

**А. А. Комяков, А. М. Чулембаев, П. А. Ивакин, М. А. Иванов**

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация*

## **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОВОЗА ПОСТОЯННОГО ТОКА С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы повышения качества электрической энергии в тяговых сетях. На железных дорогах России активно применяются электровозы с асинхронными тяговыми двигателями, особенностью которых является то, что для регулирования скорости их вращения должна применяться специальная система управления, основанная на применении тяговых преобразователей. Применение таких электровозов может ухудшать условия электромагнитной совместимости по сравнению с электровозами с коллекторными тяговыми двигателями. Разработана имитационная модель в программе *SimInTech*, позволяющая оценивать качество электроэнергии в тяговой сети. Выполнен спектральный анализ напряжения и тока, оценены действующие значения наиболее характерных гармоник.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, электровоз, энергоэффективность, качество энергии.

**A. A. Komyakov, A. M. Chulembaev, P. A. Ivakin, M. A. Ivanov**

*Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation*

## **QUALITY POWER ANALYSIS UNDER DC LOCOMOTIVE OPERATION WITH ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS**

**Abstract.** The article discusses the issues of improving the quality of energy in traction networks. Electric locomotives with asynchronous traction motors are actively used on the railways of Russia featuring a special control system based on the use of traction converters used to regulate the speed of their rotation. The use of such electric locomotives may worsen the conditions of electromagnetic compatibility in comparison with electric locomotives with collector traction motors. A simulation model has been developed in the *SimInTech* program, which allows evaluating the quality of electricity in the traction network. The spectral analysis of voltage and current is performed, the effective values of the most characteristic harmonics are estimated.

**Keywords:** railway transport, electric locomotive, energy efficiency, quality power.

### **Введение**

Вопросы повышения качества электрической энергии в тяговых сетях постоянного тока продолжают оставаться актуальными. Необходимо отметить, что данный вопрос является достаточно широко исследованным. Известно, что основной причиной появления высших гармонических составляющих в тяговых сетях является наличие выпрямителей или инверторов на тяговых подстанциях [1, 2].

В настоящее время на сети железных дорог России активно внедряются электровозы с асинхронным тяговым приводом. Их преимуществами являются высокая удельная мощность, меньшая масса, возможность поосного регулирования силы тяги, более высокая надежность из-за отсутствия коллекторно-щеточного узла, меньшее количество коммутационных аппаратов, повышенный КПД за счет отсутствия пусковых реостатов.

Особенностью электровозов с асинхронными тяговыми двигателями является то, что для регулирования скорости их вращения должна применяться специальная система управления, основанная на применении тяговых преобразователей. Наличие инверторов в тяговом преобразователе приводит к искажению напряжения и тока в контактной сети. Таким образом, применение современных электровозов с асинхронными тяговыми

двигателями могут ухудшать условия электромагнитной совместимости по сравнению с электровозами с коллекторными тяговыми двигателями.

Известны исследования отечественных ученых [3, 4], направленные на обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в системе электрической тяги постоянного тока. Так, Лещевым А. И. [3] выполнено математическое описание всей подсистемы «Электрическая часть» привода с асинхронным тяговым двигателем и рекомендована формула для определения амплитуды гармонических составляющих входного тока. Также в работе [3] установлено, что наиболее рациональными способами, обеспечивающими электромагнитную совместимость электроподвижного состава с тяговой сетью, является повышение частоты регулирования преобразователей и выбор рационального варианта схемы гибридного фильтра с оптимальными параметрами. Кроме того, предложены зависимости коэффициентов искажения от несущей частоты для определения значения величины первой гармоники фазного тока двигателя при различных значениях коэффициента модуляции.

В работе [4] Филипп В. Б. предложил алгоритм анализа гармонического состава тягового тока на основе волнового анализа и рассчитал параметры входного сглаживающего фильтра автономного инвертора напряжения.

Целью настоящего исследования является анализ гармонического состава тока и напряжения в контактной сети при работе электровозов с асинхронными тяговыми двигателями с применением технологий имитационного моделирования. В качестве объекта для исследования примем электровоз 2ЭС10 «Гранит».

Рассмотрим схему тягового преобразователя данного электровоза [5].

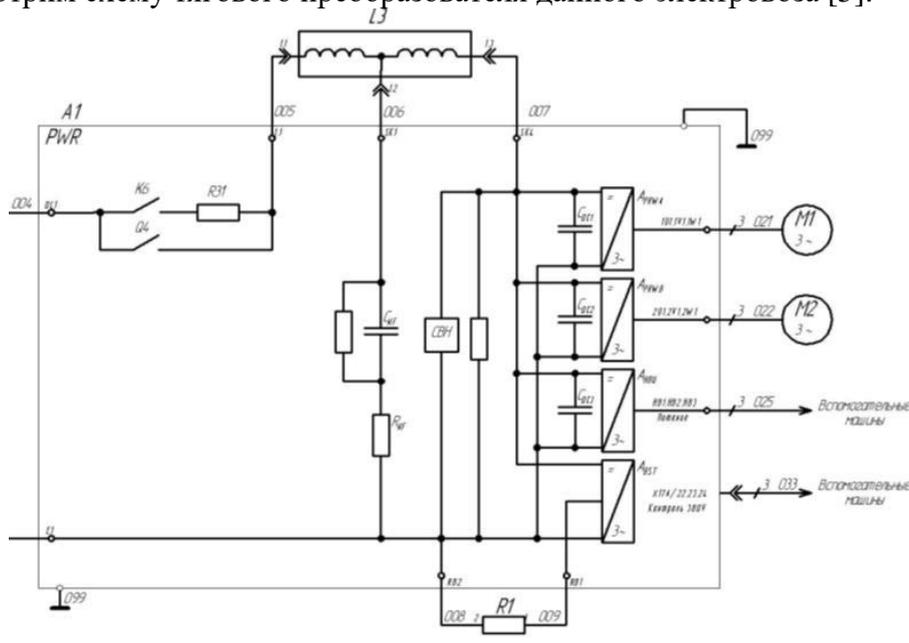


Рис. 1. Схема тягового преобразователя электровоза 2ЭС10 «Гранит»

Каждая секция электровоза оборудована двумя тяговыми преобразователями. Тяговый преобразователь служит для преобразования напряжения 3 кВ постоянного тока в трехфазное переменное напряжение регулируемой амплитуды и частоты. Каждый тяговый преобразователь включает два инвертора каждый для своего тягового электродвигателя.

Разработана модель тягового преобразователя в программном комплексе SimInTech, которая включает следующие элементы: асинхронный электродвигатель, инвертор, источник напряжения, анализатор спектра на основе преобразования Фурье, широтно-импульсный модулятор на 4 канала с симметричным треугольным опорным сигналом и формированием защитных пауз. За основу была принята модель, изложенная в [6].

В модели были приняты следующие допущения:

1. В качестве источника питания принят источник постоянного напряжения 3 кВ, т.е. не учитывалось искажение питающего напряжения из-за работы выпрямителя тяговой подстанции.
  2. Сопротивление тяговой сети принято равным 0,2 Ом.
  3. Моделирование выполнено без учета фильтра, применяемого на электровозе.
  4. Двигатель работает с мощностью примерно 750 кВт при номинальной мощности 1100 кВт.
  5. В работе учитывается только один тяговый двигатель.
- Схема модели приведена на рисунке 2.

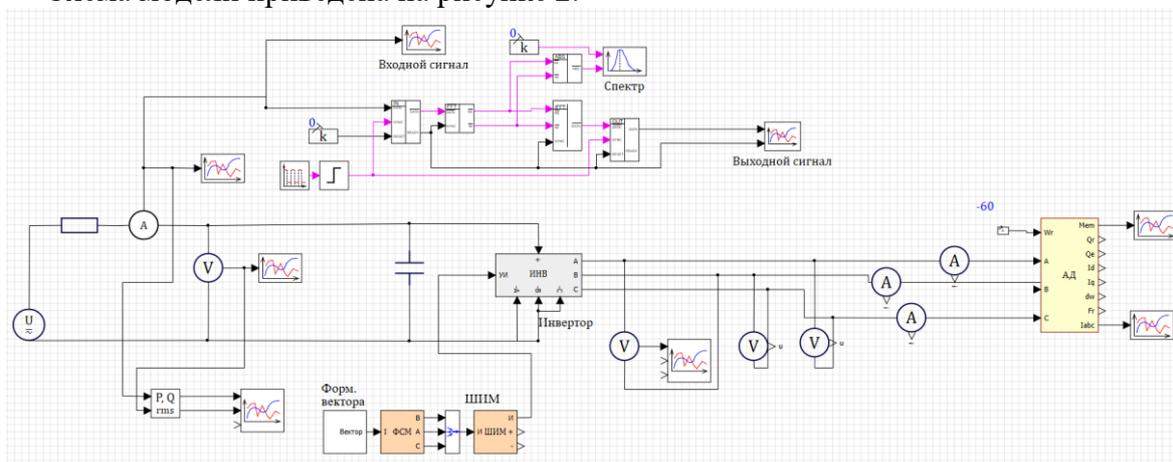


Рис. 2. Модель в программном комплексе SimInTech

На рисунке 3 показано, что в результате работы инвертора входной ток имеет значительные искажения.

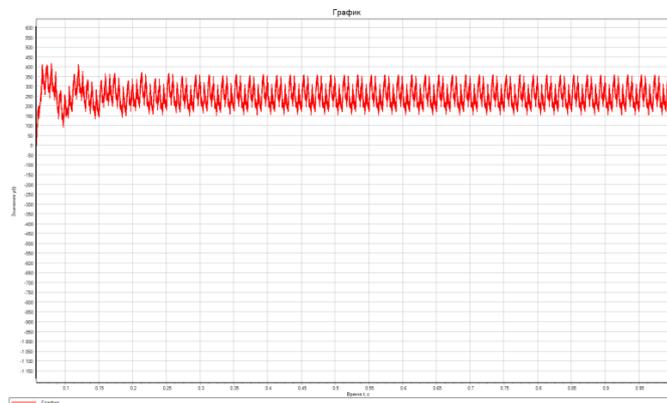


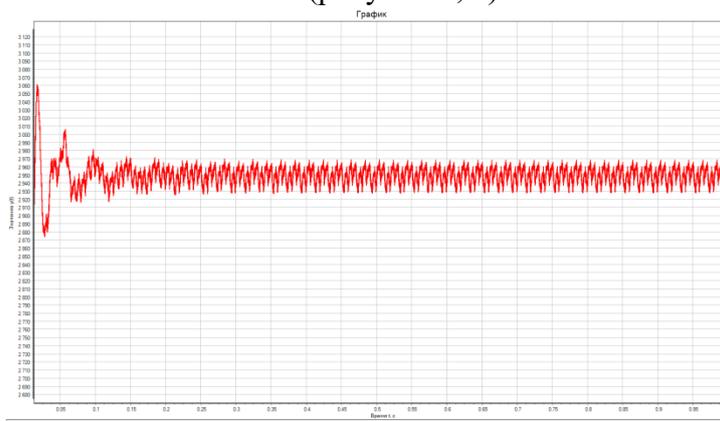
Рис. 3. Результаты моделирования тока – мгновенные значения

Выполнен анализ спектрального состава тока (рисунок 4). Наибольшее значение имеют гармоники 27 Гц и 973 Гц – до 18 % от постоянной составляющей. Также значительны гармоники 151 и 850 Гц



**Рис. 4. Результаты моделирования тока – спектральный состав**

В результате работы инвертора входное напряжение также искажено, однако величина искажений значительно меньше (рисунки 5, 6).



**Рис. 5. Результаты моделирования напряжения – мгновенные значения**



**Рис. 6. Результаты моделирования напряжения – спектральный состав**

Выполнен анализ спектрального состава напряжения. Наиболее характерные гармоники те же, что и для тока, однако их величина не превышает 0,37 % от постоянной составляющей.

По результатам проведенного исследования можно сделать выводы:

1. Модель выполнена в программном комплексе SimInTech показала себя работоспособной.

2. Искажение кривой тока в контактной сети оказалось значительно выше, чем кривой питающего напряжения. Это хорошо согласуется с теоретическими данными и ожиданиями. Однако, вероятно, что для реального объекта системы тягового электроснабжения искажение кривой напряжения окажется выше по следующим причинам:

1) в модели по сравнению с электровозом 2ЭС10 использован только один тяговый двигатель. Из-за этого абсолютные значения тока окажутся значительно выше;

2) искажение кривой напряжения в значительной мере будет зависеть от параметров контактной сети, тяговой подстанции и системы внешнего электроснабжения, которые в настоящей модели приняты в виде сосредоточенного электрического сопротивления.

3. В качестве перспектив дальнейшего исследования рассматриваются:

- увеличение количества тяговых преобразователей;
- интеграция модели тягового двигателя и тягового преобразователя с моделью контактной сети, тяговой подстанции и внешнего электроснабжения;
- моделирование перемещения электровоза по межподстанционной зоне;

- разработка модуля анализа качества электроэнергии на стороне 10 кВ тяговых подстанций при работе электровозов с асинхронным двигателем;
- эксперименты с различными типами входных фильтров, используемых на электровозе.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кондратьев, Ю. В. Качество электрической энергии на тягу поездов при наличии ее возврата в систему внешнего электроснабжения / Ю. В. Кондратьев, О. О. Комякова, С. Я. Привалов // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: материалы конференции. Омск, Омский гос. ун-т путей сообщения, 2008. С. 106–113.
2. Комякова, О. О. Анализ качества электрической энергии, возвращаемой инверторами тяговых подстанций постоянного тока в сеть энергосистем / О. О. Комякова, А. А. Комяков, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба. 2012. № 3 (11). С. 71-77.
3. Лещев А. И. Обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в системе электрической тяги постоянного тока: 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лещев Александр Иванович; Российский государственный открытый технический университет путей сообщения (РГОТУПС) – Москва, 2003. – 163 с.
4. Филипп В. Б. Обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом электровоза с рельсовыми цепями: 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филипп Валерий Богданович; Новосибирский государственный технический университет –Новосибирск, 2008. – 177 с.
5. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС10 с асинхронными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации.
6. Калачев, Ю. Н. Моделирование в электроприводе. – Москва: ДМК Пресс, 2019. 98 с.

### **REFERENCES**

1. Kondratiev Yu.V., Komyakova O.O., Privalov S.Ya. Kachestvo elektricheskoy energii na tyagu poyezdov pri nalichii yeye vozvrata v sistemu vneshnego elektrosnabzheniya [The quality of electric energy for train traction in the presence of its return to the external power supply system]. *Innovatsionnyye proyekty i novyye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: materialy konferentsii [Innovative projects and new technologies in railway transport: materials of the conference]*. Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya, 2008, pp. 106–113.
2. Komyakova O.O., Komyakova A.A., Vilhelm A.S. Analiz kachestva elektricheskoy energii, vozvrashchayemoy invertorami tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka v set' energosistem [Analysis of the quality of electric energy returned by inverters of DC traction substations to the power grid]. *Izvestiya Transsiba [Izvestiya Transsib]*. 2012. No. 3 (11). pp. 71-77.
3. Leshchev A.I. Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom v sisteme elektricheskoy tyagi postoyannogo toka: 05.22.07 «Podvizhnoy sostav zheleznykh dorog, tyaga poyezdov i elektrifikatsiya»: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Ensuring the electromagnetic compatibility of electric rolling stock with asynchronous traction drive in the DC electric traction system: 05.22.07 “Rolling stock of railways, train traction and electrification”: dissertation for the degree of candidate of technical sciences] / Leshchev Alexander Ivanovich ; Rossiyskiy gosudarstvennyy otkrytyy tekhnicheskiy universitet putey soobshcheniya - Moscow, 2003. - 163 p.
4. Philip V.B. Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovogo privoda elektrovoza s rel'sovymi tsepyami: 05.09.03 «Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy»: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Ensuring electromagnetic compatibility of electric rolling stock

with an asynchronous traction drive of an electric locomotive with rail circuits: 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems”: dissertation for the degree of candidate of technical sciences] / Philip Valeriy Bogdanovich; Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet - Novosibirsk, 2008. - 177 p.

5. Elektrovoz gruzovoy postoyannogo toka 2ES10 s asinkhronnymi tyagovymi elektrodvigatelyami. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Freight direct current electric locomotive 2ES10 with asynchronous traction motors. Manual].

6. Kalachev Yu.N. Modelirovaniye v elektroprivode [Modeling in an electric drive]. Moscow: DMK Press, 2019. 98 p.

#### **Информация об авторах**

*Комяков Александр Анатольевич* – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Теоретическая электротехника», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: tskom@mail.ru

*Чулембаев Аманжол Маратович* – ведущий специалист по учебно-методической работе Института менеджмента и экономики, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: amanchulik888@gmail.com

*Ивакин Пётр Алексеевич* – студент, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: petrukha.ivakin@gmail.com

*Иванов Михаил Александрович* – студент, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: misa72301@gmail.com

#### **Information about the authors**

*Komyakov Alexander A.* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Theoretical Electrical Engineering", Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: tskom@mail.ru

*Chulembaev Amanzhol M.* – leading specialist in educational and methodological work of the Institute of Management and Economics, Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: amanchulik888@gmail.com

*Ivakin Petr A.* – student, Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: petrukha.ivakin@gmail.com

*Ivanov Mikhail A.* – student, Omsk State Transport University, Omsk, e-mail: misa72301@gmail.com