

Моделирование электромагнитного влияния контактной сети железной дороги на отключенные воздушные линии электропередачи с помощью программы АТР-ЕМТР

Проведено экспериментальное и расчетное исследование наведенного напряжения на отключенной воздушной линии электропередачи, вызванной влиянием контактной сети железной дороги переменного тока. Методом теоретического исследования при выполнении расчетов наведенного напряжения являлось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялся программный комплекс АТР-ЕМТР, который позволяет моделировать линии электропередачи и тяговые сети железных дорог на основе их физических параметров с учетом изменения геометрии взаимного расположения и производить расчеты при различных режимах заземления ремонтируемой линии. Исходными данными для расчетов являлись измеренные значения токов и напряжений тяговой сети. Экспериментальное исследование значений наведенного напряжения и токов в тяговой сети проводилось на отключенной воздушной линии электропередачи и на проходящем вблизи однопутном участке железной дороги переменного тока. Для расчетного исследования наведенного напряжения были построены модели сближения исследуемых объектов в двух вариантах: когда на влияющем участке железной дороги находятся один и два электроподвижных состава. Сравнение результатов расчетного и экспериментального исследований наведенного напряжения на линии в большинстве рассмотренных случаев показало незначительные проценты относительной погрешности расчетных значений (4–7%). Таким образом, результаты выполненного исследования позволяют рекомендовать программный комплекс АТР-ЕМТР для оценки уровня наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях электропередачи, имеющих участки сближения с электрифицированными железными дорогами, с возможностью задания максимальных рабочих токов во влияющей контактной сети.

Ключевые слова: электромагнитное влияние, воздушная линия электропередачи, железная дорога переменного тока, программа АТР-ЕМТР.

Введение

Тяговая сеть переменного тока 1×25 кВ является источником мощного электромагнитного поля, которое оказывает существенное влияние на смежные линии различного назначения, в том числе и на расположенные вблизи воздушные линии электропередачи (ВЛЭП).

Влияние электромагнитного поля удобно рассматривать как два отдельных влияния: магнитное и электрическое. Магнитная составляющая в настоящем случае обусловлена наведением электродвижущей силы (ЭДС) в замкнутых контурах при пересечении их переменным магнитным полем, которое создает ток, протекающий в проводах тяговой сети. Значения наведенных ЭДС и токов прямо пропорциональны значениям тяговых токов и длине участка сближения между железной дорогой и смежной ЛЭП [1].

Электрическая составляющая определяется соотношением собственных и взаимных частичных емкостей между всеми проводниками системы. В связи с тем, что взаимная емкость быстро уменьшается с увеличением ширины сближения при относительно невысоком питающем напряжении на железной дороге переменного тока (27.5 кВ), эта составляющая имеет второстепенное значение [2].

Нагрузка тяговых подстанций постоянно изменяется в зависимости от того, сколько электроподвижных составов (ЭПС) находится в данный момент на межподстанционной зоне, их местоположения относительно подстанций, потребляемых ими токов, наличия в тяговой сети уравнивающих токов и прочих условий. Таким образом, на практике измерение наведенных напряжений на отключенных ВЛЭП при максимальном рабочем токе в контактной сети, как того требуют "Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок"¹ (ПОТЭУ)¹, практически невыполнимо. Поэтому для обеспечения безопасности работы персонала на отключенных ВЛЭП, имеющих участки сближения с электрифицированной железной дорогой, следует учитывать результаты расчетных исследований, выполненных с исходными данными, которые максимально приближены к реальным условиям рассматриваемой задачи.

Целью данной работы являлась оценка значений наведенного напряжения на отключенной ВЛЭП с помощью расчетных моделей, выполненных в программе АТР-ЕМТР, а также сравнение полученных результатов с экспериментальными значениями наведенного напряжения на исследуемой линии.

¹ Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок : приказ Минтруда России от 24 июля 2013 г. № 328н : с изм. на 19 фев. 2016 г. // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации : офиц. сайт. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499037306>.

В связи с этим решались следующие задачи: выполнение экспериментального определения токов в тяговой сети однопутного участка железной дороги переменного тока и наведенных напряжений на смежной отключенной ВЛЭП; создание расчетной модели сближения исследуемых объектов и оценки значений наведенного напряжения на отключенной линии в программе АТР-ЕМТР.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана ВЛЭП класса напряжения 110 кВ, на всем протяжении имеющая сближение с однопутным участком железной дороги переменного тока промышленной частоты напряжением 25 кВ.

Электропитание влияющего участка железной дороги двустороннее и производится от тяговых подстанций т. ПС № 1 и т. ПС № 2 (рис. 1). Длина участка составляет 73 км. Длина линии – 19.7 км. Преобладающим типом опор, на которых установлена линия, являются опоры типа ПБ110-13 от ПС № 1 на протяжении 10.5 км линии и опоры типа – П (деревянные) на другом участке линии, заканчивающемся на ПС № 2.

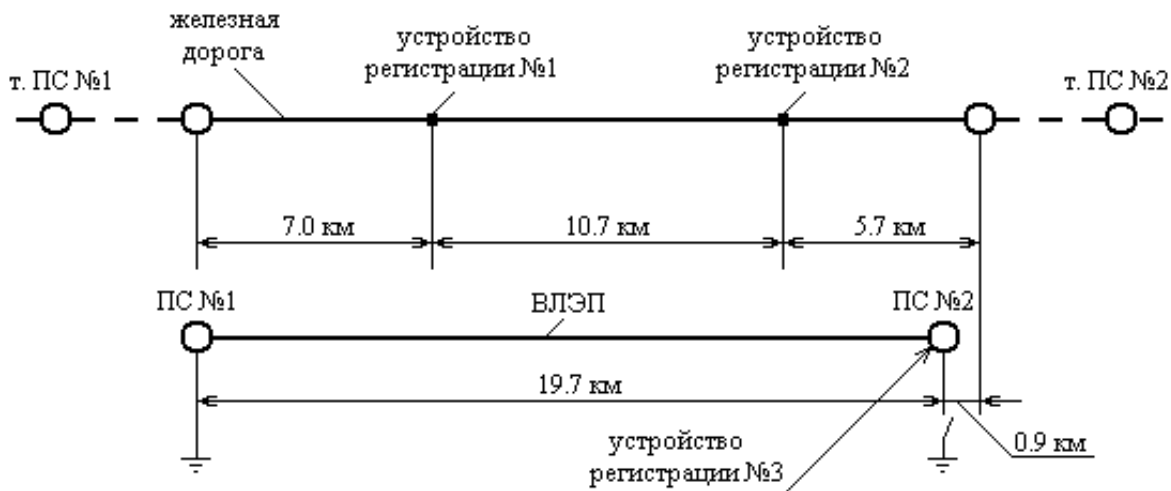


Рис. 1. Схема сближения ВЛЭП с влияющим участком железной дороги

Fig. 1. Convergence scheme of overhead transmission line with influencing area of railway

Ширина сближения между исследуемыми объектами при косом сближении ВЛЭП и тяговой сети железной дороги определялась по методике приведения к эквивалентному параллельному сближению, описанной в [3]. Расстояние эквивалентного параллельного сближения вычислялось по формуле:

$$b_{12} \approx \frac{b_{\max} + 2b_{\min}}{3},$$

где b_{\max} , b_{\min} – максимальное и минимальное расстояния между проводами тяговой сети (контактный провод, питающий провод и рельсы) и ВЛЭП соответственно. Таким образом, ширина сближения на первом участке (от начала линии ПС № 1 до места, соответствующего расположению устройства регистрации № 2) получилась равной 0.98 км и на втором участке (продолжение линии) – 1.8 км.

Измерения наведенных напряжений на ВЛЭП проводились одновременно с измерениями тока в рельсовой цепи. Для непрерывной регистрации изменяющихся токов в рельсах при прохождении составов по дистанции применялась система мониторинга, включающая в себя магнитоиндукционный датчик тока с усилителем, аналого-цифровой преобразователь и портативный компьютер [4]. Регистрация токов выполнялась синхронно в двух различных точках исследуемого участка железной дороги (рис. 1). Измерение наведенного напряжения проводилось устройством регистрации № 3 на изолированном конце отключенной линии на подстанции № 2, со стороны подстанции № 1 линия была заземлена.

Из полученных экспериментальных данных были выбраны и обработаны осциллограммы токов, потребляемых ЭПС, и наведенных напряжений для двух случаев, когда на влияющем участке железной дороги находились один и два состава. В первом случае состав проходил устройство регистрации № 2. Во втором случае первый состав проходил устройство регистрации № 1 и одновременно с ним второй состав – устройство регистрации № 2. Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица. Действующие значения тяговых токов и наведенных напряжений на ВЛЭП
Table. The effective values of traction return current and induced voltage on overhead transmission line

№ опыта	Один ЭПС на участке железной дороги			Два ЭПС на участке железной дороги				
	Тип ЭПС	Ток ЭПС $I_{эл}$, А	Наведение напряжение на ПС № 2 $U_{нав}$, В	Тип ЭПС	Ток ЭПС № 1 $I_{эл1}$, А	Тип ЭПС	Ток ЭПС № 2 $I_{эл2}$, А	Наведение напряжение на ПС № 2 $U_{нав}$, В
1	Пасс. (на юг)	118.9	60.8	Товарный (на юг)	51.5	Товарный (на юг)	90.0	44.6
2	Пасс. (на юг)	90.9	49.9	Товарный (на север)	99.5	Товарный (на юг)	98.3	57.4
3	Пасс. (на сев.)	132.5	68.3	Товарный (на север)	58.3	Пасс. (на север)	109.9	55.7
4	Товарный (на юг)	135.7	65.8	Товарный (на юг)	45.7	Электровоз (на юг)	46.5	25.0
5	Товарный (на юг)	148.5	74.6	Товарный (на юг)	35.2	Товарный (на север)	80.5	42.3
6	Товарный (на юг)	190.0	96.9	Товарный (на юг)	57.0	Товарный (на юг)	80.7	41.6
7	Товарный (на юг)	53.9	29.1	Пасс. (на юг)	80.0	Пасс. (на север)	107.6	58.3
8	Товарный (на сев.)	46.0	23.2	Товарный (на юг)	121.7	Товарный (на север)	73.9	45.1
9	Товарный (на юг)	91.5	48.5	Товарный (на север)	69.7	Товарный (на север)	30.0	16.5
10	Товарный (на юг)	69.0	34.7	Товарный (на север)	135.8	Пасс. (на север)	134.2	76.7
11	Товарный (на юг)	81.8	40.3	Товарный (на север)	143.3	Товарный (на юг)	153.5	86.8
12	Товарный (на юг)	72.4	39.1	Товарный (на север)	136.4	Пасс. (на север)	125.3	67.5
13	Товарный (на юг)	45.4	23.6	Товарный (на север)	153.8	Товарный (на юг)	103.6	61.7
14	Товарный (на юг)	43.8	23.1	Товарный (на юг)	78.9	Товарный (на юг)	122.6	66.4
15	Пасс. (на юг)	65.3	34.8	Пасс. (на юг)	46.8	Товарный (на юг)	140.3	71.5
16	Пасс. (на юг)	134.7	69.6	Товарный (на юг)	77.5	Товарный (на север)	104.6	53.2
17	Пасс. (на север)	132.6	66.5	Товарный (на юг)	115.7	Товарный (на юг)	95.5	56.9
18	Пасс. (на север)	34.8	18.0	Товарный (на север)	113.3	Товарный (на юг)	129.9	73.2
19	Пасс. (на север)	126.2	61.7	Товарный (на север)	107.3	Товарный (на север)	137.8	78.4
20	Товарный (на север)	145.1	77.2	Товарный (на север)	66.4	Пасс. (на север)	65.5	35.9

Известно, что обратный тяговый ток возвращается на подстанции по рельсам и частично через землю, поэтому в качестве токов, потребляемых ЭПС, принимались значения измеренных токов в моменты времени, непосредственно предшествующие прохождению состава над измерительным датчиком и следующие сразу после его прохождения [2]. Поскольку датчики в эти моменты фиксировали значения полных тяговых токов, поступающих к ЭПС с разных сторон от тяговых подстанций.

Моделирование электромагнитного влияния контактной сети железной дороги на отключенную ВЛЭП в программе АТР-ЕМТР

Для расчета значений наведенного напряжения на отключенной линии использовался модуль LCC программного комплекса АТР-ЕМТР [5], который позволяет моделировать линии электропередачи и тяговые сети железных дорог на основе их физических параметров с учетом изменения геометрии взаимного расположения и производить расчеты при различных режимах заземления ремонтируемой линии, задавая максимальные значения токов во влияющей сети.

Модели электромагнитного влияния контактной сети на смежные линии были построены для двух рассматриваемых случаев: когда на влияющем участке железной дороги движется один и два ЭПС. В первом случае модель состояла из четырех участков, два из которых являлись сближением линии с контактной сетью, их длины составили 14.8 км и 4.9 км в соответствии со схемой сближения исследуемых объектов, месторасположение электровоза совпадало с концом второго участка (рис. 2). Аналогичная модель влияния была построена для второго случая, она состояла уже из трех участков сближения длинами 6.0, 8.8 и 4.9 км (рис. 3). В последнем случае местоположение первого электровоза совпадало с концом второго участка модели, а второго электровоза – с концом третьего участка.

При подготовке исходных данных модели учитывались следующие параметры:

- ширина сближения между влияющими проводами контактной сети, рельсами и ремонтируемой линией (РЛ);
- взаимное расположение фазных проводов на опорах РЛ (транспозиции, однократные перестановки двух фаз);
- конструктивный тип опор РЛ и контактной сети.

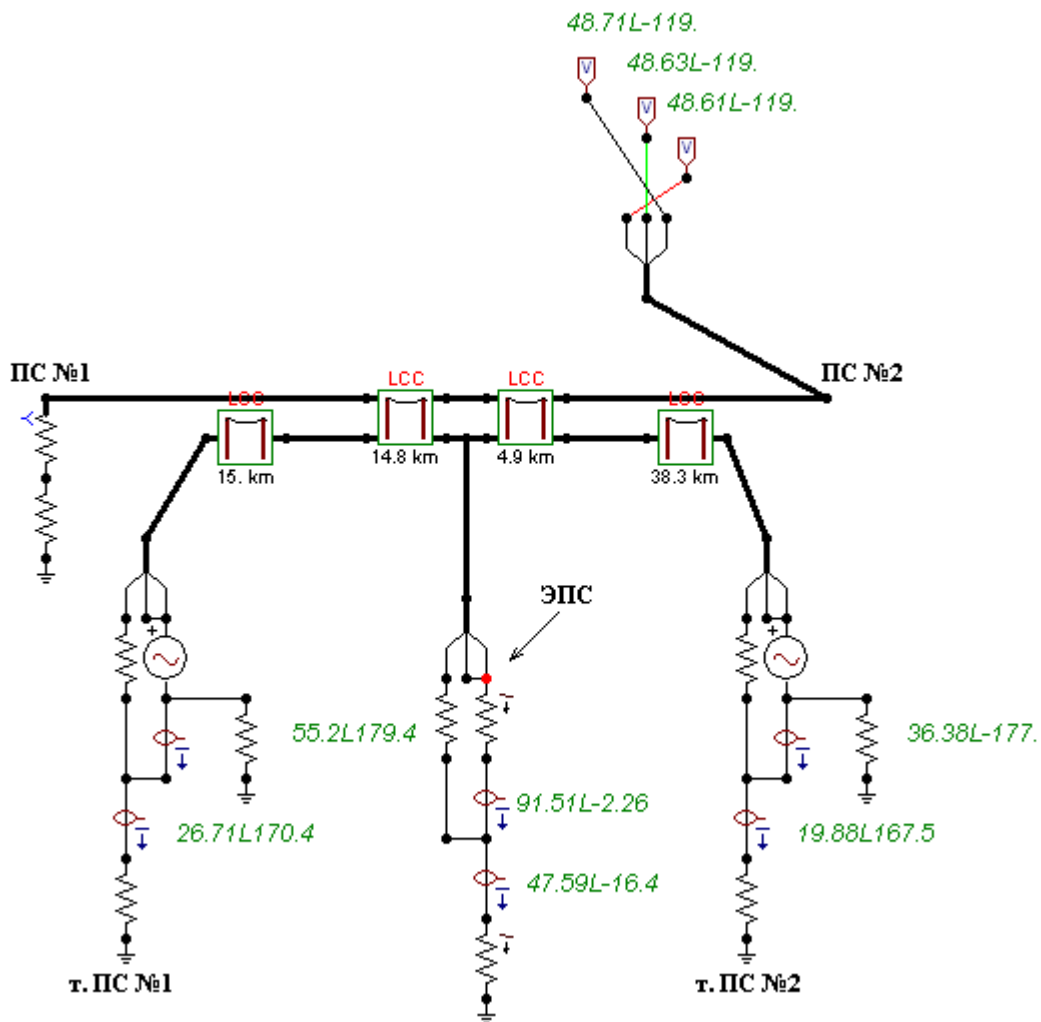


Рис. 2. Модель электромагнитного влияния контактной сети на ВЛЭП (один ЭПС)
 Fig. 2. The model of electromagnetic influence of the overhead contact system on the overhead transmission line (one train)

Сопротивление заземляющих устройств подстанций принималось равным 0.5 Ом, удельное сопротивление грунта – 10 000 Ом·м.

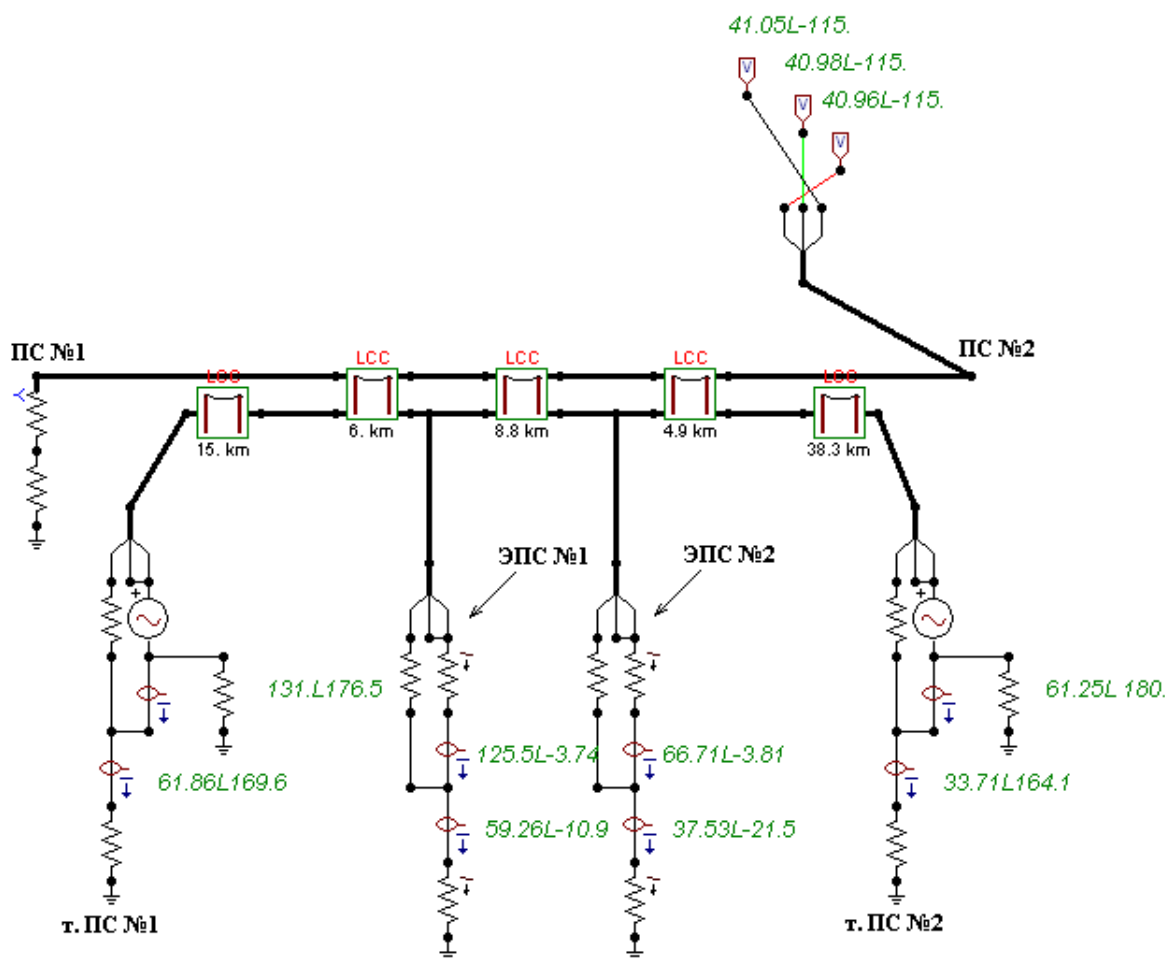


Рис. 3. Модель электромагнитного влияния контактной сети на ВЛЭП (два ЭПС)
 Fig. 3. The model of electromagnetic influence of the overhead contact system on the overhead transmission line (two trains)

При двухстороннем питании участка железной дороги ЭПС получает энергию от двух тяговых подстанций и ток, потребляемый электровозом, складывается из двух составляющих, величины которых обратно пропорциональны расстоянию от электровоза до соответствующей тяговой подстанции (чем ближе к тяговой подстанции находится электровоз, тем большая часть тока поступает к нему от этой подстанции) [1]. В созданной модели распределение тягового тока в месте расположения электровоза задается с помощью R-элементов и часть обратного тока, стекающего в землю, определяется переходным сопротивлением рельсов – земля и составляет порядка 50 % от полного тока, потребляемого ЭПС.

Результаты и анализ расчетов

Расчеты наведенного напряжения на конце отключенной линии (со стороны ПС № 2) проводились по экспериментальным значениям токов, потребляемых ЭПС (табл.). Линия была заземлена только в РУ ПС № 1. Результаты расчетов по созданным моделям представлены в виде гистограмм на рис. 4 и 5.

Расчетный эксперимент показал, что значения наведенных напряжений, полученные с помощью программы АТР-ЕМТР, имеют в среднем погрешности относительно измеренных величин наведенного напряжения на отключенной линии для первой модели с одним ЭПС на влияющем участке железной дороги примерно 4 %, для второй модели с двумя ЭПС на влияющем участке железной дороги – 7 %.

Несмотря на то что для исследований наведенных напряжений был выбран наиболее простой вариант сближения линии с однопутным участком железной дороги, в некоторых опытах были выявлены относительные погрешности в пределах 10–15 %, но их также можно считать допустимыми, поскольку невозможно в расчетных моделях учесть многофакторность влияния контактной сети железной дороги переменного тока на проходящие вблизи смежные линии. Например, процесс распределения тягового тока между рельсами и землей, который

является достаточно сложным, поскольку величина тока в рельсах падает по мере приближения к середине участка, а значит и величина сопротивления рельсов по его длине изменяется [6].

Один ЭПС на участке железной дороги

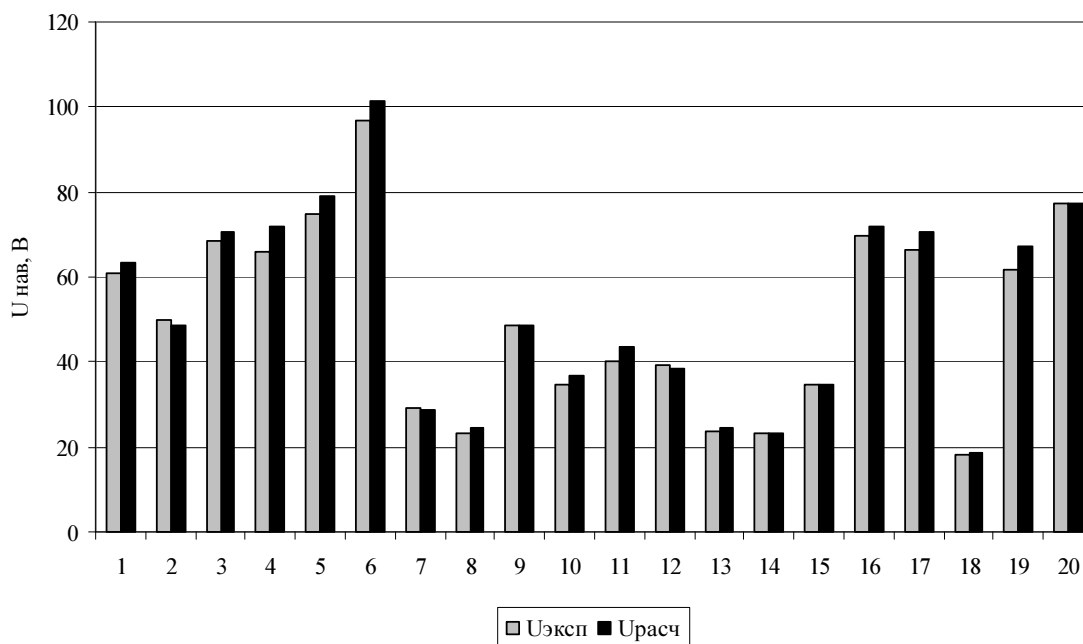


Рис. 4. Гистограмма наведенных напряжений на отключенной ВЛЭП (расчет по первой модели)
 Fig. 4. The histogram of induced voltage on disconnected transmission line (the calculation for the first model)

Два ЭПС на участке железной дороги

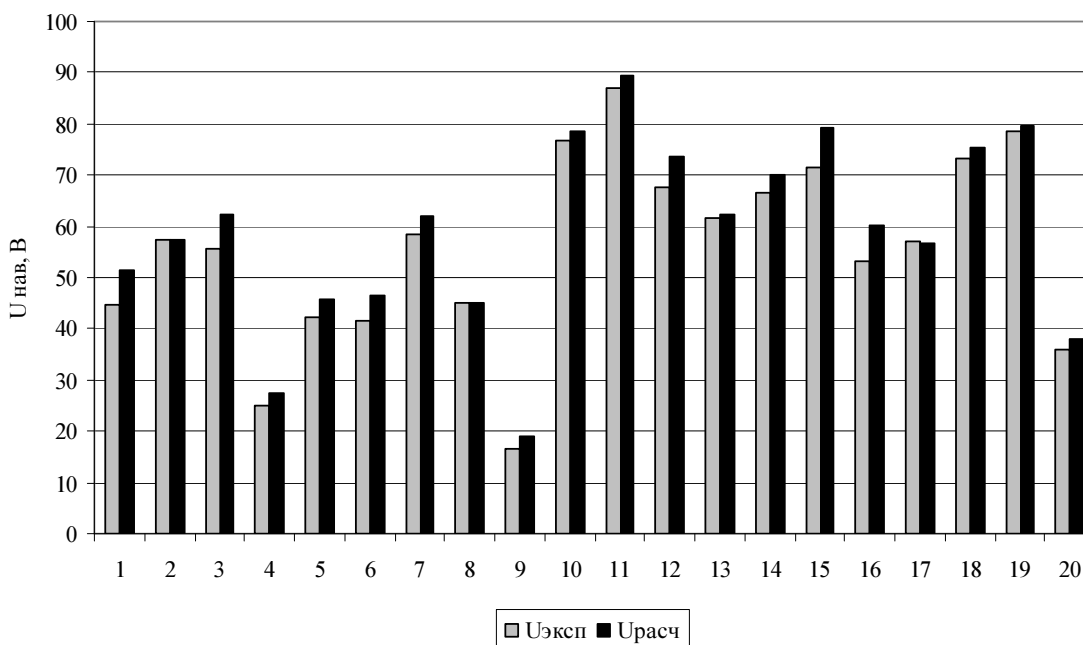


Рис. 5. Гистограмма наведенных напряжений на отключенной ВЛЭП (расчет по второй модели)
 Fig. 5. The histogram of induced voltage on disconnected transmission line (the calculation for the second model)

Заклучение

1. Построены расчетные модели электромагнитного влияния контактной сети железной дороги переменного тока на смежную ВЛЭП с помощью программы АТР-ЕМТР.

2. Проведены расчеты наведенного напряжения на отключенной воздушной линии класса напряжения 110 кВ для различных вариантов расположения электроподвижных составов на влияющем однопутном участке железной дороги с использованием экспериментальных значений тока в тяговой сети.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений наведенного напряжения на ВЛЭП в большинстве рассмотренных случаев показало незначительные проценты относительной погрешности расчетных значений (4–7 %). Поэтому способ оценки уровня наведенного напряжения, выполненного с помощью программы АТР-ЕМТР, можно рекомендовать при проведении ремонтных работ на линиях, имеющих участки сближения с электрифицированными железными дорогами, с возможностью задавать максимальные рабочие токи во влияющей контактной сети.

Библиографический список

1. Фрайфельд А. В., Марков А. С., Тюрнин Г. А. Устройство, монтаж и эксплуатация контактной сети / под ред. А. В. Фрайфельда. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Транспорт, 1974. 416 с.

2. Залесова О. В. Исследование уровня наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, находящейся в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 40–45.

3. Костенко М. В. Влияние электрических сетей высокого напряжения на техно- и биосферу. Л. : ЛПИ, 1984. 56 с.

4. Дроздова О. В., Якубович М. В. Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключенные линии электропередачи. Вестник МГТУ. 2010. Т. 13, № 4/2. С. 918–922.

5. Селиванов В. Н. Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе. Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 1. С. 107–112.

6. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. Ч. 2. Электромагнитная и гальваническая совместимость электрических ж.д. со смежными линиями. М. : МИИТ, 1998. 150 с.

References

1. Frayfeld A. V., Markov A. S., Tyurnin G. A. Ustroystvo, montazh i ekspluatatsiya kontaktnoy seti [The device and installation work and operation of a overhead contact system] / pod red. A. V. Frayfelda. 3-e izd., pererab. i dop. M. : Transport, 1974. 416 p.

2. Zalesova O. V. Issledovanie urovnya navedennogo napryazheniya na otklyuchennoy linii elektroperedachi, nahodyasheysya v zone vliyaniya tyagovoy seti zheleznoy dorogi peremennogo toka [Research of induced voltage on disconnected transmission line in the interference zone of AC railway] // Vestnik MGTU. 2014. V. 17, N 1. P. 40–45.

3. Kostenko M. V. Vliyanie elektricheskikh setey vysokogo napryazheniya na tehno- i biosferu [Influence of power networks of high voltage on the technological and the biosphere]. L. : LPI, 1984. 56 p.

4. Drozdova O. V., Yakubovich M. V. Issledovanie vliyaniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na otklyuchennye linii elektroperedachi [Research of influence of AC traction power system on the disconnected power lines]. Vestnik MGTU. 2010. V. 13, N 4/2. P. 918–922.

5. Selivanov V. N. Ispolzovanie programmy rascheta elektromagnitnyh perehodnyh protsessov ATP-EMTP v uchebnom protsesse [Use of electromagnetic transition processes calculation program ATP-EMTP in educational process]. Vestnik MGTU. 2009. V. 12, N 1. P. 107–112.

6. Bader M. P. Elektromagnitnaya sovmestimost. Chast 2. Elektromagnitnaya i galvanicheskaya sovmestimost elektricheskikh zh.d. so smezhnyimi liniyami [Electromagnetic compatibility. P. 2. Electromagnetic and galvanic compatibility of the electric railways with adjacent lines]. M. : MIIT, 1998. 150 p.

Сведения об авторе

Залесова Ольга Валерьевна – мкр Академгородок, 21 А, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: drozdova_nord@mail.ru

Zalesova O. V. – 21 A, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: drozdova_nord@mail.ru

O. V. Zalesova

**Simulation of electromagnetic influence of railway
overhead contact system on disconnected transmission lines
by the ATP-EMTP programme**

This paper is devoted to experimental and calculating research of induced voltage on disconnected transmission lines caused by the influence of AC railway overhead contact system. Theoretical researches have been carried out by means of mathematical modeling in the ATP-EMTP programme. The programme allows simulate the power lines and traction networks using their physical parameters taking into account changes of the mutual arrangement of geometry. The values of currents and voltage of a traction network have been used as input data for the researches. Experimental research of induced voltages and currents in the traction network has been performed on the overhead transmission line and single-track railway section located near. For the design study of the induced voltage the models of convergence of the objects in two versions have been constructed: when there are one and two rolling trains on the influencing railway section. In most cases comparing results of calculating and experimental researches of the induced voltage on the line examined has shown little relative accuracy of the calculated values (4–7 %). The research results allow us recommend the programme complex ATP-EMTP use to assess of induced voltage level on the disconnected overhead power lines having convergence sections with electrified railways with the possibility to use maximum dynamic current of inducted contact network.

Key words: electromagnetic influence, overhead transmission line, AC railway, ATP-EMTP programme.