

Моделирование кривой тока тяговой нагрузки железных дорог

СЕРЕБРЯКОВ А.С., GERMAN Л.А., МАКСИМОВА А.А.

Выполнены экспериментальные исследования формы и гармонических составляющих тока тяговой нагрузки для тяговых подстанций системы тягового электроснабжения 27,5 кВ. Показано, что в общем случае полученные результаты отличаются от тяговой нагрузки модели электроподвижного состава, основанной на схеме двухполупериодного выпрямления. Предложена математическая модель тяговой нагрузки, в основе которой принята нагрузка электровоза со схемой замещения из последовательно соединенных реактора и нелинейного резистора. Вид аппроксимирующего выражения для нелинейного резистора и его параметры определяются, используя экспериментально снятые осциллограммы и аналитические выражения для цифровой модели электровоза. Из равенства производных тока и их приращений в каждой точке получена зависимость сопротивления нелинейного резистора от тока. Показано, что для аппроксимации этой зависимости наилучшим образом подходит степенная функция. Представлен алгоритм определения параметров аппроксимирующего выражения по экспериментальным оцифрованным осциллограммам тока и напряжения в тяговой сети с использованием метода наименьших квадратов. Предложенная математическая модель тяговой нагрузки системы электроснабжения переменного тока, аппроксимирующее выражение для сопротивления нелинейного резистора этой модели и методика определения его коэффициентов позволяют наиболее точно отображать стационарные и нестационарные процессы в тяговой сети переменного тока с учетом тяговой нагрузки.

Ключевые слова: тяговая нагрузка, электровоз переменного тока, ток, гармонические составляющие, цифровая модель

1. Гармонические составляющие тока и напряжения в тяговой сети переменного тока. В системе тягового электроснабжения существенную роль на режим тяговой сети оказывают гармонические составляющие тяговой нагрузки. При этом искажается форма кривой напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, что ухудшает его работу, повышаются потери мощности и напряжения в тяговой сети. Кроме того, возможны резонансные явления в системе тягового и внешнего электроснабжения. Наличие гармонических составляющих и их количественный состав рассматривались во многих работах [1–7]. Гармонические составляющие затрудняют проведение расчетов системы тягового электроснабжения мощности, её элементов и, в частности, параметров и режима работы фильтрокомпенсирующих установок [8, 9]. В Правилах [10] предложены усредненные данные гармоник тока в тяговой сети в режимах тяги и рекуперации, однако предложенный широкий диапазон значений гармонических составляющих затрудняет использовать эти данные в конкретных расчетах. Кроме того, в [10] нет данных по фазовым характеристикам гармонических составляющих тока, что не позволяет рассчитывать потери напряжения от гармонических составляющих.

Для повышения эффективности расчетов системы тягового электроснабжения необходимо формировать цифровую модель, где составной частью должна быть модель электроподвижного состава

(ЭПС), формирующая спектр гармонических составляющих тока. В этом случае в расчете будут участвовать одновременно все гармоники, генерируемые ЭПС, и будет учтено взаимное влияние каждой из них. Построение моделей ЭПС известно из многих источников, например [11–13], где строго по известным формулам для однофазного выпрямителя ЭПС формировался ток первичной обмотки трансформатора, при этом в [12] дано аналитическое выражение аппроксимированной вольт-амперной характеристики тиристора, а в [13] использованы математические модели электровозов с зонно-фазовым регулированием. В результате форма кривой тока ЭПС в установившемся режиме получается подобно кривой на рис. 1. При наличии регулируемого преобразователя на тиристорах кривая тока i сдвигается на угол регулирования $\alpha - i'$. Такую кривую тока ЭПС используют во всех указанных цифровых моделях.

В [10] предложено для расчетов принимать процентное содержание гармонических составляющих тока электровоза, например для 3, 5 и 7-й гармоник тока двухпутного участка – в режиме тяги – 17%; 8,2% и 3,0% и в режиме рекуперации – 24%; 7,2% и 5,3%. Однако, как показывают экспериментальные исследования, далеко не во всех случаях кривые тока подобны кривой на рис. 1, а гармонические составляющие не всегда соответствуют [10], и, как результат, возможны погрешности в расчетах.

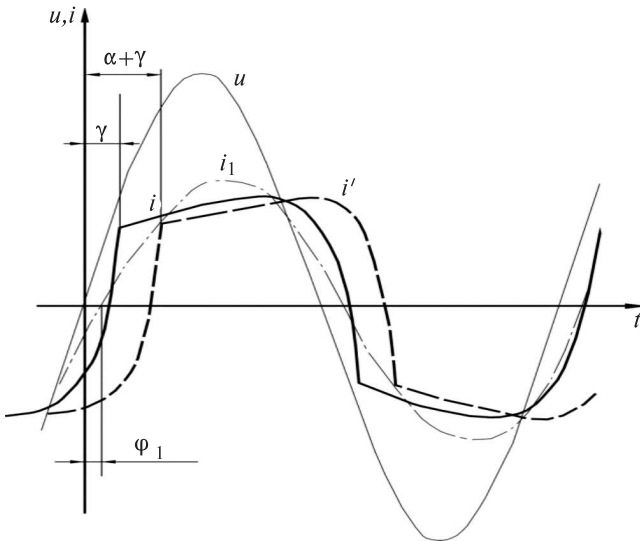


Рис. 1. Ток и напряжение ЭПС (i — ток первой гармоники; i' — ток первой гармоники при тиристорном регулировании; φ_1 — фаза тока первой гармоники; γ — угол коммутации)

Форма кривой тягового тока и его гармонический состав зависят от многих факторов и, в частности:

1) от типов ЭПС и режимов их работы; форма тока фидера — от числа токов электровозов, работающих с разными углами коммутации. Более 90% ЭПС (например ВЛ-80с), эксплуатируемых на отечественных железных дорогах, оснащены коллекторными двигателями и двухполупериодными выпрямителями. На электровозах с рекуперацией (например ВЛ-80р) применяют тиристорное управление. На новых ЭПС (ЭП20, ЭВС2 «Сапсан», ЭС1 «Ласточка», «Стриж» и др.) используются асинхронные двигатели. Несмотря на постепенное увеличение объемов применения ЭПС с асинхронными двигателями, объем их внедрения пока еще остается малым, поэтому в ближайшие годы преобладающее число ЭПС, применяемого на железных дорогах, будет оснащено выпрямительными установками и коллекторными двигателями. При формировании математической модели тяговой нагрузки в общем случае следует ориентироваться на различные типы ЭПС;

2) наличия подключенных к тяговой подстанции магистральных участков или (и) крупных железнодорожных станций, на которых отличается режим работы ЭПС;

3) резонансных явлений в системах внешнего электроснабжения (СВЭ), в основном из-за резонанса на 5-й и 7-й гармониках;

4) состава гармонических составляющих уравнительного тока.

Итак, указаны причины отличия реальных кривых тока тяговой нагрузки от теоретических по рис. 1, поэтому использование в исследованиях и расчетах тяговой нагрузки с учетом модели элек-

тровоza с гармоническими составляющими тока, полученными только на основании расчетов электромагнитных процессов в электровозах с выпрямительными установками [11–13], по мнению авторов, может привести к ошибкам.

В статье обобщаются экспериментальные исследования формы и состава гармоник тягового тока для формирования приближенной к реальной функции тягового тока подстанции как составного элемента цифровой модели системы тягового электроснабжения.

Принципиальная позиция авторов по разработке модели тяговой нагрузки состоит в следующем.

1. Формирование модели тока ЭПС на действующем участке должно базироваться на «измеренной» форме кривой тока рассматриваемого участка электрифицированной железной дороги. Поэтому принципиально не важно, какие типы электровозов функционируют на этом участке и каковы режимы их работы.

2. Формирование модели тока ЭПС на проектируемом участке должно базироваться на использовании кривых тока, полученных экспериментальным путем на аналогичных действующих участках, подобных проектируемому. В крайнем случае, следует ориентироваться на формы кривой тягового тока для магистральных участков и крупных железнодорожных станций, приведенные в этой статье.

Предлагается следующая последовательность расчетов системы тягового электроснабжения с цифровой моделью ЭПС:

1) измерение значений гармонических составляющих тока и напряжения в нагрузочных узлах в соответствии с требованиями ГОСТ [14];

2) построение модели тяговой нагрузки по измеренным значениям гармонических составляющих;

3) формирование цифровой модели системы тягового электроснабжения с учетом тяговой нагрузки;

4) для СВЭ — цифровое моделирование переходных и установившихся процессов в заданных режимах;

5) расчет показателей качества электроэнергии по результатам моделирования, т.е. определение значений коэффициентов гармонических составляющих n -го порядка и суммарного и сравнение их с допустимыми значениями.

В соответствии с [14] контроль за показателями качества электроэнергии необходимо выполнять в точке балансовой принадлежности электроустановки и, следовательно, там же необходимо выполнять измерения, т.е. на тяговой подстанции — на шинах 110 (220) кВ. К моменту проведения авторами массовых измерений гармонических составляющих

тока и напряжений на тяговых подстанциях ещё не везде были установлены трансформаторы тока и напряжения на стороне 110 (220) кВ. Поэтому для получения сравнительных характеристик формы кривой тягового тока все измерения в период 2007–2012 гг. выполнялись на шинах 27,5 кВ. Для измерений использовался комплекс «Черный ящик 2000» (НТЦ ГОСАН), позволяющий проводить статистические исследования показателей качества электроэнергии с фиксацией осциллограмм процесса.

Обработка исходных данных выполнялась по [14], при этом за недельный период рассчитывалась интегральная кривая распределения суммарного коэффициента гармонических составляющих и определялось наибольшее значение с вероятностью 0,95. Суммарный коэффициент гармонических составляющих определялся с учетом до 15-й гармоники, хотя расчеты показали, что достаточно было учитывать 3, 5 и 7-ю гармоники. Для указанного наибольшего значения фиксировалась осциллограмма формы кривой тока тяговой нагрузки, которая далее анализировалась.

При необходимости за указанный период можно фиксировать наибольшие значения всех гармонических составляющих n -го порядка и сравнивать с допустимыми значениями (в статье эти измерения не приведены).

2. Экспериментальные исследования формы и гармонических составляющих тока в тяговой сети.

2.1. Исследования формы тягового тока на тяговой подстанции Агрыз. Исследования формы и гармонического состава тягового тока проводились на тяговой подстанции Горьковской ж.д. На рис. 2 представлена осциллограмма токов и напряжений ввода 27,5 кВ по плечам питания фаз a и b , зафиксированная на тяговой подстанции Агрыз, из которой видно существенное различие их форм.

На осциллограмме представлен установившийся режим, длительность которого определяется часами. В частности, по измерениям среднесуточное значение $\cos\varphi_{(1)}$ по основной гармонике равно 0,5

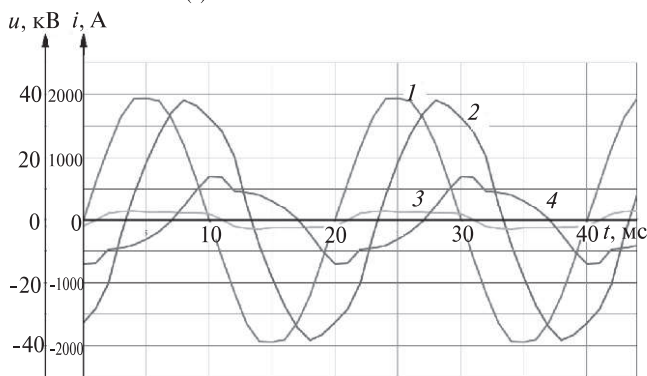


Рис. 2. Кривые напряжения и токов ввода 27,5 кВ ТП Агрыз: 1 — напряжение U_a ; 2 — U_b ; 3 — ток ввода I_a ; 4 — то же I_b

—0,6 для фазы b и 0,85–0,90 для фазы a . Указанное различие определяется наличием на фазе b тяговой нагрузки от парков крупной железнодорожной станции, отличающейся низким коэффициентом мощности и повышенным содержанием гармонических составляющих.

Кривая тока ввода формируется сложением токов соответствующих фидеров (рис. 3). От фидеров контактной сети ФКС1, ФКС2 — фаза a — питается магистральный участок одного направления, от ФКС4 и ФКС5 — фаза b — питается магистральный участок второго направления и от ФКС6 и ФКС9 — фаза b — магистральный участок третьего направления. Станционные ФКС3 и ФКС8 питаются от фазы b . Из рис. 3, a видно, что формы тока ввода фазы b существенно различаются при наличии тока станционного фидера 3.

2.2. Исследование гармонических составляющих. Гармонические составляющие напряжения тяговой подстанции Агрыз (табл.1) не превышают нормативных значений [14]. Это объясняется большим значением мощности короткого замыкания на вводе 110 кВ тяговой подстанции (2100 МВА).

Что касается гармонических составляющих токов, то в токе ввода фазы b процентное содержание

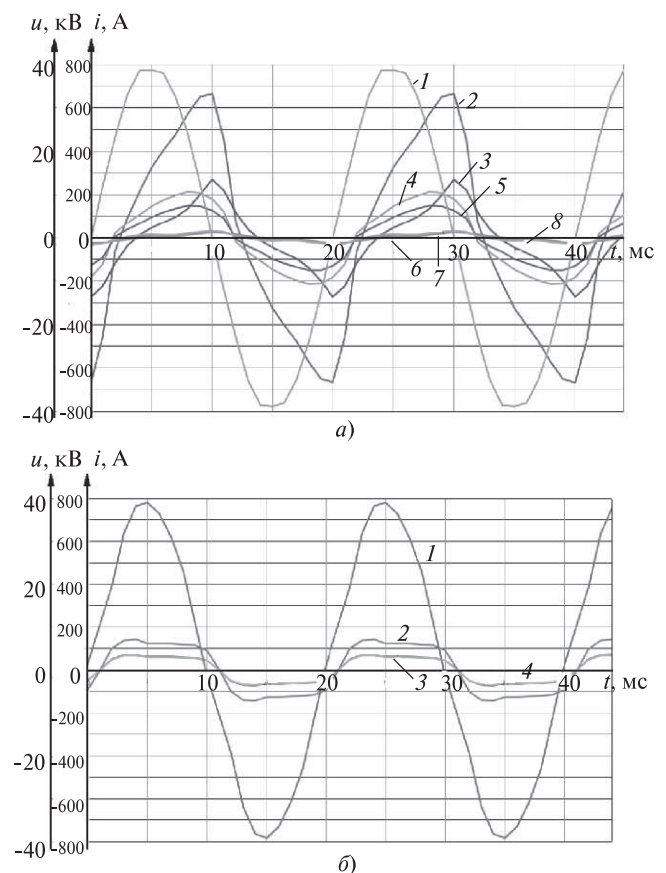


Рис. 3. Формирование токов ввода 27,5 кВ: a — фаза b : 1 — напряжение U_b ; 2 — ток ввода I_b ; 3 — ток I_b ФКС3; 4 — то же ФКС4; 5 — ФКС5; 6 — ФКС6; 7 — ФКС8; 8 — ФКС9; b — фаза a : 1 — напряжение U_a ; 2 — ток ввода I_a ; 3 — ток I_a ФКС1; 4 — то же ФКС2

гармоник 3, 5 и 7-го порядка (при амплитуде первой гармоники 611,25 А) соответственно равно (табл. 2): 19,47%, 6,43% и 2,91%, что отличается от принятых в [9] данных для расчета. Гармонические составляющие тока фазы *a* отличаются практически только третьей гармоникой – в 1,5 раза.

Таблица 1

Номер гармоник <i>k</i>	Гармонические составляющие напряжения тяговой подстанции		
	Амплитудное значение, В	Угол, град.	Процентное содержание гармоники
	U_b		
1	39976	0(-62,6 [*])	99,99
3	325	-38	0,81
5	435	148	1,09
7	258	15	0,65
9	137	-175	0,34
11	92	-5	0,23
13	75	165	0,19
15	48	32	0,12
U_a			
1	38424	0	96,1
3	1283	-180	3,2
5	1281	113	3,2
7	341	69	0,9
9	175	-75	0,4
11	117	-105	0,3
13	99	111	0,3
15	142	68	0,4

* – относительно U_a .

Таблица 2

Номер гармоник <i>k</i>	Гармонические составляющие тока фазы I_b		
	Амплитудное значение, А	Угол, град.	Процентное содержание гармоники
	Ввод		
1	611,25	-55	97,82
3	121,70	102	19,47
5	40,21	-214	6,43
7	18,21	-233	2,91
9	6,75	212	1,08
11	4,51	148	0,72

13	5,26	-127	0,84
15	4,47	-146	0,71
ФКС3			
1	198,23	-80	96,05
3	55,19	74	26,74
5	14,72	-226	7,13
7	4,91	-187	2,38
9	2,12	-34	1,03
11	1,42	34	0,69
13	1,43	-173	0,69
15	1,64	-133	0,79
ФКС4			
1	218,44	-43	98,79
3	30,84	115	13,95
5	11,25	-230	5,09
7	8,18	105	3,70
9	4,14	196	1,87
11	2,27	-105	1,03
15	1,22	-132	0,55
ФКС5			
1	151,69	-46	98,96
3	19,50	116	12,72
5	7,61	-230	4,96
7	5,76	100	3,76
9	2,86	189	1,87
11	1,91	171	1,25
13	1,67	-100	1,09
15	0,84	-130	0,55
ФКС6			
1	19,95	-76	91,22
3	8,89	71	40,63
5	0,72	-237	3,27
7	0,82	-224	3,73
9	0,21	-84	0,94
11	0,13	84	0,61
13	0,24	-136	1,09
15	0,08	-122	0,35
ФКС8			
1	19,98	-87	97,73
3	4,31	59	21,07
5	0,41	-212	2,02

7	0,22	-183	1,05
9	0,05	26	0,23
11	0,03	-26	0,16
13	0,06	-178	0,31
15	0,05	-149	0,22
ФКС9			
1	25,71	-62	93,03
3	9,97	76	36,09
5	1,28	-237	4,64
7	1,19	-234	4,30
9	0,26	244	0,94
11	0,17	116	0,63
13	0,35	-126	1,25
15	0,14	-123	0,15

7	1,42	-125	1,82
9	0,82	351	1,05
11	0,49	9	0,63
13	0,40	-240	0,52
15	0,61	-98	0,78

2.3. Исследования формы кривой тока тяговых подстанций Горьковской ж.д. Осциллограммы тягового тока вводов 27,5 кВ, зафиксированные на разных тяговых подстанциях (ТП) Горьковской ж.д. представлены на рис. 4. При этом токи вводов, питающие крупные железнодорожные станции, исключены. Начала периода каждой кривой тока совмещены в одну точку с тем, чтобы показать идентичность форм кривой тока.

Считаем, что подобная форма кривой тока будет на фидерах тяговых подстанций, питающих магистральные участки ж.д., а также на фидерах постов секционирования в схемах замещения тяговой сети с разнесением токов ЭПС между тяговыми подстанциями и постом секционирования.

Анализ экспериментальных данных позволяет сформулировать следующие предварительные результаты.

1. Экспериментальный анализ формы и гармонического состава тяговой нагрузки на вводе 27,5 кВ пяти тяговых подстанций Горьковской ж.д. показал большое разнообразие параметров кривой тока, зависящих от множества факторов, действующих на конкретной межподстанционной зоне. Существенное влияние на форму кривой тягового тока оказывает наличие крупной железнодорожной станции в районе рассматриваемой тяговой подстанции. Многие кривые тока сильно отличаются от теоретических кривых, построенных для электропоездов (см. рис. 1). Поэтому использование в

Таблица 3

Номер гармоник k	Гармонические составляющие тока фазы I_a		
	Амплитудное значение, А	Угол, град.	Процентное содержание гармоники
Ввод			
1	156,31	-15	96,36
3	41,78	-23	25,76
5	10,99	-262	6,78
7	2,59	-126	1,59
9	1,62	340	1,00
11	1,08	20	0,67
13	0,75	-234	0,46
15	1,22	-98	0,75
ФКС1			
1	78,64	-15	96,28
3	21,24	-23	26,00
5	5,69	-264	6,97
7	1,34	-127	1,64
9	0,90	349	1,11
11	0,60	10	0,74
13	0,39	-233	0,48
15	0,63	-96	0,77
ФКС2			
1	75,26	-15	96,24
3	20,41	-22	26,10
5	5,59	-264	7,15

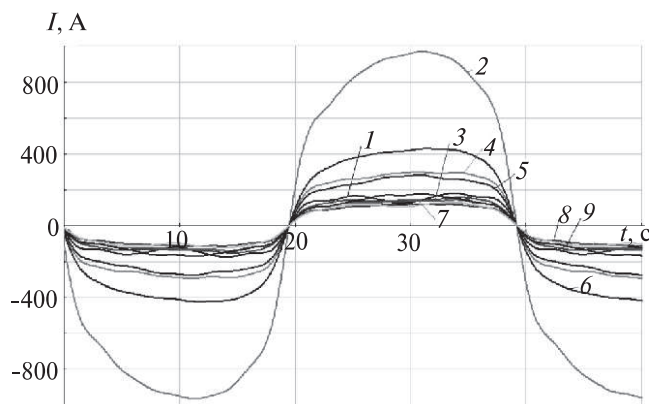


Рис. 4. Форма кривой тока ввода 27,5 кВ: 1 – ТП-21 Рехино. Ввод 2. I_b ; 2 – ТП-21 Рехино. Ввод 2. I_a ; 3 – ТП-43 Агрыз. I_a . 15.12.2012 г.; 4 – ТП-43 Агрыз. I_a . 12.12.2012 г.; 5 – ТП-21 Рехино. Ввод 2. I_b . 13.07.2010 г.; 6 – ТП-8 Горький Сортировочный. Ввод 1Т. I_b ; 7 – ТП-11 Керженец; 8 – ТП-4 Новки; 9 – ТП-21 Рехино. Ввод 2. I_a . 06.05.2011 г.

расчетах теоретических кривых тока электровозов, как это сделано в [11–13], может привести к погрешностям в расчетах.

2. В первом приближении можно ориентироваться на два типа кривых тока тяговой нагрузки: ток на магистральных участках и ток на крупных железнодорожных станциях.

3. Проведенные исследования показали основные формы кривой тока тяговой сети переменного тока, на которые следует ориентироваться при разработке модели тягового тока для использования их в цифровых моделях расчета систем тягового электроснабжения.

3. Определение параметров цифровой модели электровоза переменного тока при формировании тяговой нагрузки. Решение задач расчета систем тягового электроснабжения с учетом гармонических составляющих можно значительно упростить, если использовать математическую модель ЭПС, которая рассмотрена в [2, 9]. Форма тока, потребляемого электровозом из сети, несинусоидальная. Она содержит основную гармонику и высшие гармоники, искажающие форму напряжения в контактной сети, поэтому как потребитель электрической энергии, электровоз переменного тока представляет собой нелинейную активно-индуктивную нагрузку. На рис. 5 приведены снятые экспериментально кривые напряжения в контактной сети и тока электровоза переменного тока. В [15] была предложена математическая модель электровоза переменного тока (рис. 6), но не приведена методика получения конкретных параметров схемы. Это потребовало разработать методику получения коэффициентов функции кривой тягового тока, позволяющих аппроксимировать измеренную кривую тока.

Исходя из природы процессов, происходящих в электрической схеме электровоза, индуктивность L реактора b является линейной величиной, поскольку сглаживающие реакторы имеют воздушные зазоры и в них отсутствуют процессы насыщения электротехнической стали. Определить вид аппроксимирующего выражения для резистора 7 и его па-

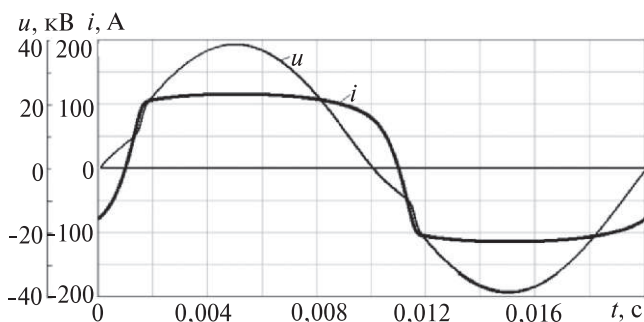


Рис. 5. Кривые напряжения u в контактной сети и тока i электровоза переменного тока

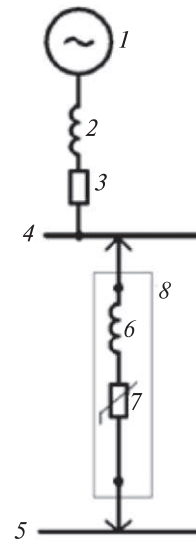


Рис. 6. Модель электровоза переменного тока для формирования тяговой нагрузки: 1–3 – источник питания, индуктивность L_0 и активное сопротивление R_0 системы внешнего электроснабжения; 4 – провод контактной сети; 5 – рельс; 6 – индуктивность реакторов электровоза L ; 7 – нелинейное активное сопротивление $R(i)$, отражающее процесс преобразования электрической энергии в механическую; 8 – эквивалентная схема электровоза (все параметры элементов приведены к напряжению контактной сети)

раметры можно используя экспериментально снятые осциллограммы, приведенные на рис. 5.

Обозначив мгновенные значения напряжения u_k и тока i_k (k – номер измерения), можно записать дифференциальное уравнение для модели, приведенной на рис. 6:

$$(L_0 + L_1) \frac{di}{dt} + R_0 i + R(i) i = u. \quad (1)$$

Из (1) для производной тока в точке k получим

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_k = \frac{u_k - R_0 i_k - R(i_k) i_k}{L_0 + L_1}. \quad (2)$$

Определим отношение приращения тока к приращению времени для каждой точки k из полученной экспериментально оцифрованной осциллограммы:

$$\left(\frac{\Delta i}{\Delta t} \right)_k = \frac{i_{k+1} - i_k}{t_{k+1} - t_k}. \quad (3)$$

Значение t_k определяем по формуле

$$t_k = \frac{k \Delta t}{N}. \quad (4)$$

Здесь Δt – промежуток времени измерения; N – число измерений на указанном промежутке времени.

Если число точек k достаточно велико и промежуток времени между ними мал, то выражения (2) и (3) можно приравнять:

$$\frac{u_k - R_0 i_k - R(i_k) i_k}{L_0 + L_1} = \left(\frac{\Delta i}{\Delta t} \right)_k. \quad (5)$$

Из (5) определим зависимость нелинейного сопротивления от тока:

$$R(i_k) = \frac{u_k - R_0 i_k - (L_0 + L_1) \left(\frac{\Delta i}{\Delta t} \right)_k}{i_k}. \quad (6)$$

Зависимости $R(i_k)$ при разном числе измерений N приведены на рис. 7. Как видно из рис. 7, при достаточно больших значениях N сопротивление $R(i)$ при токе, близком к нулю, также можно принять равным нулю.

Как показали исследования, в качестве аппроксимирующей эмпирической формулы целесообразно применить степенную функцию вида [16]:

$$RR(i) = \alpha i^\beta. \quad (7)$$

В этом случае ток электровоза будет представлен как источник тока, изменение которого будет не более 5% при изменении напряжения на токоприемнике от 24 до 29 кВ [2].

Коэффициенты аппроксимирующего выражения (7), при которых значения $RR(i)$ возможно мало бы отличались от опытных данных $R(i)$, показанных на рис. 7, найдем, используя метод наименьших квадратов. Поскольку метод наименьших квадратов разработан для линейных функций, то с помощью логарифмирования приведем функцию (7) к линейному виду:

$$\ln(RR(i)) = \ln(\alpha) + \beta \ln(i) \quad (8)$$

или

$$yy_k = a + bx_k, \quad (9)$$

где $yy_k = \ln(RR(i_k))$; $a = \ln(\alpha)$; $b = \beta$; $x_k = \ln(i_k)$; $y_k = \ln(R(i_k))$.

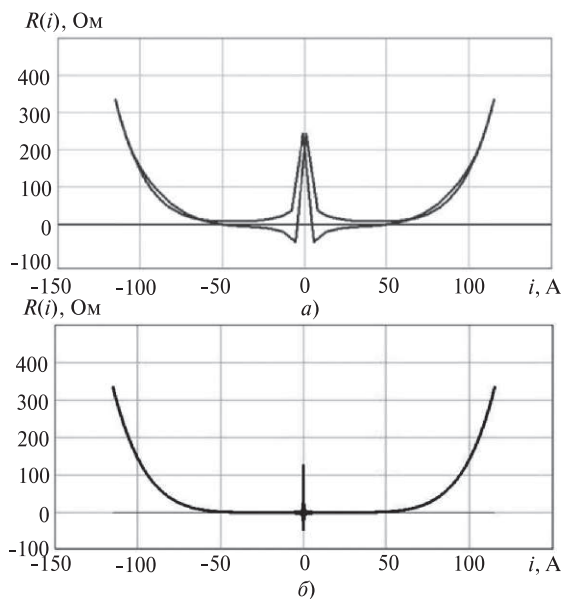


Рис. 7. Зависимость сопротивления нелинейного резистора от тока при числе измерений за один полупериод: $a - N = 2 \cdot 10^2$; $b - N = 10^4$

Затем находим сумму квадратов отклонений аппроксимирующего выражения и экспериментальных данных:

$$S = \sum_{k=1}^N (yy_k - y_k)^2 = \sum_{k=1}^N (a + bx_k - y_k)^2 = \min. \quad (10)$$

Приравняем производные выражения (10) по a и по b нулю и получим систему двух уравнений:

$$\frac{dS}{da} = \frac{d}{da} \sum_{k=1}^N (a + bx_k - y_k)^2 = \sum_{k=1}^N 2(a + bx_k - y_k) = 0; \quad (11)$$

$$\frac{dS}{db} = \frac{d}{db} \sum_{k=1}^N (a + bx_k - y_k)^2 = \sum_{k=1}^N 2x_k(a + bx_k - y_k) = 0. \quad (12)$$

Решая уравнения (11) и (12), найдем выражения для коэффициентов a и b аппроксимирующей формулы (7):

$$a = \frac{\left(\sum_{k=1}^N y_k \right) \left(\sum_{k=1}^N x_k^2 \right) - \left(\sum_{k=1}^N x_k \right) \left(\sum_{k=1}^N x_k y_k \right)}{N \sum_{k=1}^N x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^N x_k \right)^2}; \quad (13)$$

$$b = \frac{N \left(\sum_{k=1}^N x_k y_k \right) - \left(\sum_{k=1}^N x_k \right) \left(\sum_{k=1}^N y_k \right)}{N \sum_{k=1}^N x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^N x_k \right)^2}. \quad (14)$$

Коэффициенты аппроксимирующего выражения будут определяться как $\alpha = \exp(a)$; $\beta = b$. Данные для решения уравнений (13) и (14), полученные по формулам (6), (8) и (9):

i_k	$R(i_k)$	$x_k = \ln(i_k)$	$y_k = \ln(R(i_k))$
54,213	3,133	3,993	1,142
63,148	9,264	4,145	2,226
80,507	41,41	4,388	3,724
102,879	171,786	4,634	5,146
106,126	205,778	4,665	5,327
107,798	225,978	4,680	5,420

Особенность аппроксимации нелинейного резистора при включении его в цепь переменного тока состоит в том, что значение сопротивления при отрицательном значении тока не может быть отрицательным. Тогда в (7) следует использовать не ток, а модуль тока, и аппроксимирующее выражение примет вид:

$$RR(i) = \alpha |i|^\beta = 7,854 \cdot 10^{-11} |i|^{6,142}. \quad (15)$$

Для кривой, представленной на рис. 5 при решении уравнений (13) и (14) по данным шести точек, приведенным ранее, получено:

$$\alpha = 7,854 \cdot 10^{-11}; \quad \beta = 6,142.$$

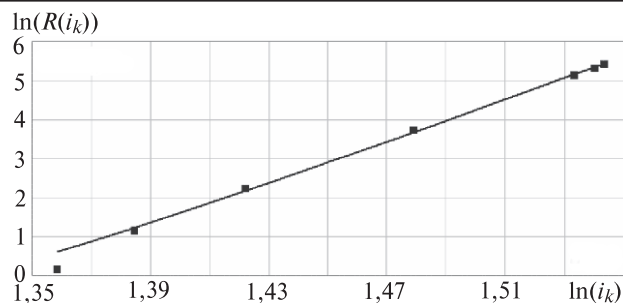


Рис. 8. Зависимость сопротивления нелинейного резистора от тока в логарифмическом масштабе: ■ ■ ■ — экспериментальная; — — аппроксимирующая

На рис. 8. приведены зависимости сопротивления нелинейного резистора от тока в логарифмическом масштабе.

На рис. 9 показаны две кривые зависимости сопротивления от тока: экспериментальная и рассчитанная по (15). Как видно из рис. 9, кривые практически совпадают. С экспериментальной совпадает и расчетная форма тока.

Результаты проведенного исследования подтверждают правомерность применения математической модели электровоза при проектировании новых и модернизации существующих тяговых сетей переменного тока.

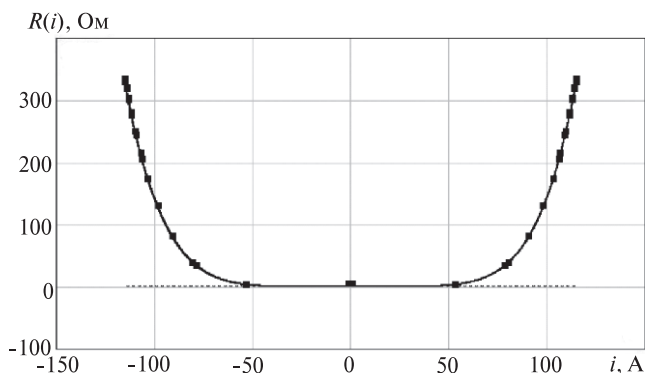


Рис. 9. Экспериментальная (■ ■ ■) и аппроксимирующая (—) зависимость сопротивления нелинейного резистора от тока

Эффективность разработки математической модели электровоза состоит в следующем.

1. Если после измерений гармоник представить цифровую модель системы тягового электроснабжения вместе с моделью электровоза как сумму источников гармоник (по [14] требуется учитывать 40 гармоник), то получится очень сложная и громоздкая модель для расчетов. Также модель усложняется при рассмотрении нескольких электровозов, находящихся в разных точках рассматриваемого участка электрифицированной железной дороги. В то же время расчеты резко упрощаются, если вместо набора всех гармоник применяется одна функция тягового тока, отражающая реальную форму кривой тока и реальный состав и содержание гармонических составляющих.

2. При изменении тяговой нагрузки форма тягового тока не изменяется и поэтому нет необходимости изменять коэффициенты модели тягового тока. При изменении тяговой нагрузки функция тока в модели ЭПС остаётся неизменной, меняется только коэффициент увеличения (уменьшения) тяговой нагрузки. В этом также проявляется упрощение расчетов с использованием предлагаемой модели ЭПС.

Выводы. 1. В связи с большим числом факторов в каждой конкретной межподстанционной зоне, влияющих на форму кривой тока тяговой нагрузки, следует на основе измерений реальной формы кривой тока формировать функцию тока тяговой нагрузки с использованием разработанной методики.

2. В первом приближении можно ориентироваться на две формы кривой тягового тока систем тягового электроснабжения переменного тока: на фидерах, питающих магистральные участки железных дорог и крупные железнодорожные станции.

3. Методика определения параметров модели ЭПС дает возможность применить разработанную математическую модель электроподвижного состава переменного тока, состоящую из последовательно соединенных индуктивности и нелинейного сопротивления для тяговой нагрузки с любым типом ЭПС.

4. Математическая модель ЭПС позволяет рассчитывать стационарные и нестационарные процессы в тяговой сети переменного тока с учетом несинусоидальной тяговой нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1983, 350 с.
2. Герман Л. А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. Учебное пос. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015, 315 с.
3. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками. — М.: Транспорт, 1965, 235 с.
4. Мамошин Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. — М.: Транспорт, 1973, 223 с.
5. Ермоленко Д.В. Показатели электромагнитной совместимости и методы её обеспечения в системе электрической тяги переменного тока: Дис.... док. техн. наук. — М.: ВНИИЖТ, 1999, 345 с.
6. Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. — М.: Энергия, 1972, 296 с.
7. Карякин Р.Н. Резонанс в тяговых сетях и его демпфирование. — М.: Высшая школа, 1961, 230 с.
8. Герман Л.А., Серебряков А.С., Ермоленко Д.В., Гончаренко В.П., Квашук В.А., Максимова А.А. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией высших гармонических составляющих в тяговых сетях переменного тока. — Вестник ВНИИЖТ, 2014, № 1, с. 47–54.
9. Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Цифровая модель фильтрокомпенсирующей установки с тяговой нагрузкой. — Электроника и электрооборудование транспорта, 2014, № 3, с. 9–14.
10. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. — М.: Транспорт, 1969, 135 с.

11. **Марквардт Г.Г.** Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения. — М.: Транспорт, 1972, 224 с.

12. **Косарев А.Б.** Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. — М.: Интекст, 2004, 272 с.

13. **Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Л.В.** Электромагнитные процессы в системах электроснабжения железных дорог переменного тока. — М.: ВМГ-Принт, 2015, 349 с.

14. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Госстандарт, 2012.

15. **Патент РФ** на полезную модель № 117691. Устройство для моделирования преобразовательного электровоза переменного тока/ А.С.Серебряков, Л.А. Герман, Д.Е. Дулепов, Д.А. Семенов. — БИ, 2012, № 18.

16. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике. — Гос. изд-во физико-математической литературы, 1969, 608 с.

[18.05.2016]

А в т о р ы: **Серебряков Александр Сергеевич** окончил электротехнический факультет Нижегородского государственного технического университета в

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 8, pp. 37–46.

1961 г. В 2000 г. в Московском государственном университете путей сообщения (МГУПС) защитил докторскую диссертацию «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». Профессор Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения (НФ МГУПС).

Герман Леонид Абрамович окончил факультет «Электрификация железнодорожного транспорта» Московского института инженеров железнодорожного транспорта в 1954 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации» во Всесоюзном научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта. Профессор НФ МГУПС.

Максимова Александра Альбертовна окончила Иркутский государственный университет путей сообщения в 2008 г. Ведущий инженер ГК «Таврида Электрик».

Shaping the Traction Load Current Waveform in the Digital Model of a Railway Traction Power Supply System

SEREBRYAKOV Aleksandr Sergueyevich (Nizhnii Novgorod Branch of the Moscow State University of Railway Transport (NNB MSURT), Nizhnii Novgorod, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

GERMAN Leonid Abramovich (NNB MSURT, Nizhnii Novgorod, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

MAKSIMOVA Aleksandra Al'bertovna (Company «Tavrida Elektrik», Nizhnii Novgorod, Russia) — Leading Engineer

The waveform and harmonic components of the traction load current are studied experimentally for traction substations used in a 27 kV traction power supply system. It is shown that the obtained results differ in the general case from the traction load supposed in the electrically driven rolling stock model based on the double half-period rectification arrangement. A traction load mathematical model is proposed that is based on the electric locomotive load represented by an equivalent circuit comprising a reactor connected in series with a nonlinear resistor. The form of the approximating expression for the nonlinear resistor and its parameters are determined using experimentally recorded oscillograms and analytical expressions for the electric locomotive digital model. A dependence for the nonlinear resistor's resistance as a function of current is obtained from the equality of current derivatives and their increments at each point. It is shown that a power function is best suited for approximating this dependence. An algorithm for determining the approximating expression parameters from digitized experimental oscillograms of current and voltage in the traction network using the least squares method is presented. By using the proposed mathematical model of the AC power supply system traction load, as well as the approximating expression for the nonlinear resistor's resistance included in this model and the procedure for determining its coefficients, it becomes possible to represent steady and unsteady processes in the AC traction network in the most accurate manner taking into account the traction load.

Key words: traction load, AC electric locomotive, current, harmonic components, digital model

REFERENCES

1. **Borodulin B.M., German L.A., Nikolayev G.A.** Kondensatornye ustanovki elektrofizirovannykh zheleznykh dorog (Condenser installation of electrified railways). Moscow, Publ. «Transport», 1983, 350 p.

2. **German L.A., Serebryakov A.S.** Reguliruyemye ustanovki emkostnoi kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog (Adjustable installation capacitive compensation in

traction power system of railways). Moscow, The training centre for education on railway transport, 2015, 315 p.

3. **Tamazov A.I.** Nesimmetriya tokov i napryazhenii vyzyvayemaya odnofaznymi tyagovymi nagruzkami (The asymmetry of the currents and voltages caused by single-phase traction loads), 1965, 235 p.

4. **Mamoshin R.R.** Povysheniye kachestva energii na tyagovykh podstantsiyakh dorog peremennogo toka (Improving the quality of energy to traction substations AC roads). Moscow, Publ. «Transport», 1973, 223 p.

5. **Yermolenko D.V.** *Pokazateli elektromagnitnoi sovmestimosti i metody yeye obespecheniya v sisteme elektricheskoi tyagi peremennogo toka* (Indicators and methods for electromagnetic compability of its software in a system of electric traction AC). Diss. for the Degree of Dr. Sci. (Eng.). Moscow, VNIIZhT, 1999, 345 p.
6. **Timofeyev D.V.** *Rezhimy v elektricheskikh sistemakh s tyagovymi nagruzkami* (Modes of electrical systems with traction loads). Moscow, Publ. «Energia», 1972, 296 p.
7. **Karyakin R.N.** *Rezonans v tyagovykh setyakh i ego dempfirovaniye* (Resonance in traction networks and damping). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1961, 230 p.
8. **German L.A., Serebryakov A.C., Yermolenko D.V., Goncharenko V.P., Kvashchuk V.A., Maksimova A.A.** *Vestnik VNIIZhT – in Russ. (Bulletin of All Russian Scientific and Research Institute of Railway Transport)*, 2014, No. 1, pp. 47–54.
9. **German L.A., Serebryakov A.S., Maksimova A.A.** *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta – in Russ. (Electronics and Electrical Transport)*, 2014, No. 3, pp. 9–14.
10. **Pravila zashchity ustroystv provodnoi svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoi seti elektrofisirovannykh zhelesnykh dorog peremennogo toka** (Rules protection of wire communication and wire broadcasting from the influence of electrified railway traction network AC road). Moscow, Publ. «Transport», 1096, 135 p.
11. **Markvardt G.G.** *Primeneniye teorii veroyatnostei i vychislitel'noi tekhniki v sisteme energosnabzheniya* (Application of probability theory and computer technology in power supply systems). Moscow, Publ. «Transport», 1972, 224 p.
12. **Kosarev A.B.** *Osnovy teorii elektromagnitnoi sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka* (Basic theory of electromagnetic compability tranction power AC systems). Moscow, Publ. «Intekst», 2004, 272 p.
13. **Kosarev A.B., Kosarev B.I., Serbinenko L.V.** *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya zhelesnykh dorog peremennogo toka* (Electromagnetic processes in AC railway power supply systems). Moscow, Publ. «VMG-Print», 2015, 349 p.
14. **GOST 32144-2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya.* (Electric energy. Electromagnetic compability of technical means. Power quality limits in general type of power supply systems). Moscow, «Gosstandart», 2012.
15. **Patent RF** na poleznuyu model No. 117691. *Ustroystvo dlya modelirovaniya preobrazovatel'nogo elektrovoza peremennogo toka* (Utility patent No. 117691 (RF) A device for simulating of AC converter locomotive). Bulletin of inventions, 2012, No. 18.
16. **Bronstein I.N., Semendiyayev K.A.** *Spravochnik po matematike* (Hand-book of Mathematics). Moscow, State Publ. House of Physical and Mathematical Literature, 1969, 608 p.