

УДК 621.311

Исследование влияния системы тягового электроснабжения переменного тока на отключенные линии электропередачи

О.В. Дроздова¹, М.В. Якубович^{1,2}

¹ Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии

² Апатитский филиал МГТУ, кафедра электроэнергетики

Аннотация. Рассмотрен процесс распределения обратного тягового тока между рельсами и землей. Выполнен анализ спектрального состава тока в рельсах. На основе экспериментальных данных было рассчитано наведенное напряжение на высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП), проходящей вблизи железной дороги, при различных схемах заземления линии. Предложен метод заземления отключенной ЛЭП, обеспечивающий безопасность ремонтного персонала во время работ на линии.

Abstract. The distribution process of the traction return current between the rails and ground has been considered. The spectrum analysis of the current flowing in the rails has been executed. The inducted voltage on the disconnect transmission line disposing along the railway has been calculated for various circuits of the line grounding. The disconnect transmission line grounded circuit providing the safety of the operation and maintenance personnel during work on the line has been proposed.

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

Key words: traction return current, current in the rails, inducted voltage

1. Введение

По данным экспериментальных исследований, выполненных ЦФТПЭС КНЦ РАН, уровень наведенного напряжения на отключенных линиях электропередачи (ЛЭП) "Колэнерго", проложенных вблизи железной дороги, во время прохождения по ней электроподвижных составов в ряде случаев значительно превышает предельно допустимое значение – 25 В, установленное в *Межотраслевых правилах по охране труда* (2001). В таких случаях уровень наведенных напряжений определяется э.д.с., индуцированной током тяговой сети в проводниках отключенных ЛЭП. Ее величина, в свою очередь, зависит от уровня гармоник (спектра тока) в тяговой сети и доли тока контактной сети, возвращающегося на питающие подстанции по рельсам.

Поэтому необходимо исследовать спектральный состав тока тяговой сети и определить, как происходит распределение обратного тока между рельсами и землей. Анализ экспериментальных данных позволит уточнить модель влияния тяговой сети на протяженные проводные коммуникации и оценить вклад высших гармоник тока тяговой сети в наведенные напряжения.

2. Методика измерений и система регистрации токов в рельсовых путях при прохождении составов

Основной задачей измерений токов в рельсовых путях при прохождении составов было определение распределения тяговых токов (с учётом их спектра) между рельсами и землей.

Измерения проводились на отрезке дистанции железной дороги Апатиты – Оленегорск в районе станций Хибины, Нефелиновые Пески и Имандра. Данный участок дистанции является однопутным, что значительно упрощает измерения и расчёты и позволяет получить более достоверные результаты. Электропитание дистанции двустороннее и производится от тяговых подстанций № 14 (г. Апатиты) и № 12 (г. Оленегорск) (рис. 1). Считалось, что в месте расположения электровоза ток разветвляется на две составляющие: ток в рельсе и ток в земле.

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

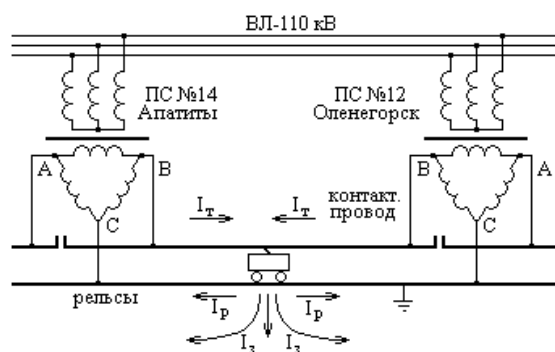


Рис. 1. Схема электропитания дистанции Апатиты – Оленегорск

и портативный компьютер. Датчики тока устанавливались под рельсом.

Регистрация токов выполнялась синхронно в трех различных точках исследуемого участка железной дороги. Это позволило оценить доли токов, возвращающихся на тяговые подстанции по рельсам, и тем самым уточнить модель влияния электрической сети железной дороги на близко расположенные высоковольтные линии.

3. Результаты измерений токов в рельсах

По данным измерений были получены осциллограммы, показывающие общую картину изменений тока в рельсе, зависящих от режимов работы электрических цепей электровоза, различных коммутаций в них, от неоднородностей тяговой сети и т.п. Они обрабатывались в звуковом редакторе Cool Edit. При обработке сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) и фильтров был выявлен спектральный состав измеренных токов и определены амплитуды гармоник вплоть до 11-й. Таким образом были исследованы апатитские токи, возвращающиеся по рельсам на ПС №14 г. Апатиты, регистрируемые всеми тремя датчиками после прохождения северного датчика, если состав двигался на север, или до прохождения северного датчика, если состав двигался на юг.

Для анализа спектрального состава токов в рельсах были выбраны осциллограммы токов тех составов, которые проходили участок железной дороги, где размещены датчики, с достаточно большим временным отрывом от других составов. Спектры апатитских токов для этих поездов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Спектральный состав апатитского тока в рельсах (действующие значения)

№ гармоник	Ток в рельсах I_p , А								
	Состав № 1			Состав № 2			Состав № 3		
	Южный датчик	Центр. датчик	Северн. датчик	Южный датчик	Центр. датчик	Северн. датчик	Южный датчик	Центр. датчик	Северн. датчик
1	10.993	16.175	28.544	11.490	12.927	27.915	32.315	39.112	51.376
3	2.734	3.290	5.112	5.552	5.967	10.828	9.100	10.149	12.022
5	1.619	1.995	3.274	2.418	2.685	5.083	4.403	4.853	5.773
7	0.146	0.369	0.635	1.254	1.423	2.785	2.478	2.714	3.333
9	0.528	0.762	1.392	1.0	1.253	2.210	1.426	1.575	1.903
11	0.553	0.847	1.271	0.585	0.732	1.298	0.930	1.034	1.084

Из приведённых данных можно видеть, что основной вклад в ток, возвращающийся на тяговую подстанцию по рельсам, вносит, естественно, 1 гармоника. Но следует отметить, что достаточно большие значения по отношению к первой имеют 3, 5 и 7 гармоники.

4. Определение полного тока тяговой сети по экспериментальным данным тока в рельсах

Локомотив, находящийся на линии, получает энергию от двух тяговых подстанций, и полный ток, потребляемый локомотивом, поступает к нему с двух сторон. Этот ток состоит из двух составляющих: апатитского тока $I^{АП}$ и оленегорского тока $I^{ОЛ}$. Величины $I^{АП}$ и $I^{ОЛ}$ обратно пропорциональны расстояниям от локомотива до соответствующей тяговой подстанции (Фрайфельд и др., 1974).

Таким образом, недостающие до полного тока тяговой сети значения гармоник оленегорского тока вычислялись в соответствии с расположением северного датчика на исследуемом участке железной дороги по формуле:

$$I_i^{ОЛ} = (I_i^{АП} \cdot L^{АП}) / (L - L^{АП}),$$

где L – расстояние от Апатитов до Оленегорска (73 км); $L^{АП}$ – расстояние от Апатитов до северного датчика (34.8 км); $I_i^{ОЛ}$; $I_i^{АП}$ – i -ые гармоники оленегорского и апатитского токов.

Результаты расчетов действующих значений гармоник полного тока тяговой сети для каждого состава представлены в табл. 2.

Таблица 2. Действующие значения гармоник тягового тока

		№ гармоники						
		1	3	5	7	9	11	Σ
Полный ток (действующее значение) I , А	Состав №1	54.547	9.769	6.257	1.213	2.66	2.429	55.896
	Состав №2	53.345	20.692	9.714	5.322	4.223	2.48	58.485
	Состав №3	98.179	22.974	11.032	6.369	3.637	2.072	101.719

5. Распределения обратных токов в рельсах при прохождении состава по дистанции и расчет коэффициента защитного действия рельса

Для каждого поезда по исходным данным спектрального состава тока в рельсах были определены действующие значения общего апатитского тока в рельсах в соответствии с известной формулой (Демирчян и др., 2003):

$$I = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} (I_i)^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_i^2 + \dots} \quad (1)$$

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

Результаты расчётов действующих значений апатитского тока в рельсах по формуле (1) представлены в табл. 3.

Таблица 3. Действующие значения апатитского тока в рельсах I_p , А

	Южный датчик	Центральный датчик	Северный датчик
Состав №1	11.410	16.670	29.250
Состав №2	13.100	14.630	30.605
Состав №3	33.993	40.832	53.228

По известным значениям тока в рельсах, зарегистрированным тремя датчиками, и расстояниям между пунктами регистрации можно определить долю тока, протекающего по рельсам на дистанции между южным и северным датчиками, используя следующие эмпирические формулы:

$$I_1 = (0.098 \cdot 1.111^l + 0.294) \cdot 100\% \quad (2)$$

$$I_2 = (3.971 \cdot 10^{-3} \cdot 1.304^l + 0.424) \cdot 100\% \quad (3)$$

$$I_3 = (0.117 \cdot 1.078^l + 0.522) \cdot 100\% \quad (4)$$

где индексы 1, 2, 3 – номера составов; l – место регистрации тока на дистанции относительно южного датчика, км.

Диаграммы распределения токов в рельсах, построенные по эмпирическим формулам (2), (3) и (4), представлены на рис. 2. Из них видно, что значения токов, протекающих в рельсах, значительно разнятся. Доля токов в рельсах составляет 40-65 % от тока в контактном проводе.

Определив значение полного тягового тока и его распределение между рельсами и землей, можно рассчитать коэффициент защитного действия рельсов ($K_{зд} < 1$). В *Методических указаниях по измерению наведенных напряжений на ВЛ* (1993) этот коэффициент находится как отношение напряжённости электрического поля, созданного контактным проводом при наличии рельсов, к напряжённости поля при их отсутствии.

Исследования, проводимые ЦФТПЭС КНЦ РАН, показали, что наведённые напряжения, пропорциональные напряжённости поля, практически линейно зависят от разности тока в контактном проводе и рельсах (для случаев, когда ток в рельсах превышает 10 % от тока в контактном проводе). Поэтому за коэффициент защитного действия $K_{зд}$ было принято отношение разности токов в контактном проводе ($I_{кп}$) и рельсах (I_p) к току в контактном проводе:

$$I_k = (I_{кп} - I_p) / I_{кп}$$

Поскольку разность $I_{кп} - I_p = I_3$ – есть ток, протекающий в земле, то $K_{зд} = I_3 / I_{кп}$.

Расчёт значений $K_{зд}$ был сделан для всех составов для каждой из первых шести нечётных гармоник в отдельности. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициент защитного действия рельсов, рассчитанный по значениям апатитского тока

Коэффициент защитного действия $K_{зд}$, %	№ гармоники	1	3	5	7	9	11
	Состав №1	0.615	0.465	0.505	0.770	0.621	0.565
Состав №2	0.588	0.487	0.524	0.550	0.548	0.549	
Состав №3	0.371	0.243	0.237	0.257	0.251	0.142	

6. Расчёт наведённых напряжений на основе экспериментальных данных

В расчетах были приняты следующие допущения. Рассматриваемый участок железной дороги имеет двустороннее питание. В месте расположения электровоза обратный ток делится на ток в рельсах и ток в земле, который сразу уходит на эквивалентную глубину $h = 2 \cdot 400 \cdot \sqrt{\rho/50}$ (м), где ρ – удельное

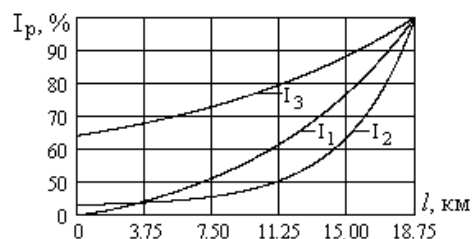


Рис. 2. Диаграммы распределения тяговых токов в рельсах, возвращающихся на подстанцию №14 в г. Апатиты

сопротивление грунта в Ом·м. Таким образом, не учитывались концевой эффект и взаимное влияние контуров, образованных токами, растекающимися от электровоза в разные стороны. Такой расчет несколько завышает значения наведенных напряжений на ЛЭП в пределах 20 % (Костенко, 1984), но эти допущения идут в сторону запаса при определении степени опасности ремонтных работ.

Подобный подход позволил перейти к простой схеме замещения влияющего участка железной дороги. Наведенные напряжения на ЛЭП, расположенной параллельно с железной дорогой, определяются четырьмя контурами переменной длины (рис. 3). В двух контурах токи текут в контактных проводах и полностью возвращаются в землю. В двух других заданные токи текут по рельсам и также полностью возвращаются в землю. Из-за разности высот подвеса контактного провода и прокладки рельсов ток в земле также разделяется на две составляющие, текущие на близких, но все же разных глубинах. Это в данном случае правильно и является по существу учетом несимметрии влияющей системы.



Рис. 3. Четырехконтурная схема замещения влияющего участка железной дороги

Кроме электромагнитной составляющей наведенного напряжения, существует электростатическая составляющая, которая учтена далее в расчетах. Она определяется соотношением собственных и взаимных частичных емкостей между всеми проводниками системы. В связи с тем, что на железной дороге применяется относительно низкое питающее напряжение (27.5 кВ), а взаимная емкость быстро уменьшается с увеличением ширины сближения, эта составляющая в данной задаче дает значительно меньший вклад в наведенное напряжение, чем электромагнитная.

Для расчётов наведённых напряжений по полученным данным тяговых токов была выбрана линия электропередачи Л-146, проходящая от ПС №60 п. Хибины до ПС №13 п. Имандра. Длина линии составляет 19.7 км. Линия имеет сближение с железной дорогой на всём протяжении, ширина сближения 1.5 км (рис. 4).

Расчеты проводились для трех схем заземления линии:

1. линия изолирована по концам и заземлена в месте ремонта;
2. линия заземлена по концам и в месте ремонта;
3. линия заземлена по концам и изолирована в месте ремонта.

Место ремонта было выбрано для наихудшего случая (середина участка сближения отключенной линии с железной дорогой), ему соответствует 9.85 км от начала Л-146 (рис. 4). Наибольшее значение наведенного напряжения достигается в момент прохождения электровоза точки А, находящейся напротив места ремонта.

Так как в условиях Кольского полуострова грунт имеет низкую проводимость, значение сопротивления заземления в месте ремонта принималось равным 0.1, 1 и 5 кОм, а по концам линии – 0.5 Ом (сопротивление заземления контуров подстанций).

Расчет был выполнен на основе действующих значений полного тока тяговой сети, который определялся по значениям экспериментальных данных апатитского тока. Результаты расчётов представлены в табл. 5.

Результаты расчетов показали, что применение второй схемы заземления, с учетом малых сопротивлений заземления контуров подстанций, даже если сопротивление заземления в месте ремонта принять равным 100 Ом, никак не повлияет на картину распределения наведенного напряжения и его максимальное значение.

Рис. 4. Параллельное сближение участка железной дороги с линией Л-146

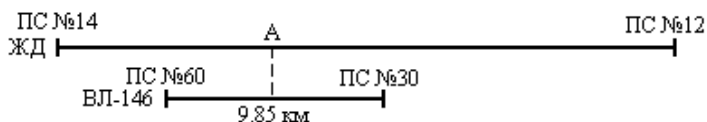


Таблица 5. Наведенное напряжение на ЛЭП-146, В

Сопротивление заземления в месте ремонта R, Ом	Линия по концам изолирована			Линия по концам заземлена		
	Состав №1	Состав №2	Состав №3	Состав №1	Состав №2	Состав №3
100	0.2	0.2	0.4	16.6	23.3	50.0
1000	1.2	2.0	3.4	16.9	23.8	50.9
5000	3.9	6.5	11.5	16.9	23.8	51.0
Заземление отсутствует				16.9	23.8	51.0

Наведенное напряжение в месте ремонта можно снизить, используя первую схему заземления линии. На рис. 5 представлена диаграмма изменения величины наведенного напряжения в месте ремонта в зависимости от значения сопротивления заземления линии в этой точке. Весьма малое значение наведённого напряжения в месте ремонта для первой схемы заземления линии объясняется близостью места ремонта к точке линии с наименьшим значением наведённого потенциала. Для других мест ремонта на Л-146 значение наведенного напряжения для второй схемы заземления может быть более высоким, однако не превышающим допустимый уровень 25 В.

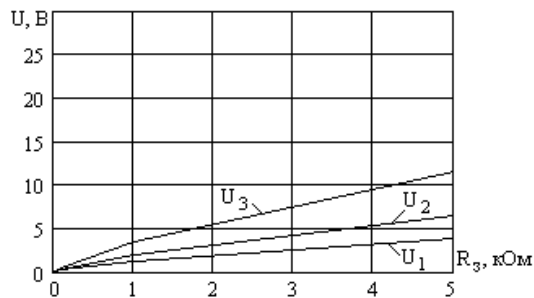


Рис. 5. Зависимость наведенного напряжения на линии Л-146 в месте ремонта от сопротивления заземления в этой точке (линия по концам изолирована)

7. Заключение

1. Проведенные измерения обратных токов в рельсах позволили оценить долю тока, возвращающегося на тяговые подстанции по рельсам. Она составляет 40-65 % от тягового тока. Был определен коэффициент защитного действия рельсов. Его величина варьируется как для различных гармоник поезда, так и для одной и той же гармоники в токах различных поездов.

2. Был определен и проанализирован спектральный состав тока в рельсах. Исследования показали сложный характер спектра тока и наличие в нём высших гармоник с достаточно большими амплитудами. Так, 3-я и 5-я гармоники часто имеют амплитуды порядка 20-30 % от амплитуды основной гармоники.

3. Согласно проведённым исследованиям, при заземлении линии в месте ремонта и по концам на контуры заземления подстанций уровень наведенного напряжения не всегда удается снизить до допустимого значения (25 В), особенно если в месте ремонта требуется заземляться на сопротивление в единицы Ом, что является практически невыполнимой задачей даже при грунтах, имеющих хорошую проводимость.

4. С точки зрения безопасности работы персонала на отключённых линиях во многих случаях приемлемым решением является изоляция линии по концам и ее заземление только в месте ремонта. Применяя такую схему заземления, уровень наведенного напряжения даже при достаточно высоком сопротивлении заземлителя в данной точке может быть снижен до допустимого значения.

5. В данной работе рассматривался упрощённый вариант сближения линии электропередачи с участком однопутной железной дороги. Он был выбран из соображений удобства доступа и возможности отладки и выполнения комплексных измерений на железнодорожных путях. В связи с этим полученные результаты не несут обобщающего характера. Однако они показывают возможности выбранной методики измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта 09-08-00276 "Теоретическое и экспериментальное исследование наведённых напряжений и токов проводных воздушных и кабельных линий, находящихся в зоне влияния разветвлённой высоковольтной сети".

Литература

- Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. СПб., Питер, 463 с., 2003.
- Костенко М.В. Методика расчета защиты линии связи от опасного влияния линии электропередачи. *Электричество*, № 4, с.1-6, 1984.
- Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. М., Изд. НИЦ ЭНАС, 192 с., 2001.
- Методические указания по измерению наведённых напряжений на отключённых ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока. М., ОРГРЭС, 13 с., 1993.
- Фрайфельд А.В., Марков А.С., Тюрнин Г.А. Устройство, монтаж и эксплуатация контактной сети. М., Транспорт, 416 с., 1974.