельство не позволяет Мурманскому порту, который является самой большой погрузочно-разгрузочной компанией Арктического бассейна России, привлекать новые крупные грузопотоки, однако к 2025 г. объём пропуска угля и нефтеналивных грузов планируется увеличить до 45 млн т в год [2]. И такие цифры неслучайны. На западном берегу Кольского залива началось строительство морского порта Лавна — нового угольного терминала, который ПАО «Государственная транспортная лизинговая компания» рассматривает на возможность перевалки генеральных грузов в контейнерах [3], его строительство планируют завершить к концу 2023 г.

Рост экспортного потенциала Мурманского транспортного узла потребует серьёзного укрепления его железнодорожной составляющей. Согласно проекту «Комплексного развития МТУ», участок железной дороги от Волховстроя до Мурманска должен стать двухпутным [1]. В рамках данного проекта на Октябрьской железной дороге предстоит построить вторые главные пути на семи участках и выполнить реконструкции двенадцати станций. На сегодняшний день идет активное строительство на участке Оленегорск — Мурманск, протяжённость пути составит 106 км [2, 3].

Расширение инфраструктуры железной дороги приведёт к изменению электромагнитной обстановки между тяговой сетью и смежными протяжёнными проводниками. Значительные перемены произошли ещё в 2001 г., когда был осуществлён перевод участка Лоухи — Мурманск с постоянного на переменный ток. В результате это позволило сократить потери электроэнергии, решить проблему электрокоррозии на подземных коммуникациях, упростить тяговые подстанции по наличию силового оборудования, увеличить расстояния между тяговыми подстанциями (были ликвидированы станции стыкования), а также показало ряд других преимуществ модификации данного участка [4, 5]. Но, с другой стороны, новая система тягового электроснабжения, электрифицированная на переменном токе, стала источником значительного электромагнитного влияния из-за работы выпрямительно-инверторных агрегатов, установленных на тяговых подстанциях и электроподвижных составах [6].

В настоящей статье с помощью программного моделирования исследуется электромагнитное влияние, оказываемое тяговой сетью модернизированного в ближайшем будущем двухпутного участка Октябрьской железной дороги, на примере одной из смежных воздушных линий (ВЛ) класса напряжения 110 кВ, а также проводится сравнение результатов расчётов с подобными значениями, полученными при влиянии действующего по настоящее время однопутного участка железной дороги.

Схема питания контактной сети переменного тока с постом секционирования

Надёжность и экономичность работы контактной сети определяется схемой питания и секционирования. Разделение контактной сети на электрически не связанные друг с другом участки (секции) необходимо также для удобства её обслуживания при эксплуатации и выполнении ремонтных работ в случае аварийных ситуаций. Для этой цели применяют воздушные промежутки (изолирующие сопряжения анкерных участков), нейтральные вставки и секционные изоляторы. Рельсовый путь, в отличие от контактной сети, не секционируется.

С позиции работы тяговых подстанций различают схемы с одно- и двусторонним питанием контактной сети. В первом случае нагрузка на определённом участке железной дороги получает питание только от одной тяговой подстанции, во втором — питание осуществляется от двух электроустановок одновременно. Как правило, на дорогах переменного тока, в том числе и на Октябрьской магистрали, используют схему двустороннего питания (исключения могут встречаться на конечных участках или на небольших ответвлениях от основной магистрали). В этом случае участок контактной сети с обеих сторон поочерёдно подключается к одной и той же фазе (А или В), рельсы — к фазе С. Данная схема получила широкое распространение по ряду причин: она имеет более равномерную загрузку тяговых подстанций и контактной сети во времени, снижает потери напряжения и потери энергии в контактной сети, обеспечивает более надёжное питание тяговых нагрузок в случае аварийного режима, а также за счёт протекания меньших токов в контактной сети и рельсах снижает электромагнитное влияние на смежные протяжённые проводники [7].

Увеличение числа путей на однопутном участке Октябрьской железной дороги приведёт к изменению действующей схемы, в частности, необходимо будет учитывать схему соединения контактных подвесок смежных путей. Существуют три типа питания контактных подвесок: раздельная, узловая и параллельная. В первом случае работа контактных подвесок организована независимо друг от друга, во втором — в средней части фидерной зоны их соединяют с помощью поста секционирования, где контактная сеть каждого пути разделяется воздушными промежутками, в третьем, помимо поста секционирования, добавляют переключки (пункты параллельного соединения).

В настоящем исследовании в качестве основы для модели модернизированного двухпутного участка была принята узловая схема питания контактных подвесок. Известно, что при переводе с постоянного на переменный ток на данном участке был установлен пост секционирования производства НИИЭФА [4]. Схемы питания контактной сети одно- и двухпутного участков, по которым проводились расчёты, представлены на рис. 1.

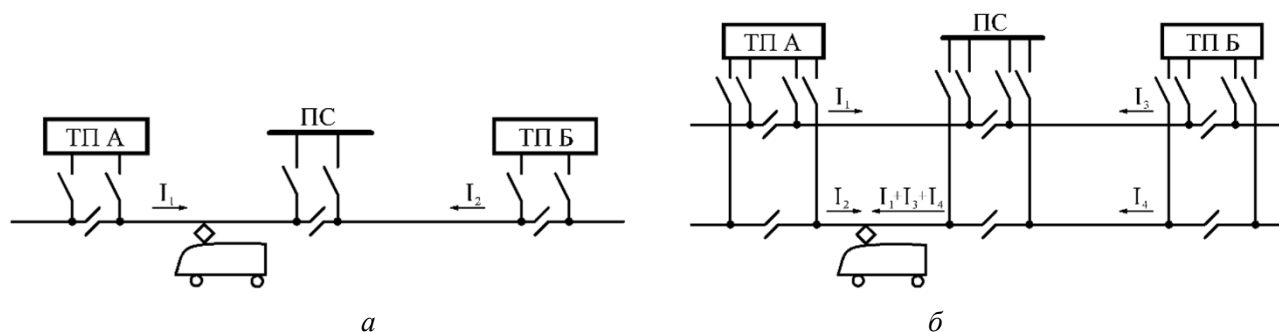


Рис. 1. Схема двустороннего питания контактной сети с постом секционирования одно- (а) и двухпутного (б) участков железной дороги

Fig. 1. Scheme of a two-way power supply of a contact network with a sectioning post а) a single-track section of the railway, б) a double-track section of the railway

Располагая такими исходными данными, как грузопоток, количество и типы электроподвижных составов, их местоположение на межподстанционной зоне (межпоездные интервалы), расчёты электроснабжения участков железных дорог можем выполнить, используя следующие методы: подвижных нагрузок, равномерного распределения нагрузки, имитационного моделирования, метод Розенфельда или метод Маркварда. Все они выполняются без учёта графика движения поездов и подходят для расчётов на дальнюю перспективу.

Поскольку описание расчёта тягового тока в контактной подвеске двухпутного участка с узловой схемой питания контактной сети уже было представлено в работе [8] и существующие методы расчёта подробно изложены во многих литературных источниках, например, [7, 9, 10 и др.], то в настоящей работе акцента на этом вопросе не делается. Единственный момент, который следует отметить, — это то, что ток в проводах контактных подвесок путей распределяется пропорционально расстояниям от питающих подстанций до электровоза и распределение нагрузки между фидерами никак не зависит ни от схемы соединения рельсовой сети, ни от её сопротивления.

Физические и геометрические параметры исследуемых объектов

Участок железной дороги, на котором прокладываются вторые пути, достаточно хорошо изучен с точки зрения характера и возможной интенсивности электромагнитного влияния, оказываемого его контактной сетью на смежные проводники (сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН экспериментальные исследования проводились в 2008 и 2011 гг.). Поэтому было справедливо для нового исследования с учётом модернизации инфраструктуры объекта остановить выбор непосредственно на нём.

На тяговых подстанциях, с которых осуществляется питание участка, установлены по два тяговых трёхфазных трансформатора типа ТДТНЖ — 40 МВА/110 кВ, один из них резервный. При переводе участка Лоухи — Мурманск с постоянного на переменный ток было принято сохранить

существующую в то время контактную подвеску (марка проводов и тросов контактной сети — М-120 + 2МФ-100) [4]. Такое решение было обусловлено возможностью оставить установившуюся за много лет регулировку контактной сети (ее ветроустойчивость) и, как следствие, избежать значительных затрат на ее реконструкцию.

Длина участка железной дороги составляет 73 км. На всём своём протяжении он соседствует с одноцепными воздушными линиями электропередачи класса напряжения 110 кВ. Оценка наведённого напряжения проводилась для одной из таких ВЛ длиной 19,5 км с преобладающим типом опор ПБ-29 и маркой проводов ВЛ — АС-185.

Схема расположения проводов тягового электроснабжения участка железной дороги и проводов ВЛ в разрезе изображена на рис. 2. При модернизации действующего участка добавляется второй путь (на схеме он обозначен опорой, расположенной слева). Физические характеристики и параметры проводов исследуемых объектов представлены в таблице.

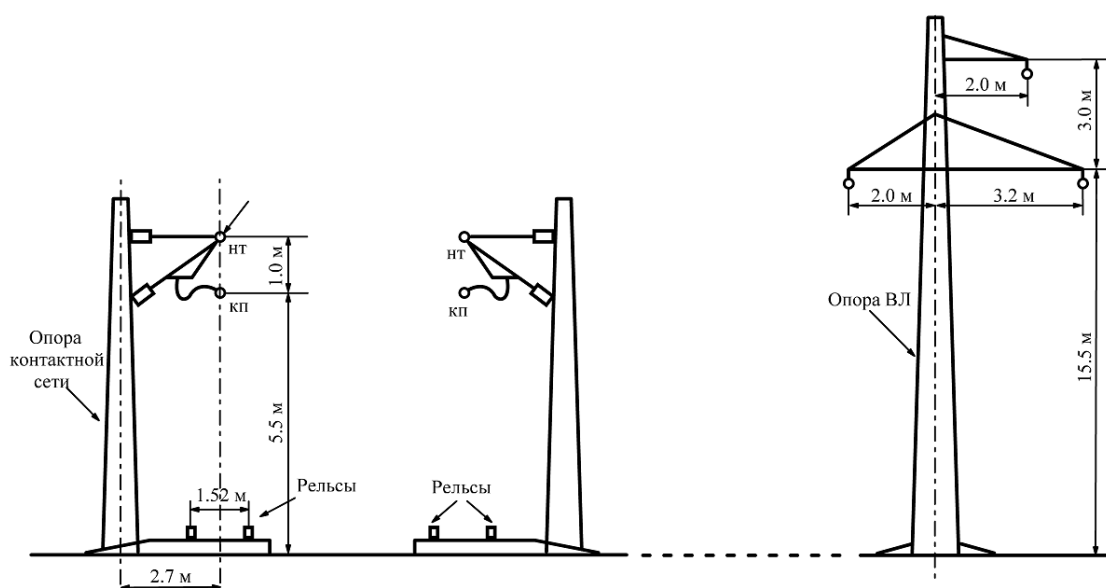


Рис. 2. Схема расположения проводов тягового электроснабжения и проводов ВЛ
Fig. 2. The scheme of location of wires of the traction power supply and the power line

Параметры проводов тяговой сети и ВЛ Wires parameters of the traction network and the overhead power line

Параметр	Свойства			
	Контактный провод	Несущий трос	Рельс	Провод ВЛ
Тип провода	ФМ-100	М-120	Р65	АС-150/24
Радиус провода, см	0,6	0,7	5,1	0,86
Сопротивление постоянному току, Ом/км	0,176	0,156	0,13	0,194

Исходя из геометрических параметров участок сближения (взаимное расположение) железной дороги и ВЛ делится на две практически равных части: первая имеет протяжённость 9,7 км и ширину сближения 910 м, вторая — 9,8 км и 480 м соответственно. Для второго пути ширина сближения увеличивается на 10 м. Разность величин последнего параметра объясняется заменой косоугольного сближения параллельным — по рекомендациям, приведённым в источниках [7, 11]. Схема параллельного сближения трасс объектов представлена на рис. 3.

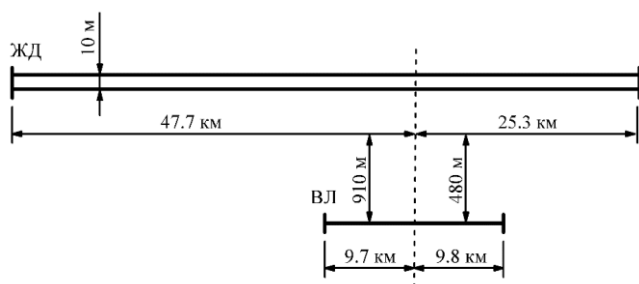


Рис. 3. Типовая схема взаимного расположения трасс участка ЖД и ВЛ

Fig. 3. Typical scheme of the relative position of the tracks of the railway section and power line

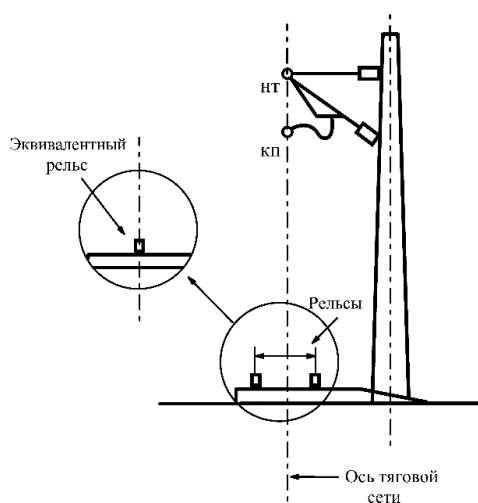


Рис. 4. Схема перехода к эквивалентному рельсу

Fig. 4. Transition scheme to an equivalent rail

Расчёты наведённого напряжения на ВЛ выполнялись при различных нагрузках на участке. Расстояния между составами, находящимися на одном пути, составляли 7 км в соответствии с минимальным значением межпоездного интервала в 6 мин и средней скорости поезда, равной 70 км/ч. Ток, питающий один ЭПС, задавался равным 250 А, ВЛ была отключена и заземлена только по концам на подстанциях, сопротивление заземляющих устройств подстанций принималось равным 0,5 Ом.

Необходимо также отметить, что исследование проводилось на местности, расположенной в Арктической зоне, для которой характерны грунты с низкой проводимостью. В расчётных моделях величина удельного сопротивления грунта задавалась 1000 Ом·м.

Результаты и анализ расчётов

Расчёты наведённого напряжения на исследуемой ВЛ ранее уже выполнялись при различных схемах заземления [5]. И как показали многочисленные исследования влияния контактной сети железной дороги переменного тока, максимальные значения наведённого напряжения на смежной отключённой линии наблюдались в момент прохождения ЭПС середины участка сближения (место ремонта на линии располагалось напротив ЭПС).

Поскольку в настоящей работе решалась задача определения изменения электромагнитного влияния контактной сети после модернизации железнодорожного участка, то в исследовании использовалась только одна схема заземления ВЛ — по концам. Вначале были рассмотрены случаи влияния, равные по возможности размещения нагрузки для обоих вариантов исполнения участка. Результаты расчётов наведённого напряжения на ВЛ представлены в виде графиков на рис. 6.

Модели тяговой сети железной дороги и ВЛ

Создание расчётных моделей с одно- и двухпутными участками для исследования интенсивности наведённого напряжения на отключённой ВЛ выполнялось в программе АТР-ЕМТР. Для удобства задания параметров тяговой сети в программе было принято два рельса одного пути заменить одним эквивалентным, расположенным на оси тяговой сети, параллельно контактному проводу и несущему тросу (рис. 4). В источнике [9] подробно изложен метод определения эквивалентного сопротивления и радиуса поперечного сечения рельса.

Модели разбивались на участки в зависимости от численности электроподвижных составов (ЭПС) и их размещения на межподстанционной зоне, а также геометрии сближения исследуемых объектов. Если ранее в [5] распределение тока в тяговой сети в расчётной модели осуществлялось с помощью источника переменного тока и переходного сопротивления рельс — земля таким образом, что половина обратного тягового тока возвращалась на подстанции через землю, то сейчас применён комплекс сопротивлений, позволяющий более точно определять соотношение этих величин. В качестве примера на рис. 5 представлены схемы действующего и модернизированного участков с расположенной вблизи воздушной линии при наличии трёх ЭПС.

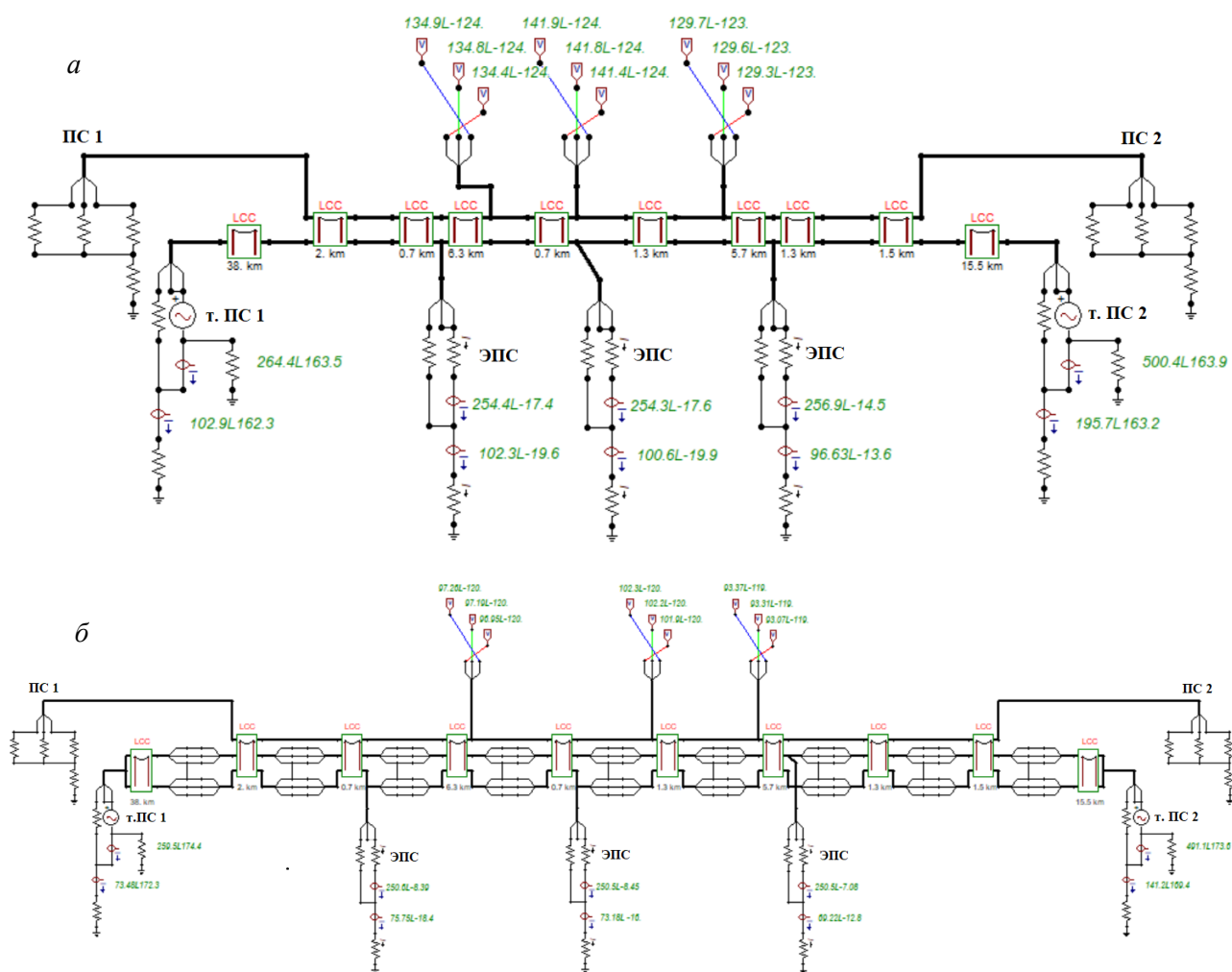


Рис. 5. Модель тяговой сети одно- (а) и двухпутного (б) участков железной дороги и ВЛ

Fig. 5. Model of the traction network of the single-track railway (a) and double-track railway (b) section and the overhead line

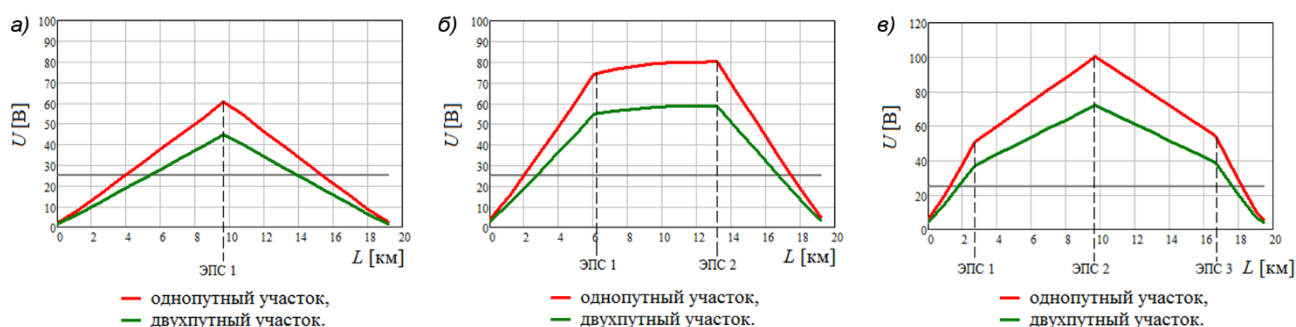


Рис. 6. Распределение наведённого напряжения на ВЛ для случаев: один (а), два (б) и три (в) ЭПС на участке

Fig. 6. The distribution of the induced voltage on the power line for the cases: a) one locomotive is located on the railway section, б) two locomotives are located on the railway section, в) three locomotives are located on the railway section

Из результатов расчётов можно видеть, что значения наведённого напряжения на всём протяжении линии во всех трёх случаях разнятся в 1,4 раза для исследуемых моделей участков.

Уменьшение уровня электромагнитного влияния, вызванного контактной сетью двухпутного участка, объясняется в данном случае понижением сопротивления рельсовой сети практически в два раза по сравнению с однопутным участком за счёт рельсов вторых путей, тем самым увеличивается коэффициент защитного действия рельса и снижается интенсивность стекания тока в землю. Однако если использовать возможности увеличения нагрузки на уже модернизированном участке железной дороги, то картина распределения наведённого напряжения на линии может выглядеть следующим образом (рис. 7).

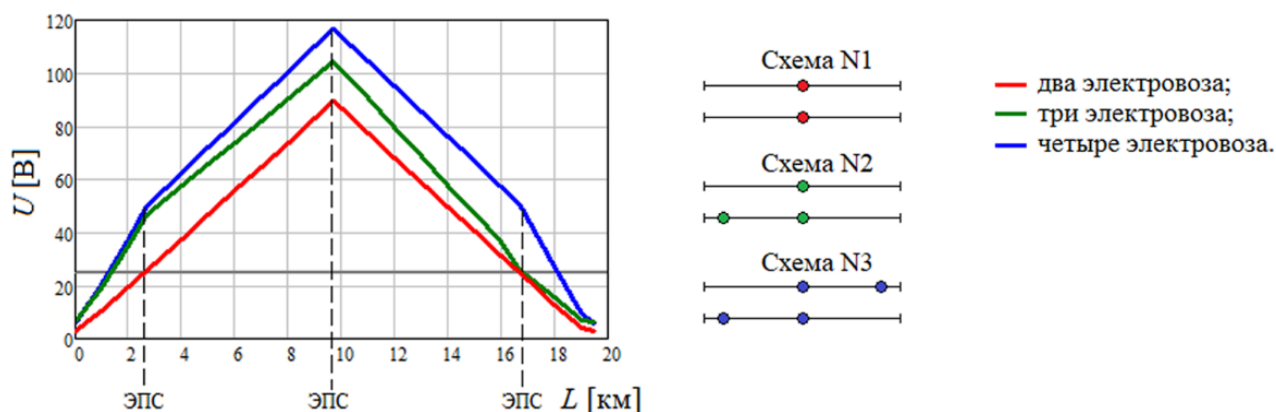


Рис. 7. Распределение наведённого напряжения на ВЛ, вызванное электромагнитным влиянием двухпутного участка железной дороги

Fig. 7. Distribution of the induced voltage on the power line caused by the electromagnetic influence of the double-track section of the railway

Уровень наведённого напряжения зависит от численности ЭПС, их дислокации на участке и в определённый момент может превысить порог значений, полученных при влиянии однопутного участка, исходя из ограничивающих возможностей по нагрузке последнего.

Выводы

Исследование показало, что уровень наведённого напряжения на отключённой и заземлённой по концам воздушной линии электропередачи при равных нагрузках на одно- и двухпутном участках в 1,4 раза будет меньше в случае последнего. Однако с учетом пропускной способности двухпутного участка уровень наведённого напряжения существенно возрастает при увеличении численности ЭПС на дистанции. Оценить интенсивность электромагнитного воздействия контактной сети железной дороги, электрифицированной на переменном токе, на выведенную в ремонт ВЛ достаточно затруднительно, из-за большого количества влияющих факторов, некоторые из которых являются переменной величиной. Помимо этого, электромагнитная обстановка на ремонтируемой ВЛ может зависеть также от других источников электромагнитного влияния, например, от проходящих вблизи (в одном коридоре) других линий высокого напряжения.

Список источников

1. Михайлов А. Пропускная способность железнодорожной инфраструктуры в Заполярье вырастет // Российская газета — Экономика Северо-Запада. 2020. 10 ноября. № 252 (8306). URL: <https://rg.ru/2020/11/10/reg-szfo/propusknaia-sposobnost-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-v-zapoliare-vyrastet.html> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Саблин В. Пути ведут в порт // Гудок. 2020. 11 марта. № 42 (26891). URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1496960&archive=2020.03.11> (дата обращения: 15.05.2023).
3. Рагозин В. «Лавной» займётся новый подрядчик // Мурманский вестник. 2021. 21 июля. URL: <https://www.mvestnik.ru/politics/lavnoj-zajmetsya-novyy-podryadchik/> (дата обращения: 15.05.2023).

4. Перевод участка Лоухи — Мурманск на переменный ток // Евразия Вести. 2007. № IV. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publ1=2007-04a07> (дата обращения: 15.05.2023).
5. Залесова О. В., Колобов В. В., Ефимов Б. В. Расчёт наведённого напряжения на отключённых линиях электропередачи, вызванных влиянием контактной сети железной дороги, с помощью программы ATP-EMTP // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 12 (35). С. 48–56.
6. Zalesova O. V. Program Complex for Estimation of Inducted Voltage on De-energized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020. doi:10.1109/fareastcon50210.2020.9271494.
7. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
8. Залесова О. В., Прокопчук П. И. Распределение тяговых токов в контактной сети двухпутного участка железной дороги // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 8 (34). С. 67–71.
9. Тер-Оганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. 432 с.
10. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС, 2002. 638 с.
11. Костенко М. В. Влияние электрических сетей высокого напряжения на техно- и биосферу. Л.: Изд-во ЛПИ, 1984. 56 с.

References

1. Mikhaylov A. Propusknaya sposobnost' zheleznodorozhnoy infrastruktury v Zapolyar'e vyrastet [The capacity of the railway infrastructure in the Arctic will increase]. *Rossiyskaya gazeta — Ekonomika Severo-Zapada* [The Russian newspaper — Economy of the NorthWest], 2020, No. 252 (8306), November 10th. (In Russ.). Available at: <https://rg.ru/2020/11/10/reg-szfo/propusknaia-sposobnost-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-v-zapoliare-vyrastet.html> (accessed 15.05.2023).
2. Sablin V. Puti vedut v port [The paths lead to the port]. *Gudok* [The beep], 2020, No. 42 (26891), March 11th. (In Russ.). Available at: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1496960&archive=2020.03.11> (accessed 15.05.2023).
3. Ragozin V. “Lavnoy” займётся новый подрядчик [“Lavna” will be handled by a new contractor]. *Murmanskiy vestnik* [The Murmansk bulletin], 2021, July 21. (In Russ.). Available at: <https://www.mvestnik.ru/politics/lavnoj-zajmetsya-novyy-podryadchik/> (accessed 15.05.2023).
4. Perevod uchastka Loukhi – Murmansk na peremennyy tok [Transfer of the Loukhi — Murmansk section to alternating current]. *Evrasiya Vesti* [Eurasia News], 2007, No. IV. (In Russ.). Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publ1=2007-04a07> (accessed 15.05.2023).
5. Zalesova O. V., Kolobov V. V., Efimov B. V. Raschyot navedyonnoogo napryazheniya na otklyuchyonnykh liniyakh elektroperedachi, vyzvannykh vliyaniem kontaktnoy seti zheleznoy dorogi, s pomoshch'yu programmy ATP-EMTP [Calculation of induced voltage in disconnected transmission lines caused by electromagnetic influence of railway overhead contact system using program ATP-EMTP]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2016, No. 12 (35), pp. 48–56. (In Russ.).
6. Zalesova O. V. Program Complex for Estimation of Inducted Voltage on De-energized Transmission Lines caused by Electromagnetic Influence of AC Railway System. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020, doi:10.1109/fareastcon50210.2020.9271494.
7. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Electricity supply of electrified railways]. Moscow, Transport, 1982, 528 p. (In Russ.).
8. Zalesova O. V., Prokopchuk P. I. Raspredelenie tyagovykh tokov v kontaktnoy seti dvukhpутного uchastka zheleznoy dorogi [Traction currents distribution in overhead contact system of railway double-track]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Scientific Centre of the RAS], 2015, No. 8 (34), pp. 67–71. (In Russ.).

9. Ter-Oganov E. V., Pyshkin A. A. *Elektrosnabzhenie zheleznikh dorog* [Railway electricity supply]. Ekaterinburg, USURT, 2014, 432 p.
10. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместimost'* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, EMC MR, 2002, 638 p.
11. Kostenko M. V. *Vliyanie elektricheskikh setey vysokogo napryazheniya na tekhn- i biosferu* [The influence of high-voltage electric grids on the techno- and biosphere]. Leningrad, LPI, 1984, 56 p.

Информация об авторе

О. В. Залесова — кандидат технических наук, научный сотрудник.

Information about the author

O. V. Zalesova — PhD (Engineering), Researcher.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.
The article was submitted 10.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.