

УДК 629.423.1: 621.333

Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока

А. А. Зарифьян¹, А. М. Евстафьев²

¹ООО «ТМХ Инжиниринг», Российская Федерация, 141009, Мытищи, ул. Колонцова, 4

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Зарифьян А. А., Евстафьев А. М. Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 987–998. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998

Аннотация

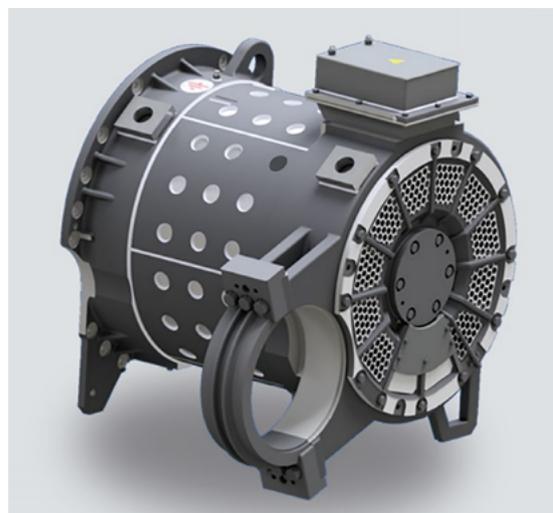
Цель: Провести экспериментальное исследование показателей качества потребления электрической энергии для серийно выпускаемых грузовых электровозов переменного тока 2(3)ЭС5К с коллекторным тяговым приводом и электровозов 2(3)ЭС5С с асинхронным тяговым приводом, дать их сопоставление и сравнительный анализ. **Методы:** Приведены основные технические характеристики коллекторного ТЭД НБ-514Е и асинхронного ТЭД ДТА-1100. Предложена схема измерений напряжения и тока на сетевой обмотке трансформатора. Мониторинг параметров выполнен непосредственно на электровозах с помощью специального метрологического оборудования. Обработка экспериментальных данных основана на разложении исходного сигнала на гармонические составляющие при помощи быстрого преобразования Фурье (FFT). **Результаты:** Получены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник. Выполнен анализ спектрального состава напряжения и тока. Сравнительный анализ результатов, полученных для электровозов с коллекторным и асинхронным тяговыми приводами в режиме тяги, показал, что коэффициент мощности составляет 0,65 и 0,99 соответственно; а коэффициент нелинейных искажений тока — 0,53 и 0,15. Сделан вывод о гораздо более высоком качестве потребления электрической энергии в асинхронном тяговом приводе. **Практическая значимость:** Основываясь на полученных конкретных значениях показателей качества потребления электрической энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах в режиме тяги, можно перейти к получению экономических оценок перевода локомотивного парка ОАО «РЖД» на электровозы нового поколения серии 2(3)ЭС5С.

Ключевые слова: грузовой электровоз переменного тока, коллекторный тяговый привод, асинхронный тяговый привод, экспериментальное исследование качества потребления электрической энергии.

Введение

Проблема повышения энергетической эффективности и качества потребления электрической энергии тягового подвижного состава постоянно находится в центре внимания [1, 2]. Причиной этого является чрезвычайно высокий уровень расходов на приобретение топливно-энерге-

тических ресурсов (ТЭР). Годовые суммарные затраты ОАО «РЖД» на закупку ТЭР превышают 300 млрд рублей [3]. Добавим к сказанному, что закупки ТЭР осуществляются по рыночным ценам, в результате чего, например, в 2019 году затраты на их приобретение в денежном исчислении увеличились на 3,9 %, тогда как объем потре-

*а**б*Рис. 1. Коллекторный ТЭД НБ-514Е (*а*) и асинхронный ТЭД ДТА-1100 (*б*)

бления ТЭР в натуральном выражении (в пересчете на условное топливо) снизился на 0,9 %.

Грузовые электровозы переменного тока первого поколения ВЛ60 и ВЛ80 [4, 5] имели силовую электрическую схему, состоящую из тягового трансформатора, выпрямителя на диодах, сглаживающих реакторов и коллекторных тяговых электродвигателей (ТЭД) пульсирующего тока с последовательным возбуждением. Напряжение на ТЭД изменялось ступенчато.

Следующее поколение, а именно выпускаемые серийно с 2005 года электровозы 2(3)ЭС5К семейства «Ермак» [6], отличается наличием управляемого выпрямительно-инверторного преобразователя. Благодаря этому удалось реализовать плавное регулирование напряжения на ТЭД, что благоприятно сказалось на тяговых свойствах. Электровозы переменного тока с коллекторными ТЭД пульсирующего тока с последовательным возбуждением остаются наиболее распространенными локомотивами на путях РЖД. Основными недостатками тягового электропривода электровозов этих серий являются значительное потребление реактивной мощности, искажение формы напряжения и тока в первичной обмотке тягового

трансформатора, появление значительных гармонических составляющих тока в контактной сети. Изучению процессов в коллекторном тяговом приводе, в том числе методами математического моделирования, посвящены работы [7–10].

В настоящее время на смену локомотивам с коллекторными ТЭД приходит техника нового поколения, оснащенная асинхронным тяговым приводом [11], достоинства которого в целом общепризнаны, однако дискуссии по этому поводу продолжаются [12]. Коллекторный ТЭД НБ-514Е показан на рисунке 1, *а*, асинхронный ТЭД ДТА-1100 — на рис. 1, *б*.

Основные технические характеристики этих ТЭД приведены в табл. 1 и 2.

Следует отметить, что в отраслевой технической литературе отсутствуют результаты прямых сравнительных экспериментальных исследований тяговых приводов с коллекторными и асинхронными ТЭД отечественного производства. В настоящей работе рассматривается задача экспериментального получения показателей качества потребления электрической энергии в коллекторном и асинхронном тяговом приводе, их сопоставление и сравнительный анализ.

Таблица 1. Основные технические характеристики ТЭД НБ-514Е

Параметры	Режим работы	
	продолжительный	часовой
Мощность на валу, кВт	765	820
Частота вращения, об/мин	940	920
Масса, кг	4350	
Удельная мощность, кВт/кг	0,176	0,189
Передаточное число тягового редуктора	88/21 = 4,19	

Таблица 2. Основные технические характеристики ТЭД ДТА-1100

Параметры	Режим работы		
	Продолжительный	Часовой	30-минутный
Мощность на валу, кВт	1050	1100	1300
Частота вращения, об/мин	1634	1337	1782
Масса, кг	2200		
Удельная мощность, кВт/кг	0,477	0,5	0,59
Передаточное число тягового редуктора	121/18 = 6,72		

Схема измерения напряжения и тока

Ниже приведены результаты исследований процессов в 1) тяговом приводе электровоза 2(3) ЭС5К с коллекторным ТЭД пульсирующего тока НБ-514Е и 2) тяговом приводе электровоза 2(3) ЭС5С с асинхронным ТЭД ДТА-1100.

Мониторинг параметров систем тягового подвижного состава выполнен непосредственно на электровозах с помощью специального метрологического оборудования. Измерение тока и напря-

жения в ходе испытаний производилось по схеме, показанной на рис. 2: измерительный трансформатор напряжения расположен на сетевой обмотке тягового трансформатора, бесконтактный датчик тока основан на эффекте Холла, сигналы поступают на вход АЦП измерительного комплекса. Частота дискретизации составляет 0,5 мс.

Мгновенные и действующие значения тока и напряжения во входной цепи электровоза регистрируются при помощи измерительного ком-

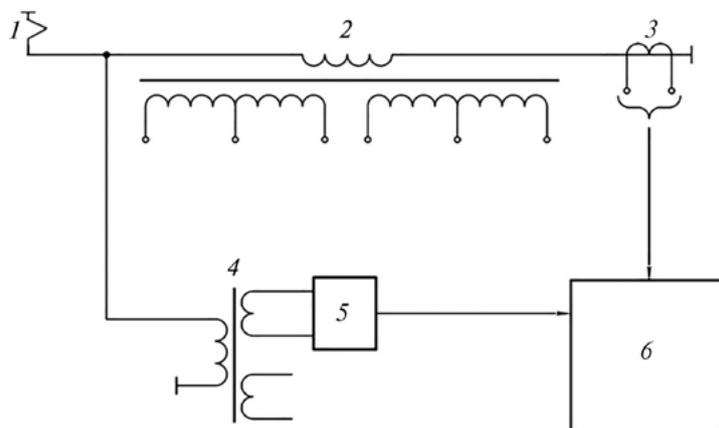


Рис. 2. Схема измерений:

1 — контактная сеть; 2 — тяговый трансформатор; 3 — датчик тока; 4 — измерительный трансформатор напряжения; 5 — датчик напряжения; 6 — измерительный комплекс

плекса и для выполнения последующих расчетов сохраняются в форме текстовых таблиц в функции времени.

Обработка экспериментальных данных

Предметом дальнейшего рассмотрения являются записи периодических несинусоидальных токов и напряжений. Несинусоидальные периодические напряжения и токи могут быть представлены как сумма членов ряда Фурье, полученных методом FFT [13, 14]:

$$\begin{cases} u(t) = U_0 + U_{1m} \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + \\ + U_{2m} \cos(\omega_2 t + \alpha_2) + \dots, \\ i(t) = I_0 + I_{1m} \cos(\omega_1 t + \beta_1) + \\ + I_{2m} \cos(\omega_2 t + \beta_2) + \dots \end{cases} \quad (1)$$

где U_{im} , I_{im} — амплитудные значения.

Действующие значения гармоник напряжения и тока находим как

$$U_{im} = \frac{U_{im}}{\sqrt{2}}, \quad I_{im} = \frac{I_{im}}{\sqrt{2}}.$$

Сдвиг фаз равен $\varphi_i = \alpha_i - \beta_i$, если ток отстает от напряжения, то сдвиг фаз считается положительным, если опережает — отрицательным.

Действующее значение несинусоидального напряжения и тока находим как корень квадратный из суммы квадратов действующих значений гармонических составляющих:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}, \\ I &= \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}. \end{aligned} \quad (2)$$

Активная мощность P — это количество энергии, потребляемое (генерируемое) объектом в единицу времени. Математически активную мощность определяют как среднее значение мгновенной мощности за полный период, ее часто называют просто электрической мощностью:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (3)$$

Активная мощность периодического несинусоидального тока, Вт, равна сумме активных мощностей отдельных гармоник:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots \quad (4)$$

Активная мощность характеризует скорость необратимого превращения электрической энергии в другие виды энергии (тепловую и электромагнитную). Активная мощность гармоники в составе несинусоидального тока может быть как положительна, так и отрицательна.

Реактивная мощность — величина, характеризующая нагрузки, создаваемые в электротехнических устройствах колебаниями энергии электромагнитного поля в цепи, равна:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + U_3 I_3 \sin \varphi_3 + \dots \quad (5)$$

Физический смысл реактивной мощности — это энергия, перекачиваемая от источника на реактивные элементы приемника (индуктивности, конденсаторы, обмотки двигателей), а затем возвращаемая этими элементами обратно в источник в течение одного периода колебаний, отнесенная к этому периоду. Единица измерения реактивной мощности является ВАр (вольт-ампер реактивный).

Отметим, что $\sin \varphi$ для значений φ от 0 до $+90^\circ$ является положительной величиной, тогда как $\sin \varphi$ для значений φ от 0 до -90° является отрицательной величиной. Мощность гармоник в составе несинусоидального тока может быть как положительна (если нагрузка имеет активно-индуктивный характер), так и отрицательна (если нагрузка имеет активно-емкостный характер). Когда устройство имеет положительную реактивную мощность, то принято говорить, что оно ее

потребляет, а когда отрицательную — то производит (генерирует).

Полная мощность S равна произведению действующего значения несинусоидального напряжения и действующего значения несинусоидального тока. Единица измерения — *вольт-ампер* (В·А).

$$S = U \cdot I, \quad (6)$$

где $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}$,

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}.$$

Для цепей *несинусоидального тока* соотношение $S^2 = P^2 + Q^2$ между мощностями выполняется только для резистивных элементов, у которых в соответствии с законом Ома формы кривых функций $u(t)$ и $i(t)$ идентичны.

Если же в цепи содержатся реактивные элементы L и C , то это соотношение не выполняется: $S^2 \geq P^2 + Q^2$.

Для баланса этого уравнения в его правую часть вносят добавление T :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + T^2, \quad (7)$$

где T — мощность искажения, которая характеризует степень различия в формах кривых напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$.

Полная мощность имеет практическое значение, как величина, описывающая нагрузки, фактически налагаемые потребителем на элементы подводящей электросети (провода, кабели, распределительные щиты, трансформаторы, линии электропередачи), так как эти нагрузки зависят от потребляемого тока, а не от фактически использованной потребителем энергии. Именно поэтому полная мощность трансформаторов и распределительных щитов измеряется в вольт-амперах, а не в ваттах.

В случае несинусоидального характера тока потребитель электрического тока характеризу-

ется не значением $\cos \varphi$, а *коэффициентом мощности* χ :

$$\chi = \frac{P}{S}. \quad (8)$$

Коэффициент нелинейных искажений тока (THD — *Total Harmonic Distorsions*) равен отношению действующего значения суммы гармоник искажений к действующему значению основной гармоники:

$$THD = \frac{\sqrt{I_0^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1}. \quad (9)$$

Энергия

Расчет электрической энергии, кВт · ч, потребляемой электровозом, производится с учетом полной мощности электрического тока, проходящего через измеряемую цепь (рис. 2). Активная энергия вычисляется как интеграл от активной мощности (4) по времени, реактивная энергия — как интеграл от реактивной мощности (5) по времени, полная энергия — как интеграл от полной мощности (6) по времени.

Таким образом, при обработке экспериментальных данных исходный сигнал прежде всего представляется как разложение на гармонические составляющие при помощи быстрого преобразования Фурье (FFT). Затем, в соответствии с представленными выше формулами, определяется активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, коэффициент нелинейных искажений.

Анализ процессов в коллекторном приводе в режиме тяги

Тяговая система электровоза семейства «Ермак» включает трансформатор, тиристорный выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП), сглаживающий реактор и коллекторный тяговый двигатель пульсирующего тока [6].

Таблица 3. Параметры гармоник (коллекторный привод)

i	$f=0,2i$	$U(i)$	$I(i)$	$U_{\text{phase}}(i)$	$I_{\text{phase}}(i)$	$\varphi(i)$	$P(i)$	$Q(i)$
0	0,00	62,78	0,03	0,00	3,14	-3,14	2,06	0,00
250	50,00	28 327,46	50,95	0,32	-0,41	0,73	1 071 649	966 977
750	150,00	462,57	23,18	1,60	2,82	-1,22	3714,20	-10 059,4
1250	250,00	555,46	12,07	-2,00	0,02	-2,02	-2918,10	-6033,93
1750	350,00	579,99	3,96	1,42	-3,13	4,55	-363,96	-2267,75
2250	450,00	227,02	3,84	-2,47	-0,92	-1,55	18,06	-872,47
2750	550,00	448,06	4,39	0,14	2,52	-2,39	-1434,27	-1345,58
3250	650,00	496,60	2,54	-2,15	-0,08	-2,07	-604,54	-1109,75
3750	750,00	138,51	0,30	-2,77	-2,93	0,16	41,30	6,69
4250	850,00	355,09	1,13	1,95	-1,54	3,49	-376,18	-135,76
4750	950,00	32,22	1,53	-1,95	2,62	1,71	-7,05	48,91

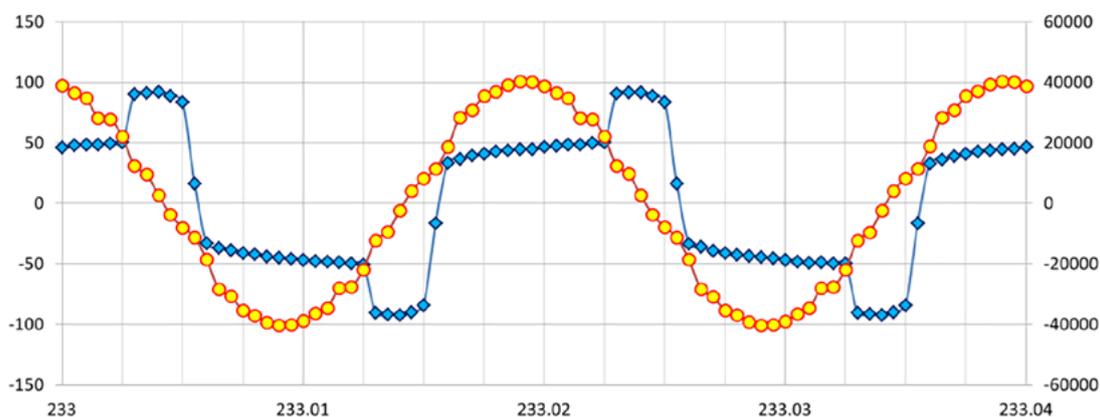


Рис. 3. Мгновенные значения напряжения, В (красная линия, правая шкала) и тока, А (синяя линия, левая шкала) в сетевой обмотке трансформатора в зависимости от времени, с

В табл. 3 приведены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник, полученные путем обработки экспериментальных данных.

В табл. 3 и 5 приняты следующие обозначения:

i — номер гармоники;

$f=0,2i$ — частота гармоники, Гц;

$U(i)$ — напряжение, В;

$I(i)$ — ток, А;

$U_{\text{phase}}(i)$ — фаза гармоники напряжения, рад;

$I_{\text{phase}}(i)$ — фаза гармоники тока, рад;

$\varphi(i)$ — сдвиг фаз гармоник напряжения и тока, рад;

$P(i)$ — активная мощность, Вт;

$Q(i)$ — реактивная мощность, ВАр.

Основные гармоники напряжения и тока (выделены в табл. 3 жирным шрифтом) имеют частоту 50 Гц. Из табл. 3 получаем, что сдвиг фаз основных гармоник напряжения и тока составляет:

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1 = 0,323 - (-0,411) = 0,734 \text{ рад,}$$

откуда $\cos \varphi_1 = 0,742$.

Диаграммы напряжения и тока в сетевой обмотке трансформатора показаны на рис. 3. Как видно, кривая напряжения близка к синусоидальной. Кривая тока является периодической, но несинусоидальной, что обусловлено процессами, вызванными коммутацией тиристорного тягового выпрямительно-инверторного преобразователя.

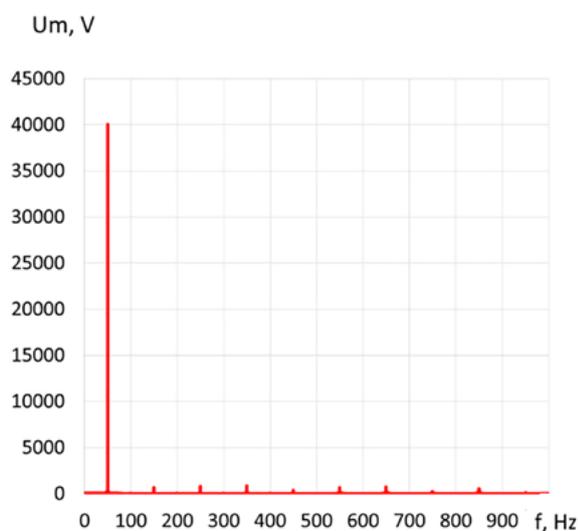


Рис. 4. Спектральный состав напряжения

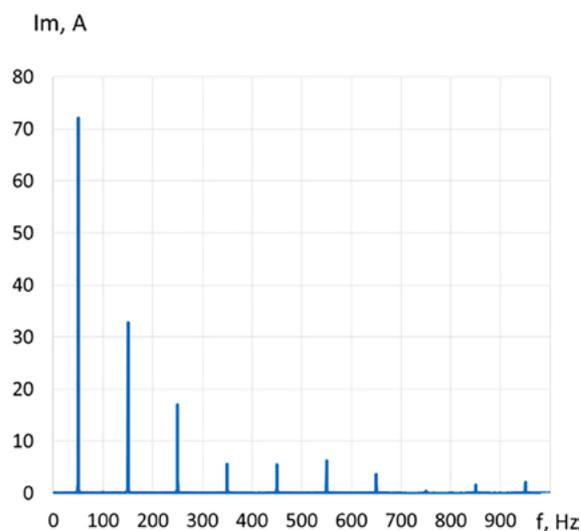


Рис. 5. Спектральный состав тока

Таблица 4. Параметры работы коллекторного привода

Активная мощность, P	кВт	1069,72
Реактивная мощность, Q	кВАр	945,208
Полная мощность, S	кВА	1638,49
Коэффициент мощности, χ	—	0,65287
Коэффициент нелинейных искажений тока, THD	—	0,53491

Спектральный состав напряжения показан на рис. 4, он близок к синусоидальному. Спектральный состав тока (рис. 5) является гораздо более сложным. Параметры работы коллекторного привода в режиме тяги представлены в табл. 4.

Как видно из вышеизложенного, в режиме тяги электровозов с ВИП основная гармоника сетевого тока значительно отстает от основной гармоники сетевого напряжения. Такие электровозы в тяговом режиме являются генераторами реактивной энергии, что снижает коэффициент мощности и приводит к искажению формы напряжения, а следовательно, и формы тока сети. Снижение коэффициента мощности вызывает увеличение тока, потребляемого электровозом, приводя к дополнительным потерям в тяговой сети и уменьшению КПД системы в целом [15, 16].

Анализ процессов в асинхронном приводе в режиме тяги

Электровозы 2(3)ЭС5С имеют асинхронный тяговый привод в составе: трансформатор, тяговый преобразователь (входной $4qs$ -преобразователь, звено постоянного тока и автономный инвертор напряжения), асинхронный ТЭД [17].

В табл. 5 приведены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник. Параметры основной гармоники частотой 50 Гц выделены жирным шрифтом.

Из табл. 5 получаем, что сдвиг фаз основных гармоник напряжения и тока составляет:

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1 = -0,73 - (-0,74) = 0,01 \text{ рад,}$$

откуда $\cos \varphi_1 = 0,99995$.

Таблица 5. Параметры гармоник (асинхронный привод)

i	$f = 0,2i$	$U(i)$	$I(i)$	$U_{\text{phase}}(i)$	$I_{\text{phase}}(i)$	$\varphi(i)$	$P(i)$	$Q(i)$
0	0,00	66,70	0,29	0,00	0,00	0,00	19,47	0,00
250	50,00	26969,17	49,78	-0,73	-0,74	0,00	1342524	4117,8
750	150,00	445,67	3,17	-1,85	-2,43	0,58	1181,63	778,29
1250	250,00	495,03	3,37	-0,74	-1,16	0,43	1518,07	690,00
1750	350,00	364,93	2,09	0,36	-0,85	1,21	265,51	713,07
2250	450,00	150,45	0,85	1,57	0,28	1,29	35,80	123,06
2750	550,00	207,74	0,68	2,13	0,83	1,30	37,93	136,63
3250	650,00	221,47	0,60	2,94	1,44	1,50	9,17	131,90
3750	750,00	85,78	0,25	-2,48	2,78	-5,26	11,39	18,62
4250	850,00	193,56	0,30	-3,14	1,75	-4,89	10,34	56,60
4750	950,00	99,15	0,23	-2,77	2,00	1,52	1,11	22,64

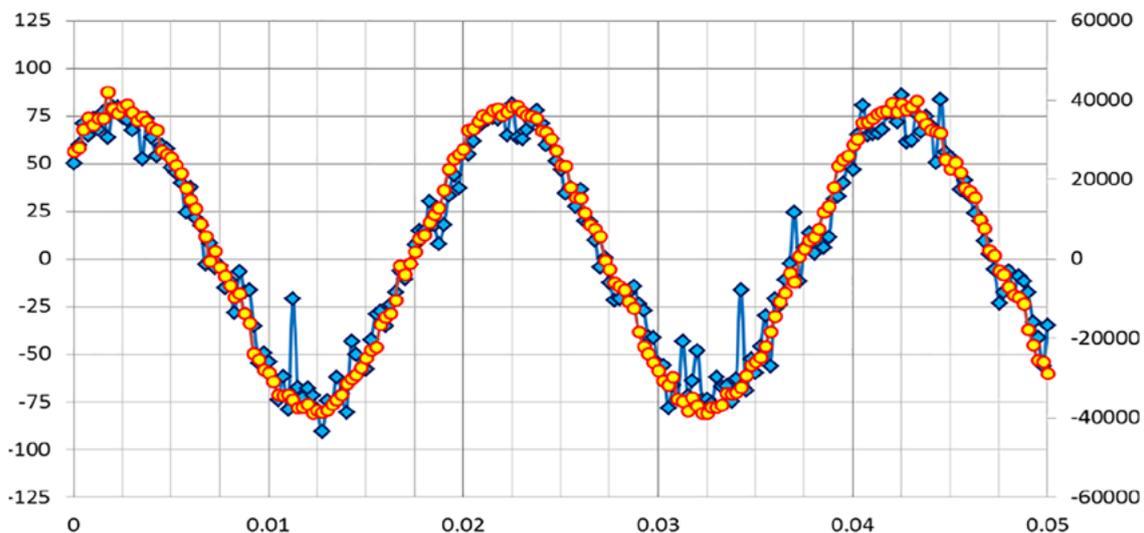


Рис. 6. Мгновенные значения напряжения, В (красная линия, правая шкала) и тока, А (синяя линия, левая шкала) в сетевой обмотке трансформатора в зависимости от времени, с

Таблица 6. Параметры работы асинхронного привода

Активная мощность, P	кВт	1347,35
Реактивная мощность, Q	кВАр	7,56
Полная мощность, S	кВА	1359,63
Коэффициент мощности, χ	—	0,99
Коэффициент нелинейных искажений тока, THD	—	0,153

Диаграммы напряжения и тока в сетевой обмотке трансформатора показаны на рис. 6. Как видно, кривые напряжения и тока близки и являются практически синусоидальными, за исключением отдельных выбросов.

Спектральный состав напряжения показан на рис. 7, спектральный состав тока — на рис. 8 (ср. с рис. 4 и 5). Параметры работы асинхронного привода в режиме тяги представлены в табл. 6.

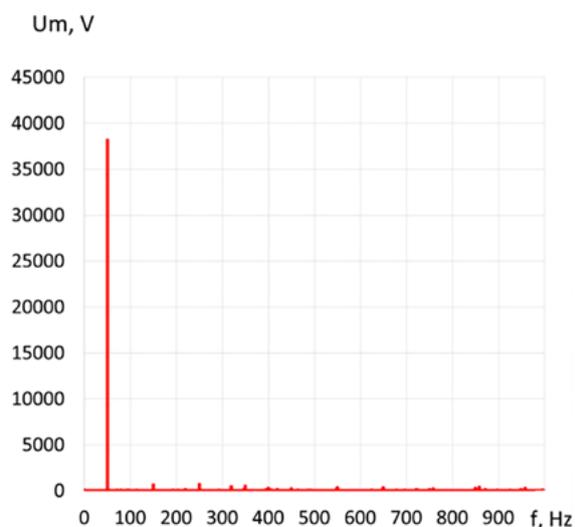


Рис. 7. Спектральный состав напряжения

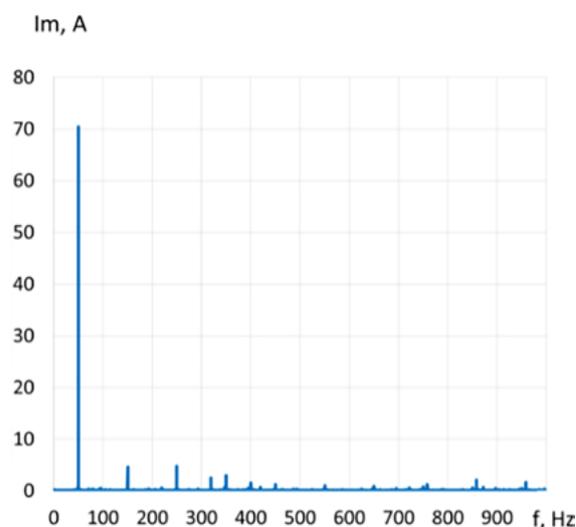


Рис. 8. Спектральный состав тока

Заключение. Анализ результатов

Выполнено экспериментальное исследование качества потребления электрической энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах серийно выпускаемых электровазов переменного тока. Проведены измерения напряжения и тока на первичной обмотке трансформатора в режиме тяги. Обработка экспериментальных данных основана на разложении исходного сигнала на гармонические составляющие при помощи быстрого преобразования Фурье. Получены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник. Изучен спектральный состав напряжения и тока.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что коэффициент мощности асинхронного привода составляет $\chi = 0,99$, что значительно выше по сравнению с $\chi = 0,65$ у коллекторного привода. Коэффициент нелинейных искажений тока асинхронного привода равен $THD = 0,15$, по сравнению с $THD = 0,53$ у коллекторного.

Поскольку коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой электровазова и характеризует увеличение нагрузки

контактной сети и устройств энергоснабжения, количественно подтвержден вывод о гораздо более высокой эффективности процесса преобразования электрической энергии в асинхронном тяговом приводе серийно выпускаемых электровазов, при работе в режиме тяги. Аналогичное заключение можно сделать и по коэффициенту нелинейных искажений тока, который является количественной мерой искажений тока, вызванных работой тягового преобразователя.

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авиллов, Б. А. Аржанников и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: МИСиС, 2012. — 620 с.
2. Brecher A. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports / A. Brecher, J. Sposato, B. Kennedy // Office of Research and Development. Washington, DC 20590. — Report number: DOT/FRA/ORD-14/02. — 28 Jan. 2014.
3. URL: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>.
4. Дубровский З. М. Электровазы ВЛ60к и ВЛ60пк / З. М. Дубровский, Л. М. Лорман. — М.: Транспорт, 1993. — 400 с.

5. Николаев А. О. Устройство и работа электровоза ВЛ80с / А. О. Николаев, Н. В. Сесявин. — М.: Маршрут, 2006. — 512 с.
6. Осинцев И. А. Устройство, эксплуатация и ремонт электровозов серии 2ЭС5К / И. А. Осинцев, А. А. Логинов. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2014. — 465 с.
7. Никитенко А. Г. Математическое моделирование динамики электровозов / А. Г. Никитенко, Е. М. Плохов, А. А. Зарифьян и др. — М.: Высшая школа, 1998. — 274 с.
8. Литовченко В. В. Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя / В. В. Литовченко, Д. В. Кокорин, Д. В. Назаров // *Электротехника*. — 2014. — № 8. — С. 22–29.
9. Литовченко В. В. Имитационная модель электровоза постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями / В. В. Литовченко, Д. В. Назаров, В. А. Шаров // *Электротехника*. — 2019. — № 9. — С. 60–66.
10. Ягуп В. Г. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. — 2017. — Вип. 170. — С. 20–31.
11. Kolpakchyan P. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive / P. Kolpakchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko // *Rail Transport — Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control*. — 2017. — Vol 87. Springer, Cham. — DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.
12. Власьевский С. В. Сравнение энергетической эффективности тягового электропривода электровозов переменного тока на основе коллекторных и асинхронных двигателей / С. В. Власьевский, В. А. Кучумов, В. Г. Щербаков // *Электротехника*. — 2017. — № 9. — С. 72–78.
13. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. — М.: Гардарики, 2007. — 701 с.
14. Chen W. K. *The Electrical Engineering Handbook* / W. K. Chen. — Academic Press, 2004. — 1018 p.
15. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока / А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2013. — № 1. — С. 22–30.
16. Зак В. В. Перспективные способы повышения энергетической эффективности электровозов переменного тока / В. В. Зак, С. А. Старовойтов, И. Ю. Мартынюк // *Железнодорожный транспорт*. — 2022. — № 9. — С. 40–44.
17. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // *Техника железных дорог*. — 2020. — № 1(49). — С. 10–13.

Дата поступления: 15.10.2023

Решение о публикации: 13.11.2023

Контактная информация:

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт; zarifyan.alexander@gmail.com
ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — д-р техн. наук, проф.; зав. кафедрой «Электрическая тяга»; evstam@mail.ru

Energy Consumption Quality Indicators in Collector and Asynchronous Traction Drives of AC Electric Locomotives

A. A. Zarifyan¹, A. M. Evstafev²

¹ “TMH Engineering” LLC, 4, Kolontsova str., Mytishchi, Moscow Region, 141009, Russian Federation

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Zarifyan A. A., Evstafev A. M. Energy Consumption Quality Indicators in Collector and Asynchronous Traction Drives of AC Electric Locomotives // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 987–998. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998

Summary

Purpose: To conduct an experimental study of the indicators of electrical energy consumption quality for serially produced freight electric locomotives of alternating current 2(3)ES5K with a collector traction drive and electric locomotives 2(3)ES5S with an asynchronous traction drive, to provide their comparison and comparative analysis. **Methods:** The main technical characteristics of the collector traction electric drive (TED) NB-514E and asynchronous TED DTA-1100 are presented. A measurement scheme for voltage and current on the power winding of the transformer is proposed. The monitoring of parameters has been carried out directly on electric locomotives using specialized metrological equipment. The processing of experimental data is based on decomposing the original signal into harmonic components using Fast Fourier Transform (FFT). **Results:** Parameters of voltage and current harmonics, phase shifts, as well as the values of active and reactive power of the corresponding harmonics have been obtained. An analysis of the spectral composition of voltage and current has been performed. Comparative analysis of the results obtained for electric locomotives with collector and asynchronous traction drives in traction mode has shown that the power factor is 0.65 and 0.99, respectively; and the coefficient of non-linear current distortions is 0.53 and 0.15. A conclusion has been drawn regarding significantly higher quality of electrical energy consumption in the asynchronous traction drive. **Practical significance:** Based on the specific values of the indicators of electrical energy consumption quality in collector and asynchronous traction drives in traction mode, it is possible to proceed to obtaining economic assessments for the transition of the locomotive fleet of Russian Railways (JSCo “RZD”) to next-generation electric locomotives of the 2(3)ES5S series.

Keywords: Freight alternating current electric locomotive, collector traction drive, asynchronous traction drive, experimental study of the quality of electrical energy consumption.

References

1. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. et al. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012, 620 p. (In Russian)
2. Brecher A., Sposato J., Kennedy B. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports. Office of Research and Development. Washington, DC 20590. Report number: DOT/FRA/ORD-14/02, 28 Jan. 2014.
3. Available at: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>.
4. Dubrovskiy Z. M., Lorman L. M. *Elektrovozy VL60k i VL60pk* [Electric locomotives VL60k and VL60pk]. Moscow: Transport Publ., 1993, 400 p. (In Russian)
5. Nikolaev A. O., Sesyavin N. V. *Ustroystvo i rabota elektrovoza BL80s* [Design and operation of the electric locomotive VL80s]. Moscow: Marshrut Publ., 2006, 512 p. (In Russian)
6. Osintsev I. A., Loginov A. A. *Ustroystvo, ekspluatatsiya i remont elektrovozov serii 2ES5K* [Design, operation

and repair of electric locomotives of the 2ES5K series]. Moscow: OAO “Rossiyskie zheleznye dorogi”, 2014, 465 p. (In Russian)

7. Nikitenko A. G., Plokhov E. M., Zarif’yan A. A. et al. *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki elektrovozov* [Mathematical modeling of the dynamics of electric locomotives]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1998, 274 p. (In Russian)

8. Litovchenko V. V., Kokorin D. V., Nazarov D. V. *Matematicheskaya model’ kollektornogo tyagovogo elektrodvigatelya* [Mathematical model of a commutator traction electric motor]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2014, Iss. 8, pp. 22–29. (In Russian)

9. Litovchenko V. V., Nazarov D. V., Sharov V. A. *Imitatsionnaya model’ elektrovoza postoyannogo toka s kollektornymi tyagovymi dvigatelyami* [Simulation model of a direct current electric locomotive with commutator traction motors]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2019, Iss. 9, pp. 60–66. (In Russian)

10. Yagup V. G., Krasnov A. A. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivoda elektrovoza 2EL5 v rezhime tyagi* [Mathematical modeling of the electric drive of the electric locomotive 2EL5 in traction mode]. *Zbirnik naukovikh prats’ Ukrain’skogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transport* [Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Health Transport]. 2017, Vip. 170, pp. 20–31.

11. Kolkpakhchyan P., Zarifian A., Andruschenko A. *Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive*. Rail Transport — Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control, 2017, vol 87. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.

12. Vlas’evskiy S. V., Kuchumov B. A., Shcherbakov V. G. *Sravnienie energeticheskoy effektivnosti tyagovogo elektroprivoda elektrovozov peremennogo toka na osnove kollektornykh i asinkhronnykh dvigateley* [Comparison of the

energy efficiency of the traction electric drive of AC electric locomotives based on commutator and asynchronous motors]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2017, Iss. 9, pp. 72–78. (In Russian)

13. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow: Gardariki Publ., 2007, 701 p. (In Russian)

14. Chen W. K. *The Electrical Engineering Handbook*. Academic Press, 2004, 1018 p.

15. Evstaf’ev A. M., Sychugov A. N. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka* [Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Railway Transport]. 2013, Iss. 1, pp. 22–30. (In Russian)

16. Zak V. V., Starovoytov S. A., Martynyuk I. Yu. *Perspektivnye sposoby povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka* [Promising ways to increase the energy efficiency of AC electric locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2022, Iss. 9, pp. 40–44. (In Russian)

17. *Elektrovozy 2ES5S i 3ES5S: asinkhronnaya tyaga pod flagom Rossii* [Electric locomotives 2ES5S and 3ES5S: asynchronous traction under the Russian flag]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway technology]. 2020, Iss. 1(49), pp. 10–13. (In Russian)

Received: October 15, 2023

Accepted: November 13, .2023

Author’s information:

Alexander A. ZARIFYAN — PhD in Engineering, Expert; zarifyan.alexander@gmail.com

Andrey M. EVSTAFEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evstam@mail.ru