

Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке

А. А. Зарифьян¹, П. Г. Колпахчьян²

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

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г. Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 77–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92

Аннотация

Цель: Поскольку в эксплуатации электровозы работают в условиях изменяющейся нагрузки, важное значение имеет вопрос о том, каким образом показатели энергетической эффективности тягового привода зависят от реализуемой мощности. Поставлена задача получить в ходе экспериментального исследования основные показатели энергетической эффективности — коэффициент полезного действия, коэффициент использования мощности и коэффициент мощности — асинхронного тягового привода новых грузовых электровозов 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» при работе с изменяющейся нагрузкой. **Методы:** Исследования проведены на полноразмерном стенде для испытаний тягового привода. Особое внимание уделено экспериментальному определению потерь в зависимости от реализуемой мощности. Стенд построен по схеме взаимной нагрузки, каждый из двух каналов включает тяговый преобразователь и колесно-моторный блок. Оси колесных пар двух колесно-моторных блоков соединены при помощи динамометрической муфты, которая позволяет регистрировать значения вращающего момента на колесных парах и частоту вращения. **Результаты:** Испытания проведены для шести уровней мощности, что позволило получить зависимости КПД основных элементов привода от изменяющейся нагрузки. Результаты представлены в табличной и графической форме. Показано также, каким образом КПД электровоза изменяется в зависимости от нагрузки (по данным бортового регистратора). **Практическая значимость:** Полученные зависимости КПД основных элементов привода (преобразователя и тягового электродвигателя с редуктором) от величины нагрузки представляют собой исходную информацию для работы алгоритма дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым приводом, который применен на электровозах 2(3)ЭС5С. Реализация этого алгоритма позволила сократить удельный расход электрической энергии на тягу в пределах 20–30 % в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: Электровоз, асинхронный тяговый привод, энергетическая эффективность при переменной нагрузке, экспериментальное и расчетное определение показателей энергетической эффективности.

Введение

Задача повышения энергетической эффективности электровозов является актуальной, поскольку расходы на закупку электрической энергии на тягу поездов составляют более половины общих расходов железнодорожных компаний на приобретение топливно-энергетических ресурсов [1–3]. Следовательно,

исследовательские и проектно-конструкторские работы, направленные на повышение энергетической эффективности тягового подвижного состава, являются востребованными как в настоящее время, так и в обозримом будущем.

В настоящей статье представлены результаты, полученные в ходе экспериментального определения основных показателей энергетической эффективности, таких как коэффициент полезного действия, коэффициент использования мощности и коэффициент мощности — асинхронного тягового привода электровозов 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» при работе с изменяющейся нагрузкой.

Для преодоления наиболее сложных участков с горным профилем пути предусмотрена работа электровоза в ограниченных по времени режимах: в часовом режиме с мощностью на валу тягового двигателя 1100 кВт и в 30-минутном режиме — 1300 кВт (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики электровозов семейства «Атаман»

| Электровоз | | 2ЭС5С | 3ЭС5С |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Осевая формула | | $2 \times (2o-2o)$ | $3 \times (2o-2o)$ |
| Мощность на валах ТЭД, кВт | 30-минутного режима | 10 400 | 15 600 |
| | часового режима | 8800 | 13 200 |
| | номинального (длительного) режима | 8400 | 12 600 |
| Сила тяги, кН / скорость, км/ч | часового режима | 690 / 45 | 1 035 / 45 |
| | номинального (длительного) режима | 547 / 54 | 821 / 54 |
| Конструкционная скорость, км/ч | | 120 | |
| Коэффициент мощности, не менее | | > 0,95 | |

Тяговый привод электровоза является многодвигательным и допускает поосное регулирование силы тяги, что предоставляет возможность повышения его энергетической эффективности при работе с переменной нагрузкой [4–7].

Реализация энергоэффективных алгоритмов управления тягой требует проведения на этапе проектирования исследований по оценке энергетических показателей тягового электропривода в различных режимах. В этом случае актуальным является наличие методов определения потерь в элементах тягового электропривода, в первую очередь в тяговых двигателях, допускающих использование на ранних этапах разработки локомотивов. Питание асинхронных тяговых двигателей осуществляется от полупроводниковых преобразователей. Форма напряжения и тока статора значительно отличается от синусоидальной и приводит к увеличению потерь. Поэтому применение традиционно используемых в теории электрических машин методов расчета потерь, хорошо зарекомендовавших себя при питании обмоток синусоидальным напряжением, в рассматриваемом случае не позволяет добиться адекватного определения величины потерь и требует

уточнения [8]. Важным вопросом является оценка достоверности получаемых результатов. Поэтому далее будет необходимо рассмотреть вопросы расчетного определения величины потерь в асинхронном тяговом двигателе при питании от частотного преобразователя и сравнить их с потерями, полученными в результате эксперимента.

Основные показатели энергетической эффективности

Для изучения энергетической эффективности электровоза будем использовать три основных показателя: 1) коэффициент полезного действия (КПД); 2) коэффициент использования мощности (КИМ) и 3) коэффициент мощности.

1. КПД электровоза η определяется как:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{tr}}{P_{tr} + P_{loss} + P_{aux}}, \quad (1)$$

где P_{in} — потребляемая (входная) мощность;

P_{out} — полезная (выходная) мощность, $P_{tr} = P_{out}$ — мощность на тягу;

P_{loss} — мощность потерь;

P_{aux} — мощность вспомогательных потребителей.

Мощность электровоза на тягу P_{tr} равна

$$P_{tr} = F_{tr} \cdot V, \quad (2)$$

где F_{tr} — касательная сила тяги, кН;

V — скорость, м/с.

Необходимо различать КПД локомотива при работе на номинальной мощности в стационарном режиме (приводится в технической документации) и эксплуатационный КПД [1]. Имеются многочисленные публикации по расчетному определению КПД тягового электропривода электровоза как произведения КПД его основных элементов: трансформатора, преобразователя, тяговых двигателей, зубчатой передачи, см. [9–15] и другие работы.

2. КИМ электровоза γ представляет собой отношение полезной мощности электровоза P_{tr} в данный момент к его номинальной мощности P :

$$\gamma = \frac{P_{tr}}{P}. \quad (3)$$

Отметим, что P в (3) равно числу работающих тяговых электродвигателей (ТЭД), умноженному на номинальную мощность одного ТЭД:

$$P = N_M \cdot P_M, \quad (4)$$

где P_M — номинальная мощность (то есть мощность длительного режима) одного ТЭД;

N_M — число ТЭД, работающих в данный момент.

3. Коэффициент мощности λ системы электроснабжения переменного тока определяется как отношение реальной мощности, потребляемой нагрузкой (электровозом), к полной мощности, протекающей в цепи. Коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой электровоза, при его уменьшении происходит увеличение потерь энергии в контактной сети и устройствах энергоснабжения, вызываемое сдвигом тока по фазе относительно напряжения и наличием высших гармоник тока. В идеале коэффициент мощности должен стремиться к единице.

Необходимо подчеркнуть, что зависимость КПД электровоза от его касательной мощности вида $\eta = f(P_{tr})$ лежит в основе алгоритма повышения энергетической эффективности локомотива с многодвигательным тяговым приводом [5].

При определении энергетических показателей электровозов с асинхронным тяговым электроприводом ключевым вопросом является расчет потерь в тяговых двигателях, так как при питании от инвертора из-за наличия высших гармоник они увеличиваются. Точность расчета потерь в этом случае во многом зависит от применяемого подхода к их определению и требует экспериментального подтверждения.

Испытательный стенд

Перейдем к описанию стенда для проведения испытаний тягового привода, в том числе для экспериментального получения значений потерь в зависимости от реализуемой мощности.

Схемы силовых электрических цепей грузового электровоза семейства «Атаман» с асинхронным тяговым приводом приведены в [16, 17], причем обеспечивается индивидуальное (поосное) управление тяговыми двигателями. Все преобразователи каждой секции электровоза питаются от вторичной обмотки тягового трансформатора. Основными элементами индивидуального тягового привода являются тяговый преобразователь (включает входной $4qs$ -преобразователь, звено постоянного тока и автономный инвертор напряжения), асинхронный тяговый двигатель ДТА-1100 и зубчатый редуктор.

Испытания проводились на полноразмерном испытательном стенде (рис. 1). Стенд построен по схеме взаимной нагрузки (рис. 2) и состоит из двух каналов, причем каждый канал включает тяговый преобразователь и колесно-моторный блок. Индуктивность и активное сопротивление дросселя L (имитатора тягового трансформатора)



Рис. 1. Полноразмерный стенд для испытаний тяговой системы электровоза (общий вид)

подобраны равными параметрам вторичной обмотки ТТ. Мощность на валу двигателя ДТА-1100 составляет 1050 кВт в длительном режиме и 1100 кВт — в часовом. Передаточное отношение тягового редуктора равно $121/18 = 6,72$.

Источником питания статорных обмоток каждого двигателя является преобразователь, поэтому стенд позволяет проводить испытания не только двигателей как таковых, но и преобразователей и привода в целом. Кроме того, схема взаимной нагрузки более предпочтительна с точки зрения снижения затрат энергии при проведении испытаний [18].

Оси колесных пар двух колесно-моторных блоков соединены при помощи динамометрической муфты (*датчик момента*), которая позволяет регистрировать значения вращающего момента на колесных парах и частоты вращения.

При испытаниях один канал является **активным** (испытываемым), показан на схеме рис. 2 справа, он включает U_2 , C и U_4 . На активном канале установлено программное обеспечение (прошивка) тяговой системы электровоза, что позволяет управлять величиной крутящего момента двигателя при помощи аналога контроллера машиниста.

Другой канал является **пассивным** (нагрузочным), на схеме слева, он включает U_1 , C и U_3 . На пассивном канале, который имитирует нагрузку, установлена промышленная прошивка, которая обеспечивает поддержание заданной частоты вращения двигателя (то есть скорости движения) при любой величине крутящего момента. При проведении испытаний испытываемый канал работает в двигательном режиме, нагрузочный — в режиме рекуперации. Подпитка осуществляется

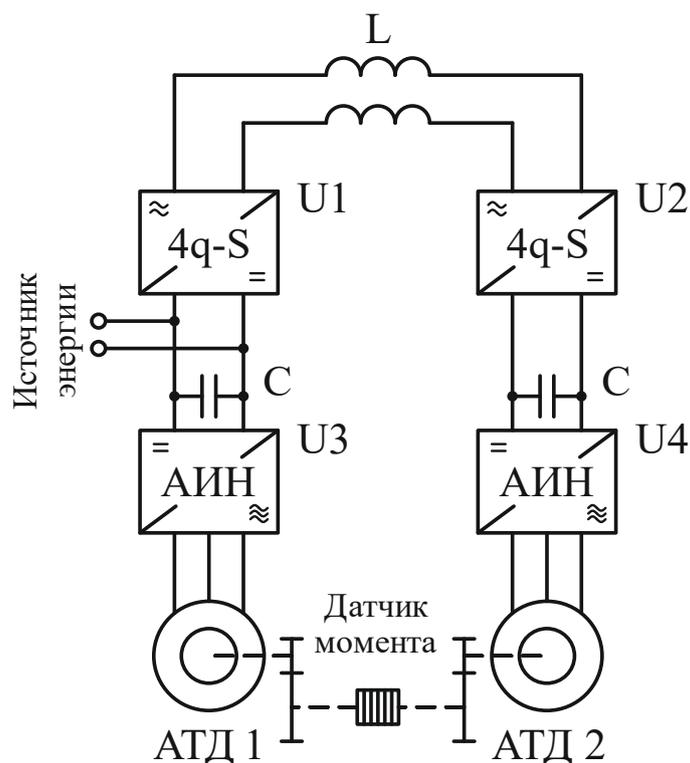


Рис. 2. Принципиальная схема стенда: L — имитатор тягового трансформатора; $U1, U2$ — $4q-s$ -преобразователь; C — звено постоянного напряжения; $U3, U4$ — автономный инвертор напряжения; АТД1, АТД2 — тяговый электродвигатель

током постоянного напряжения 2 кВ (*источник энергии*) в звено постоянного напряжения пассивного канала.

Стенд позволяет воспроизводить следующие режимы: 1) работа в режиме тяги или электрического торможения; 2) изменение направления вращения. Стенд дает возможность проводить испытания:

- при скорости вращения ТЭД от 0 до 1000 об/мин при постоянном моменте;
- при скорости вращения ТЭД от 1000 до 2680 об/мин при постоянной мощности.

Испытательный стенд оснащен измерительным комплексом, который предназначен для опроса всех датчиков нагрузочного комплекса, тягового электропривода и оборудования стенда; отображения полученной информации в цифровом и графическом виде; записи сигналов на жесткий диск с возможностью последующей обработки и анализа записанной информации.

Испытания асинхронного тягового привода в длительном режиме

Перейдем к изложению результатов, полученных при работе тягового привода в длительном режиме, при частоте вращения колесной пары $n_{\text{КП}} = 242,9$ об/мин.

Электрические измерения проводились на активном канале, входом являются клеммы 4qs-преобразователя U_2 , выходом являются три фазы автономного инвертора напряжения U_4 .

Мощность и КПД преобразователя

Мгновенная мощность на входе в преобразователь P_{in}^{conv} и на выходе P_{out}^{conv} (на рис. 3 обозначены как P_{in} и P_{out}) определяются следующим образом:

$$P_{in}^{conv} = I_{in} \cdot U_{in}, \quad (5)$$

$$P_{out}^{conv} = I_a \cdot U_a + I_b \cdot U_b + I_c \cdot U_c, \quad (6)$$

где I_{in}, U_{in} — мгновенные значения тока и напряжения на входе 4qs-преобразователя U_2 ;

$I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$ — мгновенные значения фазных токов и напряжений на выходе автономного инвертора напряжения U_4 .

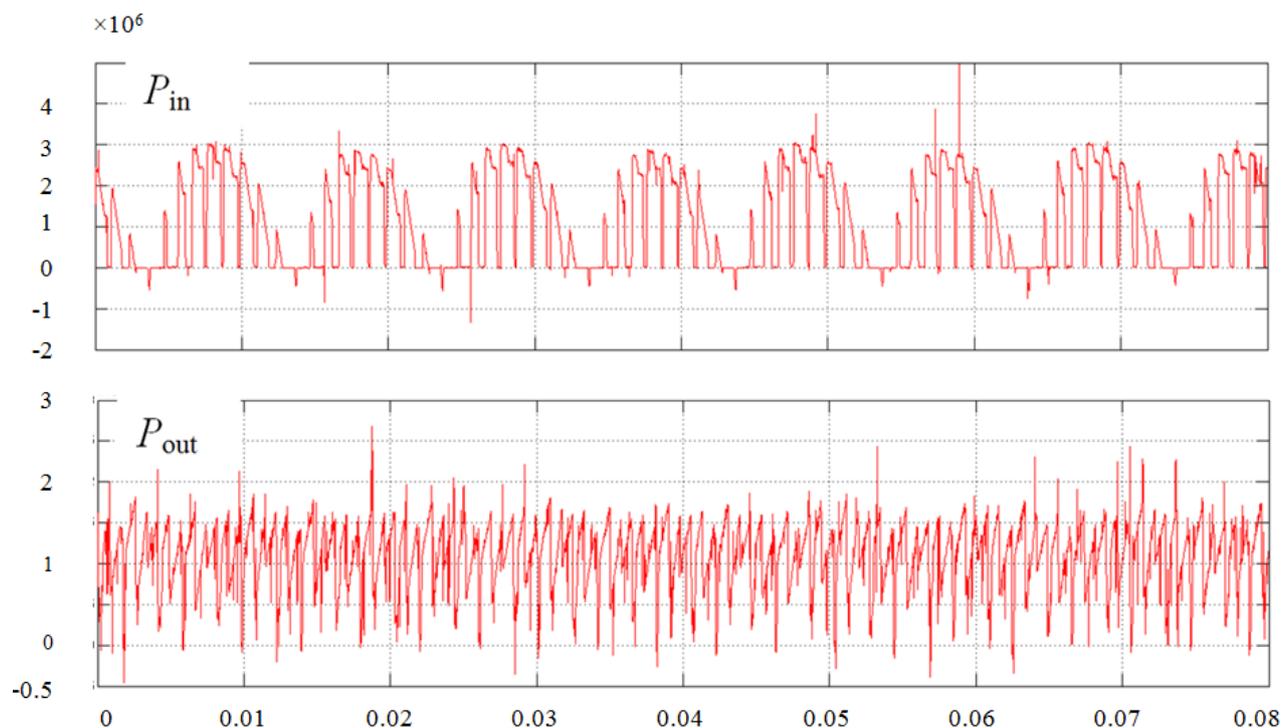


Рис. 3. Мгновенная мощность на входе (P_{in}) и на выходе (P_{out}) преобразователя:
по горизонтали — время, с; по вертикали — мощность, Вт

Энергию на входе преобразователя E_{in} и на его выходе E_{out} за время $t_1 — t_0$ вычисляем путем интегрирования:

$$E_{in} = \int_{t_0}^{t_1} (I_{in} \cdot U_{in}) dt, \quad (7)$$

$$E_{out} = \int_{t_0}^{t_1} (I_a \cdot U_a + I_b \cdot U_b + I_c \cdot U_c) dt. \quad (8)$$

Среднюю мощность на входе P_{in}^* и на выходе преобразователя P_{out}^* за время $t_1 — t_0$ находим соответственно как:

$$P_{in}^* = \frac{1}{t_1 - t_0} E_{in}, \quad (9)$$

$$P_{out}^* = \frac{1}{t_1 - t_0} E_{out}. \quad (10)$$

В длительном режиме получаем следующие значения: на входе преобразователя $P_{in}^* = 1117$ кВт, на выходе преобразователя $P_{out}^* = 1093$ кВт. Отсюда КПД преобразователя $\eta_{conv} = P_{out}^* / P_{in}^* = 1093 / 1117 = 0,9785$.

Вращающий момент на колесной паре и КПД тягового привода Величина вращающего момента на динамометрической муфте (то есть на колесной паре) в длительном режиме составляет $T_{КП} = 40,46$ кН·м. В спектре момента отсутствуют гармоники с частотами ниже 30 Гц, которые могли бы попасть в резонанс с собственными частотами механической части.

На динамометрической муфте частота вращения составила $n_{КП} = 242,9$ об/мин, момент $T_{КП} = 40,46$ кН·м, отсюда механическая мощность на колесной паре в длительном режиме равна:

$$P_{КПмех} = \pi \cdot n_{КП} \cdot T_{КП} / 30 = \pi \cdot 242,9 \cdot 40,46 / 30 = 1029,2 \text{ кВт}; \quad (11)$$

КПД колесно-моторного блока составляет:

$$\eta_{drive} = P_{КПмех} / P_{out}^* = 1029,2 / 1093 = 0,9416; \quad (12)$$

а КПД всего активного канала (то есть тягового привода в составе преобразователя и колесно-моторного блока):

$$\eta = P_{КПмех} / P_{in}^* = 1029,2 / 1117 = 0,9214. \quad (13)$$

Полагая потери в редукторе равными 2 %, получаем из (12) КПД тягового двигателя в длительном режиме:

$$\eta_{\text{ТЭД}} = \eta_{\text{drive}} / 0,98 = 0,9416 / 0,98 = 0,9608. \quad (14)$$

Отметим, что мощность двигателя ДТА-1100 в длительном режиме, приведенная в технической документации, равна 1050 кВт и измерена на валу двигателя. С учетом 2 % потерь в редукторе, получаем мощность на колесной паре, равную 1029 кВт.

Испытания тягового привода при переменной нагрузке

Вопрос о том, каким образом КПД тягового привода зависит от величины реализуемой мощности, имеет большое практическое значение, и по этой причине постоянно привлекает внимание исследователей.

Поэтому были проведены специальные испытания по определению значений КПД асинхронного тягового привода при изменяющейся нагрузке, что соответствует реальным условиям работы электровоза. Было проделано следующее. Частота вращения колесной пары $n_{\text{КП}}$ при помощи нагрузочного канала поддерживалась постоянной, соответствующей скорости движения электровоза в длительном режиме. В то же время вращающий момент $T_{\text{КП}}$ при помощи испытываемого канала ступенчато увеличивался, и в результате были получены семь уровней мощности, причем седьмой уровень соответствует длительному режиму.

По строкам табл. 2 расположены результаты, полученные при различных уровнях мощности. В первом столбце каждой строки приведены значения мощности $P_{\text{in}}^{\text{conv}}$ на входе в преобразователь, далее для каждого уровня мощности, то есть по каждой строке, даны:

2-й столбец — соответствующее значение коэффициента использования мощности γ ;

3-й столбец — потери в преобразователе ΔP_{conv} ;

4-й столбец — значение мощности на выходе преобразователя, равное мощности на входе в двигатель $P_{\text{out}}^{\text{conv}} = P_{\text{in}}^{\text{drive}}$;

5-й столбец — потери в двигателе и тяговом зубчатом редукторе ΔP_{drive} ;

6-й столбец — мощность на динамометрической муфте $P_{\text{out}}^{\text{drive}} = P_{\text{КПмех}}$;

Элемент $(i, 7)$ — КПД преобразователя для i -го уровня мощности ($i = 1, \dots, 6$), получен делением элемента $(i, 4)$ на элемент $(i, 1)$, то есть $\eta_{\text{conv}} = P_{\text{out}}^{\text{conv}} / P_{\text{in}}^{\text{conv}}$.

Элемент $(i, 8)$ — КПД колесно-моторного блока (двигателя вместе с редуктором), получен делением элемента $(i, 6)$ на элемент $(i, 4)$, то есть $\eta_{\text{drive}} = P_{\text{out}}^{\text{drive}} / P_{\text{in}}^{\text{drive}}$.

Элемент $(i, 9)$ — суммарный КПД преобразователя и колесно-моторного блока, получен делением элемента $(i, 6)$ на элемент $(i, 2)$, то есть в итоге $\eta = P_{\text{out}}^{\text{drive}} / P_{\text{in}}^{\text{conv}} = \eta_{\text{conv}} \times \eta_{\text{drive}}$.

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытаний тягового привода при переменной нагрузке

| | P_{in}^{conv} , кВт | γ | ΔP_{conv} , кВт | $P_{out}^{conv} = P_{in}^{drive}$, кВт | ΔP_{drive} , кВт | P_{out}^{drive} , кВт | η_{conv} | η_{drive} | η |
|---|--------------------------|----------|----------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|---------------|----------------|--------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 63 | 0,06 | 11 | 52 | 29 | 23 | 0,825 | 0,442 | 0,365 |
| 2 | 271 | 0,24 | 13 | 258 | 32 | 226 | 0,952 | 0,876 | 0,834 |
| 3 | 488 | 0,44 | 16 | 472 | 40 | 432 | 0,967 | 0,915 | 0,885 |
| 4 | 707 | 0,63 | 18 | 689 | 47 | 642 | 0,974 | 0,932 | 0,908 |
| 5 | 900 | 0,81 | 21 | 879 | 55 | 824 | 0,977 | 0,937 | 0,915 |
| 6 | 1026 | 0,92 | 23 | 1003 | 60 | 943 | 0,978 | 0,940 | 0,919 |
| 7 | 1117 | 1,00 | 24 | 1093 | 64 | 1029 | 0,98 | 0,942 | 0,921 |

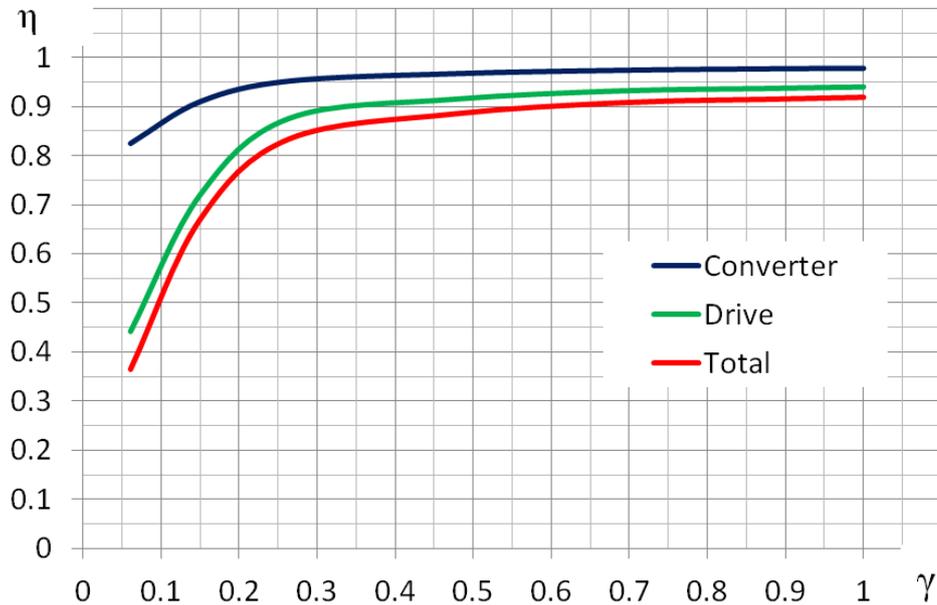


Рис. 4. Изменение КПД тягового привода при переменной нагрузке:

- синяя линия — КПД преобразователя (Converter);
- зеленая линия — КПД колесно-моторного блока (Drive);
- красная линия — КПД тягового привода (Total)

В соответствии с табл. 2 на рис. 4 показано поведение КПД преобразователя η_{conv} , КПД колесно-моторного блока η_{drive} и суммарного КПД $\eta = \eta_{conv} \times \eta_{drive}$ в зависимости от коэффициента использования мощности γ .

Видим, что характер изменения суммарного КПД η определяется главным образом поведением коэффициента η_{drive} (зеленая линия), то есть характером изменения КПД тягового электродвигателя в зависимости от нагрузки. В итоге получено, что при работе с неполной нагрузкой, то есть при $0,06 < \gamma < 0,5$, значение η существенно меньше, чем при работе с $\gamma \geq 0,5$.

Изменение КПД электровоза при работе с переменной нагрузкой

На рис. 5 показано изменение КПД электровоза с асинхронным тяговым приводом при работе с переменной нагрузкой. Диаграмма построена путем статистической обработки записей бортового регистратора, полученных за время большого числа поездок [4–6, 19].

Здесь учитывается совместная работа трансформатора, преобразователей, тяговых двигателей, механической части и другого оборудования. Таким образом, здесь принимаются во внимание как потери, так и затраты электровоза на собственные нужды (компрессоры, вентиляция и т. п.), то есть это результат многократных экспериментов, условия которых определялись реальными режимами работы локомотива в эксплуатации.

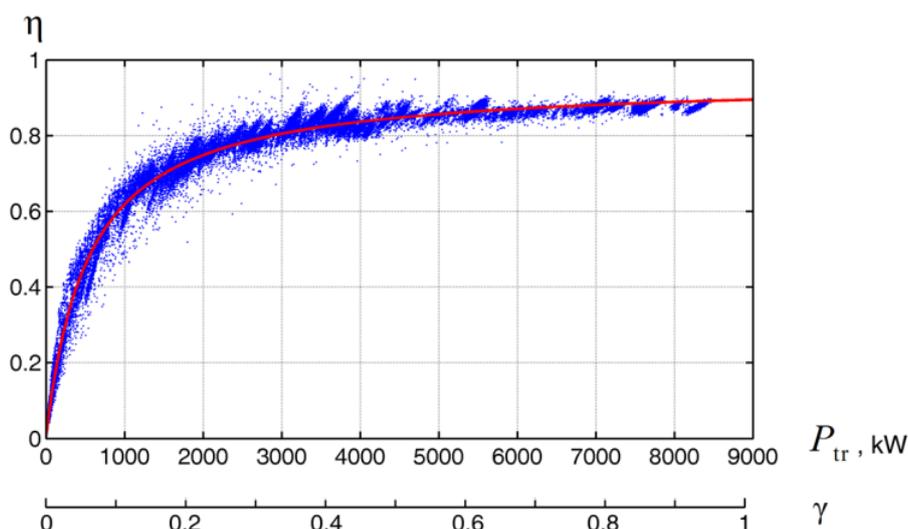


Рис. 5. Изменение КПД электровоза в зависимости от полезной мощности P_{tr} , кВт, и коэффициента использования мощности γ (по данным бортового регистратора)

Коэффициент мощности λ асинхронного тягового привода в ходе опытных поездок имел значения не менее 0,99, что свидетельствует о минимальном уровне потерь энергии.

Заключение

Приведены описание и схема полноразмерного стенда, представлены результаты испытаний асинхронного тягового привода в длительном режиме. Дано экспериментальное определение основных показателей энергетической эффективности привода, таких как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, при различной нагрузке.

Изучен практически важный вопрос о том, каким образом КПД тягового привода зависит от реализуемой мощности. Испытания проведены для шести уровней мощности, что позволило получить зависимости КПД основных элементов привода — преобразователя и двигателя с редуктором — от изменяющейся нагрузки. Установлено также, каким образом КПД электровоза изменяется в зависимости от нагрузки (по данным бортового регистратора). Коэффициент мощности асинхронного тягового привода находится на уровне 0,99.

Реализация алгоритма дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым приводом, исходной информацией для которого послужили представленные в настоящей работе зависимости, позволила сократить удельный расход электрической энергии на тягу в пределах 20–30 % [17, 19, 20].

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, 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. Версия годового отчета ОАО «РЖД» за 2019 год по итогам утверждения Правительством Российской Федерации (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2020 г. № 2509-п). — URL: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>.
4. Зарифьян А. А. Алгоритм повышения энергетической эффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А. А. Зарифьян // Вестник РГУПС. — 2016. — № 1. — С. 50–61.
5. Патент № 2617857 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В61С 15/00, В60К 31/00, В61С 17/12. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов и др. — 2017. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2617857C2/ru>.
6. Andrewshchenko A. Reduction of electric locomotive's energy consumption by scalable tractive power control / A. Andrewshchenko, P. Kolpahchyan, Jr. A. Zarifyan // Transport Problems. Scientific journal. — 2018. — Vol. 13. — Iss. 2. — Pp. 103–110.
7. Zarifyan Jr. A. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive, 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED) / Jr. A. Zarifyan, N. Grebennikov, T. Talakhadze et al. — 2019, pp. 1–5. — DOI: 10.1109/IWED.2019.8664283.
8. Колпахчян П. Г. Потери в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя частоты и числа фаз / П. Г. Колпахчян, В. И. Захаров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. — 2005. — № 48. — С. 78–88.

9. Бабич В. М. Повышение энергетической эффективности электровозов / В. М. Бабич. — Омск: Омская гос. акад. путей сообщения, 1995. — 112 с.
10. Плаксин А. В. Пути снижения расхода электрической энергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках железных дорог / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. — № 1(29). — С. 35–47.
11. Плаксин А. В. Пути повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов при эксплуатации на равнинных участках железных дорог / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. — № 3(31). — С. 43–54.
12. Гетьман Г. К. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Днепропетровск, 2013. — Вип. 5(47). — С. 47–55.
13. Саблин О. И. Снижение избыточной мощности тягового средства в процессе движения / О. И. Саблин, В. В. Артемчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 6/8(60). — С. 34–37.
14. Сорокин С. В. Расчет потерь в тяговых двигателях постоянного тока в широком диапазоне регулирования / С. В. Сорокин // Электромеханика. — 1990. — № 7. — С. 46–49.
15. Шаговик А. Е. Двухуровневая система управления асинхронным тяговым приводом локомотива / А. Е. Шаговик // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2005. — № 1. — С. 60–65.
16. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5С // Локомотив. — 2018. — № 8. — С. 35–37.
17. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог. — 2020. — № 1(49). — С. 10–13.
18. Попов Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д. И. Попов. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. — 175 с.
19. Зарифьян А. А. Сокращение расхода электроэнергии грузовыми магистральными электровозами 2(3)ЭС5С при работе в энергоэффективном режиме по итогам эксплуатационных испытаний / А. А. Зарифьян, М. А. Шрайбер // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 7–23. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-7-23.
20. URL: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/elektrovozy-peremennogo-toka-seriya-2es5s-3es5s/>.

Дата поступления: 01.02.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

Контактная информация:

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт; zarifyan.alexander@gmail.com
КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой; kolpahchyuan@mail.ru

Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load

A. A. Zarifyan¹, P. G. Kolpahchyan²

¹“TMH Engineering” Ltd, 4, Kolontzova str., Mitizhshi, 141009, Russian Federation

²Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Zarifyan A. A., Kolpahchyan P. G. Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 77–92. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92

Summary

Purpose: As electric locomotives work in changing load conditions, the question on how traction drive energetic efficiency indicators depend on being realized capacity has important meaning. The task is set to get in the course of experimental research — energetic efficiency main indicators — efficiency coefficient, capacity usage coefficient and capacity coefficient — of asynchronous traction drive of new freight electric locomotives 2(3)ES5S of “Ataman” family at work with changing load. **Methods:** Studies are given on full-size bench for traction drive testing. Special attention is paid on experimental definition of losses depending on being realized capacity. The bench’s built according to mutual load scheme, each of two channels includes traction converter and wheel-drive block. Wheelset axles of two wheel-drive blocks are connected with the help of torque clutch which allows to register torque values on wheelsets and rotation frequency. **Results:** Tests are hold for capacity six levels that has made it possible to obtain dependencies of efficiency coefficients of drive main elements versus changing load. The results are shown in tabular and graphical forms. It’s also shown how efficiency coefficient does change depending on load (according to board logger). **Practical significance:** The obtained dependencies of efficiency coefficients of drive main elements (converter and traction electric drive with reducer) from load value represent initial information for the work of the algorithm of discrete-adaptive control of multidrive traction gear which’s applied on electric locomotive 2(3)ES5S. This algorithm realization has allowed to cut specific expenditure of electric energy on traction in 20–30% limits depending on exploitation conditions.

Keywords: Electric locomotive, asynchronous traction gear, energetic efficiency at changing load, energetic efficiency indicator experimental and calculated definition.

References

1. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. *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. (In Russian)
3. *Versiya godovogo otcheta OAO “RZhD” za 2019 god po itogam utverzhdeniya Pravitel’stvom Rossiyskoy Federatsii (Rasporyazhenie Pravitel’sтва Rossiyskoy Fede-ratsii ot 30 sentyabrya 2020 g. № 2509-r)* [Version of the annual report of Russian Railways for 2019 based on the results of approval

by the Government of the Russian Federation (Decree of the Government of the Russian Federation dated September 30, 2020 No. 2509-r)]. Available at: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>. (In Russian)

4. Zarif'yan A. A. Algoritm povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektro-vozov s asinkhronnym tyagovym privodom pri pitanii ot seti postoyannogo toka [Algorithm for improving the energy efficiency of electric locomotives with asynchronous traction drive when powered by a DC network]. *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS]. 2016, Iss. 1, pp. 50–61. (In Russian)

5. Andryushchenko A. A., Zarif'yan A. A., Orlov Yu. A. et al. *Sposob upravleniya energeticheskoy effektivnost'yu lokomotiva pri rabote s nepolnoy nagruzkoy* [The method of managing the energy efficiency of a locomotive when operating with partial load]. Patent RF, no. 2617857, 2017. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2617857C2/ru>. (In Russian)

6. Andrewshchenko A., Kolpakhchyan P., Zarifyan Jr. A. Reduction of electric locomotive's energy consumption by scal-able tractive power control. *Transport Problems. Scientific journal*. 2018, vol. 13, Iss. 2, pp. 103–110.

7. Zarifyan Jr. A., Grebennikov N., Talakhadze T. et al. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive, 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664283.

8. Kolpakhch'yan P. G., Zakharov, V. I. Poteri v asinkhronnom tyagovom dvigatele pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty i chisla faz [Losses in an asynchronous traction motor when powered by a frequency and phase number converter]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrozostroyeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design institute of electric locomotive building]. 2005, Iss. 48, pp. 78–88. (In Russian)

9. Babich V. M. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov* [Improving the energy efficiency of electric locomotives]. Omsk: Omskaya gos. akad. putey soobshcheniya Publ., 1995, 112 p. (In Russian)

10. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti snizheniya raskhoda elektricheskoy energii pri ekspluatatsii passazhirskikh elektrovozov na ravninnykh uchastkakh zheleznykh dorog [Ways to reduce the consumption of electrical energy during the operation of passenger electric locomotives on the flat sections of railways]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2017, Iss. 1(29), pp. 35–47. (In Russian)

11. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti passazhir-skikh elektrovozov pri ekspluatatsii na ravninnykh uchastkakh zheleznykh dorog [Ways to improve the energy efficiency of passenger electric locomotives during operation on flat areas of railways]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2017, Iss. 3(31), pp. 43–54. (In Russian)

12. Get'man G. K., Vasil'ev V. E. Eshche raz ob opredelenii ekonomii elektroenergii na tyagu za schet chastichnogo otklyucheniya tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Once again about determining the savings in electricity for traction due to the partial shutdown of traction motors of electric rolling stock]. *Nauka ta progres transportu. Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalozn. transp. im.*

akad. V. Lazaryana [Science and progress in transport. Bulletin of Dnipropetr. nat. un-tu zalizn. transp. im. acad. V. Lazaryan]. Dnepropetrovsk, 2013, vol. 5(47), pp. 47–55. (In Russian)

13. Sablin O. I., Artemchuk V. V. Snizhenie izbytochnoy moshchnosti tyagovogo sredstva v protsesse dvizheniya [Reducing the excess power of the traction means in the process of movement]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2012, Iss. 6/8(60), pp. 34–37. (In Russian)

14. Sorokin S. V. Raschet poter' v tyagovykh dvigatelyakh postoyannogo toka v shirokom diapazone regulirovaniya [Calculation of losses in DC traction motors in a wide control range]. *Elektromekhanika* [Electromechanics]. 1990, Iss. 7, pp. 46–49. (In Russian)

15. Shagovik A. E. Dvukhurovnevaya sistema upravleniya asinkhronnym tyagovym privodom lokomotiva [Two-level control system for an asynchronous traction drive of a locomotive]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]. 2005, Iss. 1, pp. 60–65. (In Russian)

16. Znakom'tes': elektrovoz 2ES5S [Meet: electric locomotive 2ES5S]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2018, Iss. 8, pp. 35–37. (In Russian)

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

18. Popov D. I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnykh metodov i sredstv ispytaniy elektricheskikh mashin* [Scientific foundations for creating energy-efficient methods and means of testing electrical machines]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2019, 175 p. (In Russian)

19. Zarif'yan A. A., Shrayber M. A. Sokrashchenie raskhoda elektroenergii gruzovymi magistral'nymi elektrovozami 2(3)ES5S pri rabote v energoeffektivnom rezhime po itogam ekspluatatsionnykh ispytaniy [Reduction of electricity consumption by freight main electric locomotives 2 (3) ES5S when operating in an energy efficient mode based on the results of operational tests]. *Byulleten' rezul'ta-tov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 4, pp. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-7-23. (In Russian)

20. Available at: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/elektrovozy-peremennogo-toka-seriya-2es5s-3es5s/>. (In Russian)

Received: February 01, 2023

Accepted: February 28, 2023

Author's information:

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

Pavel G. KOLPAHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Electric Machines and Apparatus Department Head; kolpahchyan@mail.ru