

**Исследование уровня наведенного напряжения
на отключенной линии электропередачи, находящейся
в зоне влияния тяговой сети железной дороги переменного тока**

**Research of inducted voltage on disconnected transmission
line in the interference zone of AC railway**

Аннотация. В статье рассматривается электромагнитное влияние железной дороги переменного тока на отключенную линию электропередачи (ЛЭП). Представлены результаты экспериментальных исследований токов в рельсах и наведенного напряжения на отключенной линии. Выполнен анализ спектрального состава токов двух электровозов, одновременно проходящих по одному участку железной дороги. На основе экспериментальных данных, полученных при измерении токов, потребляемых электровозами, было рассчитано наведенное напряжение на отключенной линии электропередачи.

Abstract. The paper considers electromagnetic interference of the AC railway on a disconnected power line. The results of experimental researches of currents in rails and inducted voltage on the disconnected transmission line have been presented. The spectrum analysis of electric currents of two locomotives simultaneously moving along one railway section has been executed. The inducted voltage on a disconnected power line using experimental data of the current consumed by electric locomotives has been calculated.

Ключевые слова: тяговый ток, ток в рельсах, наведенное напряжение на отключенную ЛЭП

Key words: traction return current, current in the rails, inducted voltage on disconnected transmission line

1. Введение

Тяговая сеть железной дороги, электрифицированная на переменном токе (25 кВ), оказывает существенное электромагнитное влияние на смежные отключенные линии электропередачи. Уровень наведенного напряжения на отключенной ЛЭП может значительно превышать предельно допустимое значение, равное 25 В (*Межотраслевые правила...*, 2001), и в большей степени зависит от уровня гармоник тока, протекающего в сети, и его распределения между рельсами и землей.

Ток тяговой сети формируется в результате наложения собственных колебаний системы на основной ток, потребляемый выпрямительными электровозами (*Карякин*, 1987). Спектр основного тока действующей тяговой сети непрерывно изменяется, что объясняется непостоянством нагрузки на нее, зависящей от назначения состава (грузовой или пассажирский); количества вагонов; режима работы электровоза; числа электровозов на дистанции и их взаимного расположения.

2. Измерение тока в рельсах и наведенного напряжения на отключенной ЛЭП

В качестве экспериментальной модели для исследований было выбрано реальное сближение линии электропередачи класса 110 кВ с однопутным участком железной дороги дистанции Апатиты – Оленегорск в районе станций Хибины, Нефелиновые Пески и Имандра (рис. 1).

Электроподвижный состав, находящийся на участке, получает энергию от двух тяговых подстанций: ПС-14 (Апатиты) и ПС-12 (Оленегорск). Таким образом, потребляемый ток поступает к электровозу с двух сторон, складываясь из токов $I_{1кп}$ (апатитский ток) и $I_{2кп}$ (оленегорский ток) (рис. 2). Величины $I_{1кп}$ и $I_{2кп}$ обратно пропорциональны расстоянию от электровоза до соответствующей тяговой подстанции. Следовательно, чем ближе к тяговой подстанции находится электровоз, тем большая часть тока поступает к нему от этой подстанции (*Фрайфельд и др.*, 1974).

Регистрация тока в рельсах выполнялась непрерывно двумя устройствами, установленными в пунктах измерения 1 (на 1285 км ж.д.) и 2 (на 1295.3 км ж.д.). Устройства регистрации тока включали датчики тока и цифровой регистратор.

В связи с тем что часть обратного тока, потребляемого электровозом, возвращается на тяговые подстанции через землю, регистрируемые величины тока значительно меньше значения тока контактной сети. Поэтому величины измеренных токов в рельсах в моменты времени, непосредственно

предшествующие прохождению состава над измерительным датчиком и непосредственно следующие после прохождения состава, принимались в качестве токов, протекающих в контактной сети.

Синхронно с измерениями тока в рельсе выполнялись измерения наведенных напряжений на фазных проводах отключенной высоковольтной линии электропередачи 146 (ЛЭП-146) на подстанции 13 (ПС-13, ст. Имандра) при заземлении этой линии на ПС-60 (ст. Хибинь). В данном случае использовался цифровой регистратор – компьютер типа notebook со встроенными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). Наведенное напряжение подавалось на АЦП от линии через высоковольтный делитель напряжения.

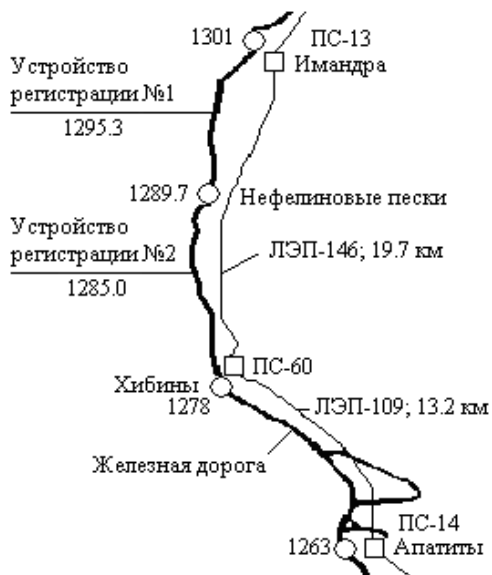


Рис. 1. План расположения участка железной дороги ст. Хибинь – ст. Имандра и ЛЭП-146

В результате измерений были получены экспериментальные данные токов, потребляемых электроподвижными составами, и наведенное напряжение на отключенной ЛЭП-146, вызванное электромагнитным влиянием тяговой сети железной дороги.

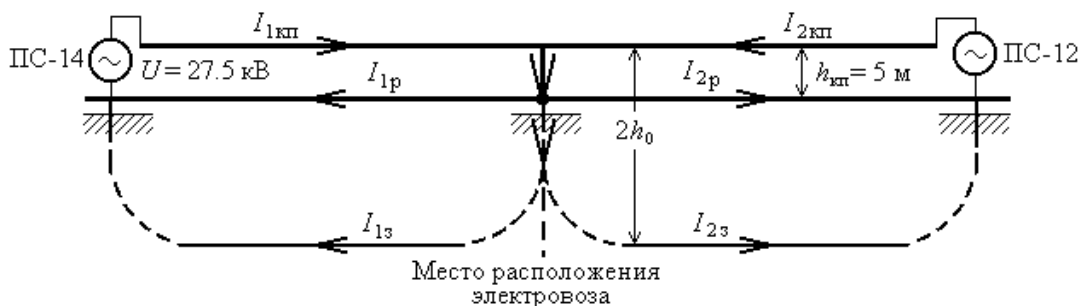


Рис. 2. Схема замещения влияющего участка железной дороги

3. Результаты измерений

За последние годы плотность движения составов на железной дороге возросла, поэтому необходимо рассмотреть случаи, когда на исследуемом участке находятся два электроподвижных состава: в момент прохождения первым электровозом пункта регистрации 1 второй электровоз проходит через пункт регистрации 2.

Первоначальные экспериментальные данные обрабатывались с использованием звукового редактора Cool Edit с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) и фильтров. Так, для шести выбранных случаев был выявлен спектральный состав измеренных токов в рельсах и определены амплитуды гармоник с первой по 11-ю (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что основной вклад в ток, поступающий к электровозу, вносит первая гармоника. Достаточно большие значения по отношению к первой имеют третья и пятая гармоники: амплитуда третьей гармоники может составлять 20-30 %, а амплитуда пятой гармоники – 10-15 % от значения основной гармоники.

Амплитудный спектр тока каждого электровоза зависит главным образом от его нагрузки и не зависит от режимов работы соседних электровозов. Но следует отметить, что в случае нахождения на дистанции двух электровозов вклад каждой высшей гармоники в действующее значение полного тока электровоза примерно в 1.5 раза ниже вклада соответствующих гармоник в значение тока электровоза, когда на дистанции находится один электровоз (Карякин, 1987).

Таблица 1. Амплитудный спектральный состав тока в рельсах

Номер гармоники	Ток в рельсах I_p , А											
	Случай 1				Случай 2				Случай 3			
	Состав 1		Состав 2		Состав 1		Состав 2		Состав 1		Состав 2	
	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12
1	46.0	24.9	59.3	64.2	130.5	7.5	67.1	68.8	44.8	34.4	121.0	29.4
3	8.1	6.5	13.8	12.5	16.3	3.1	13.7	10.9	14.6	5.4	16.8	10.9
5	3.2	3.4	7.4	5.1	5.1	2.3	6.6	5.6	5.8	1.2	4.8	6.0
7	1.5	1.8	4.7	2.6	1.9	2.4	3.6	3.2	3.0	0.6	1.9	6.0
9	1.2	1.3	3.3	1.5	1.4	2.0	2.5	2.3	2.6	0.5	1.0	5.5
11	0.9	0.9	2.3	0.9	0.5	1.4	1.4	1.4	1.9	0.2	0.5	3.2
Номер гармоники	Случай 4				Случай 5				Случай 6			
	Состав 1		Состав 2		Состав 1		Состав 2		Состав 1		Состав 2	
	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12	ПС-14	ПС-12
	1	51.4	11.2	25.7	36.1	37.7	11.6	94.5	16.2	49.7	29.0	46.0
3	8.6	4.8	9.5	9.4	3.4	2.4	19.6	3.2	8.9	6.1	8.6	11.9
5	3.2	2.2	4.7	2.7	1.7	1.0	9.0	2.9	3.2	3.0	5.1	5.6
7	1.7	1.1	2.7	3.0	1.4	0.6	5.2	1.5	2.0	2.1	3.4	2.8
9	1.3	1.4	2.6	1.2	0.6	0.5	3.7	1.5	1.6	1.3	2.3	1.7
11	1.0	0.7	2.2	0.9	0.5	0.5	2.4	0.9	0.9	0.9	1.8	1.1

Для дальнейших расчетов наведенного напряжения на ЛЭП-146 с учетом исходных данных амплитудного спектрального состава тока в рельсах были определены действующие значения полных токов, потребляемых электровозами от двух тяговых подстанций (табл. 2), в соответствии с формулой (Демирчян и др., 2003):

$$I_p = \sqrt{\sum_{i=1,3,5,7,9,11} (I_i)^2} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2},$$

где I_i – действующее значение i -й гармоники; I – действующее значение тока в рельсе.

Таблица 2. Полные действующие значения токов электровозов, поступающих от тяговых ПС-14 (Апатиты) и ПС-12 (Оленегорск)

Номер случая	Ток состава 1, А			Ток состава 2, А		
	ПС-14	ПС-12	Σ	ПС-14	ПС-12	Σ
1	33.1	18.4	51.5	43.5	46.5	90.0
2	93.1	6.4	99.5	48.8	49.5	98.3
3	33.7	24.6	58.3	86.5	23.4	109.9
4	36.9	8.8	45.7	19.9	26.5	46.4
5	26.8	8.4	35.2	68.7	11.9	80.6
6	35.8	21.1	56.9	33.4	47.3	80.7

Первоначальные экспериментальные данные наведенного напряжения на ЛЭП-146, так же как и результаты измерений тока в рельсах, были обработаны с помощью звукового редактора Cool Edit. В табл. 3 представлены спектральный состав (действующие значения) и полное действующее значение наведенного напряжения на ЛЭП-146.

Проведенные измерения показывают, что при заземлении отключенной ЛЭП-146 с одной стороны значения наведенного напряжения на ее изолированном конце (ПС-13) существенно превышают допустимый безопасный уровень – 25 В.

4. Расчет наведенных напряжений на линии электропередачи по экспериментальным данным тока в рельсах

В работе (Дроздова, Якубович, 2010) представлены результаты расчетов наведенного напряжения на отключенной ЛЭП, вызванного влиянием тяговой сети железной дороги, которые были выполнены на основе экспериментальных данных, полученных при измерении тока в рельсах и земле. В расчетах не учитывались концевой эффект и взаимное влияние контуров, образованных токами, растекающимися от электровоза в разные стороны.

Таблица 3. Спектральный состав и полные действующие значения наведенных напряжений на ЛЭП-146

Номер гармоники	$U_{нав}, В$					
	Случай 1	Случай 2	Случай 3	Случай 4	Случай 5	Случай 6
1	39.0	60.1	45.4	24.8	39.0	36.6
3	14.8	23.8	22.9	11.7	12.7	14.7
5	11.0	14.9	16.3	4.7	7.2	7.8
7	7.8	11.1	11.0	2.1	3.0	7.6
9	6.3	8.6	7.3	5.6	5.2	6.5
11	5.7	5.1	8.4	5.0	5.0	4.5
Σ	44.6	68.0	55.7	28.9	42.3	41.6

Известно, что на участке сближения, находящемся около места расположения электровоза, происходит снижение ЭДС взаимной индукции, вызванное влиянием концевого эффекта вследствие появления встречных токов. Магнитные поля от протекающих к месту расположения электровоза встречных токов частично взаимно компенсируют друг друга (Костенко, 1984). В данной статье в качестве основы алгоритма расчета напряжений, наведенных от тяговой сети железной дороги переменного тока, выбран следующий подход.

Наведенное напряжение на проводах отключенной ЛЭП зависит от распределения обратного тягового тока между рельсами и землей (рис. 2). Доля тока, стекающего в землю, обусловлена рядом параметров: сопротивлением рельсов; переходным сопротивлением "рельсы – земля"; качеством и состоянием электрических соединителей, насыпи и т.п. В данной работе доля обратного тягового тока в рельсе считалась равной 60 %, в земле – 40 %. Глубина проникновения, м, стекающего с рельса в землю тока определяется выражением

$$h = 2 \cdot 400 \cdot \sqrt{\rho / f},$$

где f – частота, равная 50 Гц; ρ – удельное сопротивление грунта, в нашем случае принятое равным 10000 Ом·м (для условий Крайнего Севера).

Расчет ЭДС взаимной индукции на единицу длины провода ЛЭП, подверженной влиянию, проводился по общеизвестной формуле (Костенко, 1984):

$$E_n = I_i Z_{in} k_{з.д} = I_i j \omega M_{in} k_{з.д},$$

где i – влияющий провод; n – провод отключенной линии; I_i – ток во влияющем проводе; Z_{in} – взаимное сопротивление между проводами i и n ; M_{in} – взаимная индуктивность между проводами i и n ; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; $k_{з.д}$ – коэффициент защитного действия рельса, принятый равным 0.4. При определении магнитной составляющей наведенного напряжения была внесена поправка на экранирующий эффект встречных токов в месте расположения электровоза.

В расчетах наведенного напряжения на ЛЭП-146 также учитывалась электрическая составляющая, которая определяется соотношением собственных и взаимных частичных емкостей между всеми проводниками системы. Однако с учетом того что взаимная емкость быстро уменьшается с увеличением ширины сближения при относительно невысоком питающем напряжении на железной дороге переменного тока (27.5 кВ), ее вклад в наведенное напряжение на ЛЭП-146 практически не ощутим.

Для удобства задания параметров расчета линия электропередачи на всем сближении с железной дорогой была разбита на четыре участка, для каждого из которых в программе расчета наведенного напряжения задавались ширина b и длина l сближения: на участке 1 – $l = 6.0$ км, $b = 1.0$ км; участке 2 – $l = 8.82$ км, $b = 1.0$ км; участке 3 – $l = 4.48$ км, $b = 2.0$ км; участке 4 – $l = 0.4$ км, $b = 999.0$ км. Из-за сложного геометрического расположения четвертого участка считалось, что он удален от железной дороги так далеко, что наведенным напряжением на нем можно пренебречь.

Расчеты наведенного напряжения проводились на изолированном конце линии (ПС-13, ст. Имандра) при заземлении ее на другом конце (ПС-60, ст. Хибины). Значения гармоник тока и напряжения контактной сети задавались в соответствии с экспериментально полученными спектрами. Результаты расчетов наведенного напряжения на ЛЭП-146 представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что погрешность расчетного значения наведенного напряжения $U_{расч}$ относительно экспериментального $U_{эксп}$ составила для случаев 2 и 5 в пределе 3 %, случаев 3 и 4 – ≤ 11 % и случаев 1 и 6 – ≤ 18 %. Такие погрешности вполне допустимы, поскольку завышение расчетных значений приводит лишь к повышению безопасности ремонтного персонала при работе на линиях, подверженных влиянию.

Таблица 4. Наведенное напряжение на отключенной ЛЭП-146

Номер случая	$I_{эл1}, A$	$I_{эл2}, A$	$U_{эксп}, B$	$U_{расч}, B$	$\Delta, \%$
1	51.5	90.0	44.6	51.9	16
2	99.5	98.3	68.0	68.5	1
3	58.3	109.9	55.7	62.0	11
4	45.7	46.4	28.9	31.8	10
5	35.2	80.6	42.3	43.4	3
6	56.9	80.7	41.6	49.4	18

5. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что:

1) основной вклад в ток, поступающий к электровозу, вносит первая гармоника. Достаточно большие значения по отношению к первой имеют третья и пятая гармоники: амплитуда третьей гармоники может составлять 20-30 %, амплитуда пятой гармоники – 10-15 %. Уровень высших гармоник тока в тяговой сети в случае, когда на дистанции железной дороги находятся два электроподвижных состава, в полтора раза ниже, чем в случае, когда на дистанции находится один состав;

2) тяговая сеть железной дороги переменного тока оказывает существенное электромагнитное влияние на проходящую вдоль нее отключенную линию электропередачи; экспериментальные значения наведенного напряжения на ЛЭП-146 в некоторых случаях превышают более чем в два раза допустимый уровень – 25 В;

3) расчетные значения наведенного напряжения на ЛЭП-146 в среднем имеют погрешность в пределах 3-11 % (в наихудшем случае ≤ 18 %) относительно экспериментальных данных, что вполне допустимо, поскольку завышение расчетных значений приводит лишь к повышению безопасности ремонтного персонала при работе на линиях, подверженных влиянию;

4) значения наведенного напряжения на отключенной линии электропередачи, вычисленные по методу, в котором учитывались концевой эффект и взаимное влияние контуров, в полтора раза ниже значений наведенного напряжения, рассчитанных по методу, использованному в работе (Дроздова, Якубович, 2010).

Литература

- Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1. СПб., Питер, 463 с., 2003.
- Дроздова О.В., Якубович М.В. Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключенные линии электропередачи. Вестник МГТУ, т. 13, № 4/2, с. 918-922, 2010.
- Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока. М., Транспорт, 279 с., 1987.
- Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. М., НЦ ЭНАС, 192 с., 2001.
- Костенко М.В. Влияние электрических сетей высокого напряжения на техно- и биосферу. Л., ЛПИ, 56 с., 1984.
- Фрайфельд А.В., Марков А.С., Тюрнин Г.А. Устройство, монтаж и эксплуатация контактной сети. М., Транспорт, 416 с., 1974.

References

- Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.** Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. V 3 t. T. 1. SPb., Piter, 463 p., 2003.
- Drozdova O.V., Yakubovich M.V.** Issledovanie vliyaniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka na otklyuchennyye linii elektroperedachi [Investigation of impact of traction power supply AC on disconnected power lines]. Vestnik MGTU, v. 13, N 4/2, p. 918-922, 2010.
- Karyakin R.N.** Tyagovyye seti peremennogo toka [AC traction]. M., Transport, 279 p., 1987.
- Mezhotraslevyye pravila po ohrane truda (pravila bezopasnosti) pri ekspluatatsii elektroustanovok [Interbranch regulations on labour protection (safety) for electrical installations]. M., NTs ENAS, 192 p., 2001.
- Kostenko M.V.** Vliyaniye elektricheskikh setey vyisokogo napryazheniya na tehno- i biosferu [Influence of high-voltage electrical networks on the techno- and biosphere]. L., LPI, 56 p., 1984.
- Frayfeld A.V., Markov A.S., Tyurnin G.A.** Ustroystvo, montazh i ekspluatatsiya kontaktnoy seti [Device installation and operation of a contact network]. M., Transport, 416 p., 1974.

Информация об авторе

Залесова Ольга Валерьевна – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии, мл. науч. сотрудник, e-mail: drozdova_nord@mail.ru

Zalesova O.V. – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, High-Voltage Laboratory, Junior Researcher, e-mail: drozdova_nord@mail.ru