

А. Д. Зарубин, М. Г. Соболев, Л. А. Астраханцев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Аннотация.** Проведено моделирование системы тягового электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения на участке железной дороги ЭЧЭ-15 Делюр – ЭЧЭ-17 Залари в программном комплексе MatLab R2021b, подпрограмме Simulink.

Выполнено моделирование системы тяги переменного тока напряжением 25 кВ в программном комплексе Кортэс, подпрограмме «Тяговые расчеты» и «Расчёты нагрузки и пропускной способности системы 27,5 кВ» для поезда массой 7100 т. и локомотивом 3ЭС5К с целью получения результатов для сравнения с результатами моделирования системы тяги постоянного тока повышенного напряжения.

Приведена структурная схема тяговой преобразовательной подстанции постоянного тока. В качестве выпрямительного устройства используется схема трёхфазного мостового двенадцатипульсового выпрямителя, которая подключается ко вторичным обмоткам тягового трансформатора с линейным напряжением 27,5 кВ, одна из обмоток которых собрана по схеме «звезда», другая по схеме «треугольник».

Полученные результаты моделирования для поезда массой 7100 т. и трехсекционного электровоза на условно прямом отрезке пути и условном подъёме межподстанционной зоны участка железной дороги Делюр – Залари показывают преимущества системы тяги постоянного тока 37,1 кВ над системой переменного тока 25 кВ, такие как сохранение участковой скорости, уменьшение токов в контактной сети примерно на 40%, равномерная нагрузка системы внешнего электроснабжения, а так же низкий процент нелинейных искажений фазного напряжения первичной обмотки трансформатора.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, система внешнего электроснабжения, электроподвижной состав, силовой трансформатор, выпрямительное устройство, трёхфазная двенадцатипульсовая схема выпрямления.

A. D. Zarubin, M. G. Sobolev, L. A. Astrakhantsev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

## ANALYSIS OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS

**Annotation.** The simulation of the DC traction power supply system of high voltage on the section of the ECHÉ-15 Delur – ECHÉ-17 Zalari railway in the MatLab R2021b software package, Simulink subprogram.

Simulation of the 25 kV AC traction system in the Kortés software package, the "Traction calculations" and "Load and capacity calculations of the 27.5 kV system" for a train weighing 7,100 tons and a 3ES5K locomotive was performed in order to obtain results for comparison with the results of modeling the DC traction system of increased voltage.

A block diagram of a DC traction converter substation is given. As a rectifier device, a three-phase bridge twelve-pulse rectifier circuit is used, which is connected to the secondary windings of a traction transformer with a linear voltage of 27.5 kV, one of the windings of which is assembled according to the "star" scheme, the other according to the "triangle" scheme.

The obtained simulation results for a train weighing 7,100 tons and a three-section electric locomotive on a conditionally straight section of track and a conditional rise of the substation zone of the Delur - Zalari railway section show the advantages of a 37.1 kV DC traction system over a 25 kV AC system, such as maintaining the local speed, reduction of currents in the contact network by about 40%, uniform load of the external power supply system, as well as a low percentage of nonlinear distortion of the phase voltage of the primary winding of the transformer.

**Keywords:** traction power supply system, external power supply system, electric rolling stock, power transformer, rectifier device, three-phase twelve-pulse rectification circuit.

### Введение

Система тягового электроснабжения является совокупностью таких устройств как линии электропередачи внешнего электроснабжения, тяговые подстанции, контактная сеть, предназначенная для обеспечения электроэнергией электроподвижного состава (ЭПС) и различных предприятий, необходимых для полноценной работы железной дороги [1-6].

На данный момент основным направлением совершенствования систем тяги является реализация стратегической программы развития отрасли по провозной и пропускной способности железной дороги [7].

Существующие методы усиления тягового электроснабжения не дают значительного эффекта повышения пропускной способности, при этом лишь усложняя системы, повышая их стоимость и увеличивая нагрузку на электротехнический персонал предприятия [8-12].

Перспективным направлением развития системы тягового электроснабжения является разработка системы тяги постоянного тока повышенного напряжения, описанной в работах профессора Б. А. Аржанникова, Уральский государственный университет путей сообщения; профессора А.Т. Буркова, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I; профессора А. С. Курбасова, Российский университет транспорта. Основными достоинствами данной системы, по отношению к другим системам, являются: увеличение пропускной способности железной дороги, повышение энергетической эффективности по симметрированию нагрузки в системе внешнего электроснабжения, уменьшение токов в контактной сети (КС), что приведет к уменьшению её сечения [12-15].

### 1 Система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 37,1 кВ

Питание осуществляется от шин внешнего электроснабжения 110(220) кВ. В структурной схеме ТПП постоянного тока напряжением 37,1 кВ применяются трёхфазные трехобмоточные преобразовательные трансформаторы с номинальным линейным напряжением 27,5 кВ вторичных обмоток [16].

Структурная схема тяговой преобразовательной подстанции постоянного тока приведена на рис. 1.

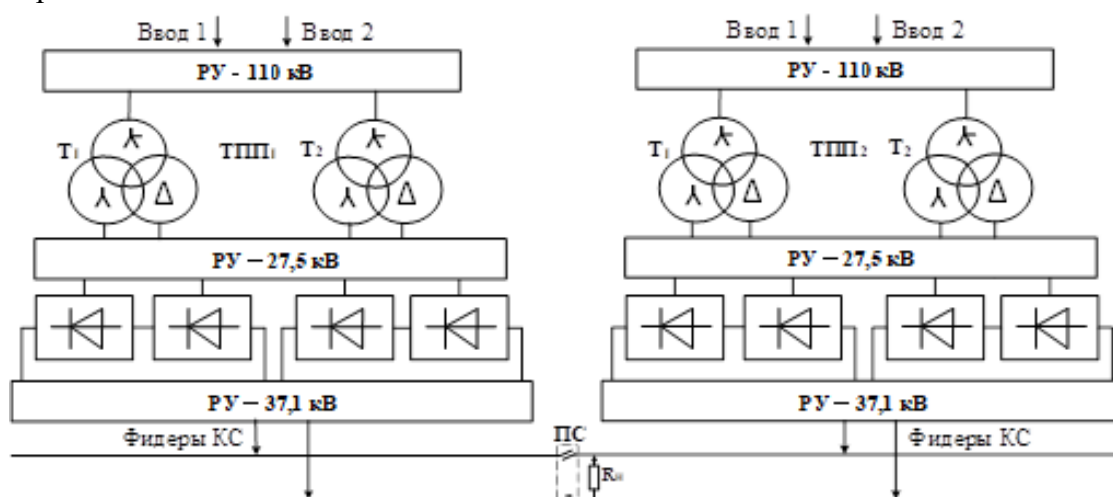


Рис. 1. Структурная схема тяговой преобразовательной подстанции постоянного тока 37,1 кВ

В целях повышения производительности железной дороги в качестве выпрямительного устройства широко применяются трёхфазные двенадцатипульсовые выпрямители последовательного и параллельного типа [16-18]. Для смещения на 30 электрических градусов трёхфазного напряжения на входе двух мостовых шестипульсовых выпрямителей вторичные обмотки тяговых трансформаторов соединяются одна по схеме «треугольник», другая по схеме «звезда».

Схема трёхфазного мостового двенадцатипульсового выпрямителя приведена на рис. 2.

### 2 Моделирование участка дороги Делюр – Залари

В качестве моделируемого участка используется участок железной дороги Делюр – Залари. Питание участка осуществляется по системе переменного тока напряжением 25 кВ от двух тяговых подстанций ЭЧЭ – 15 Делюр и ЭЧЭ – 17 Залари. Протяженность участка состав-

ляет 30 км. Пункты параллельного соединения и посты секционирования на участке отсутствуют. Продольный профиль участка и схема тягового электроснабжения приведены на рис. 3 и рис. 4. соответственно.

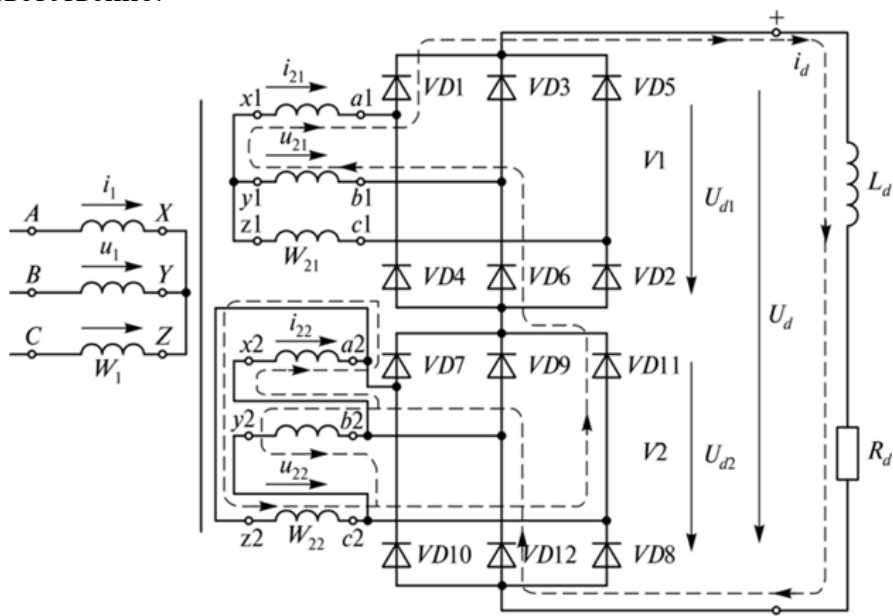


Рис. 2. Трёхфазная мостовая схема двенадцатипульсового выпрямителя

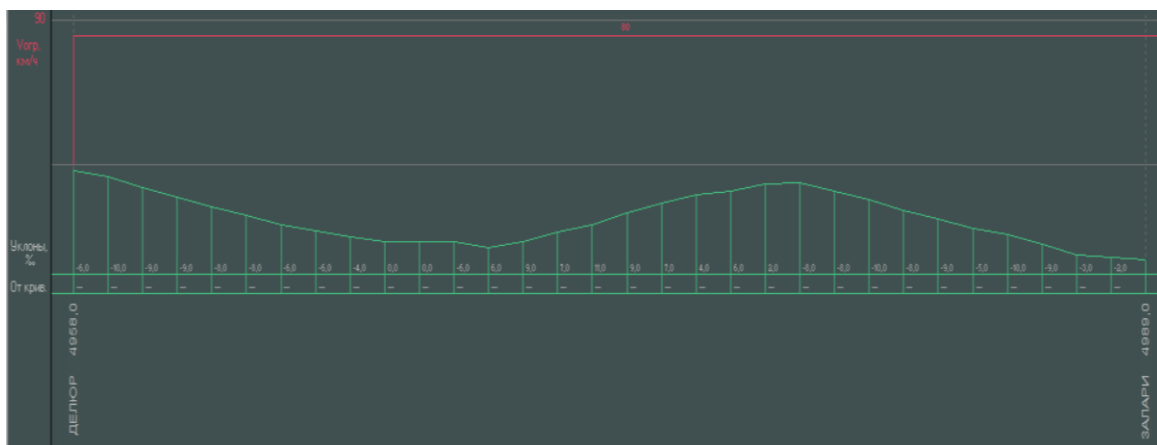


Рис. 3. Продольный профиль участка Делюр – Залари



Рис. 4. Схема модели тягового электроснабжения участка Делюр – Залари

На тяговых подстанциях установлены по два трансформатора ТДТНЖ-40000/110/35/27,5 [19], находящиеся в параллельной работе.

С помощью программного комплекса Кортэс было проведено моделирование участка дороги в подпрограмме «Тяговые расчеты» и «Расчёты нагрузки и пропускной способности системы 27,5 кВ» для поезда массой 7100 т. и локомотива ЗЭС5К, получены следующие результаты:

- Участковая скорость = 60 км/ч;
- Максимальный ток поезда = 619 А;
- Ток поезда на прямом участке = 472 А;
- При движении поезда на подъем наблюдается просадка напряжения до уровня 22,19 кВ;
- При движении поезда на подъем наблюдается нагрев обмоток электродвигателя до 130°C.

Более подробные результаты моделирования представлены на рис. 5.

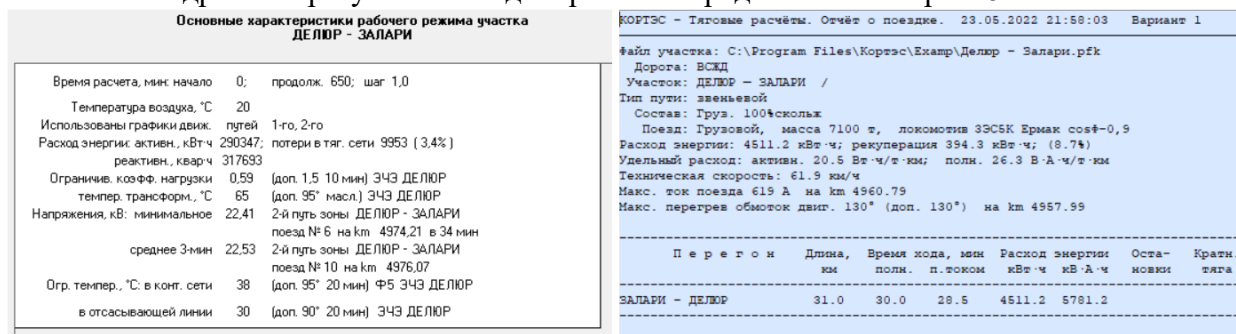


Рис. 5. Результаты моделирования системы тягового электроснабжения напряжением 25 кВ на участке дороги Делюр - Залари

Из полученных данных можно сделать вывод о значительной величине тока в контактной сети, когда поезд движется на подъем, предельной величине нагрева обмоток электродвигателя и просадках напряжения в тяговой сети.

Проведем сравнение с результатами моделирования системы постоянного тока 37,1 кВ [20].

### 3 Результаты моделирования системы тяги постоянного тока 37,1 кВ

Для моделирования была использована программа MatLab R2021b, подпрограмма Simulink. MATLAB – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений.

В качестве модели выпрямительного устройства была использована трёхфазная мостовая схема двенадцатипульсового выпрямителя, приведенная на рис. 6.

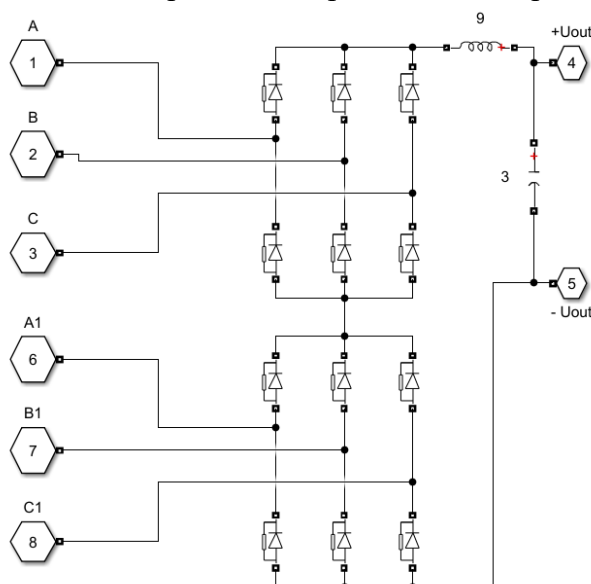


Рис. 6. Модель трёхфазной мостовой схемы двенадцатипульсового выпрямителя

С помощью средств MATLAB была смоделирована система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 37,1 кВ при наличии трехсекционного электровоза с коллекторным двигателем и общей массой поезда 7100 т. на условно прямом участке дороги в межподстанционной зоне. Модель участка представлена на рис. 7.

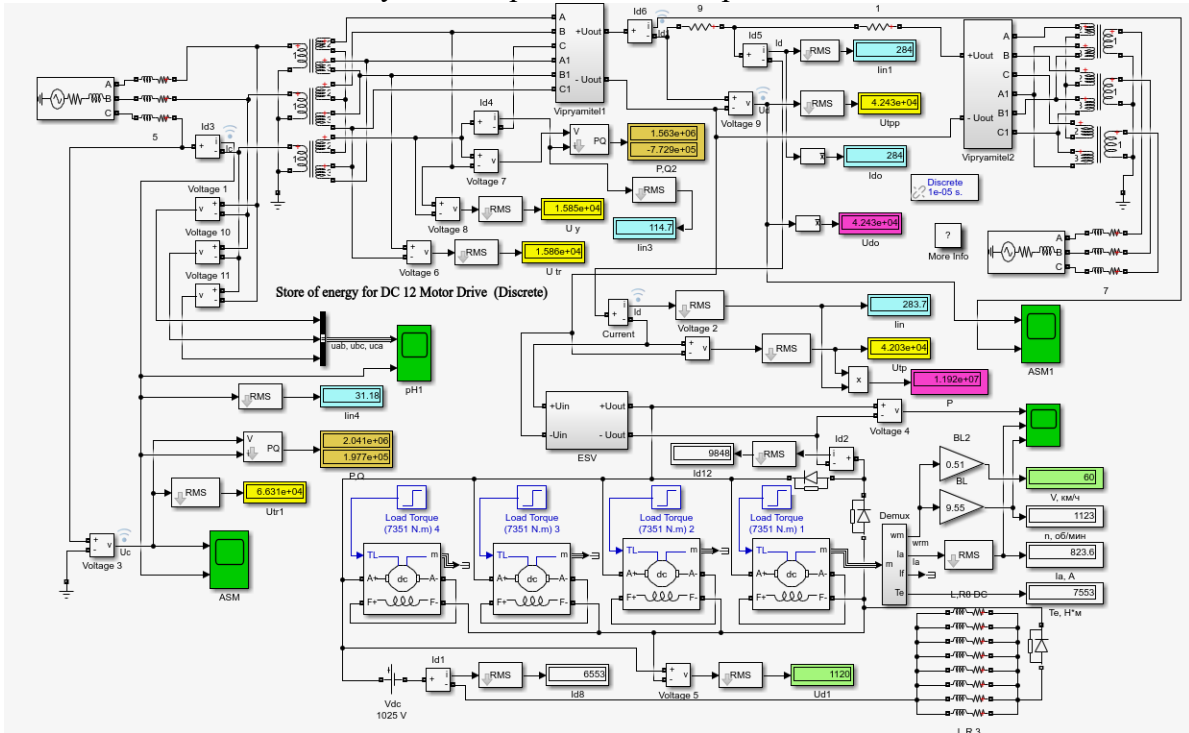


Рис. 7. Модель участка железной дороги, электрифицированного по системе постоянного тока напряжением 37,1 кВ на условно прямом участке.

Полученные результаты:

- Ток в контактной сети = 284 А;
- Сохранена участковая скорость = 60 км/ч;
- Напряжение на выходе выпрямительной установки = 42430 В.

Графики нагрузки системы внешнего электроснабжения представлены на рис. 8.

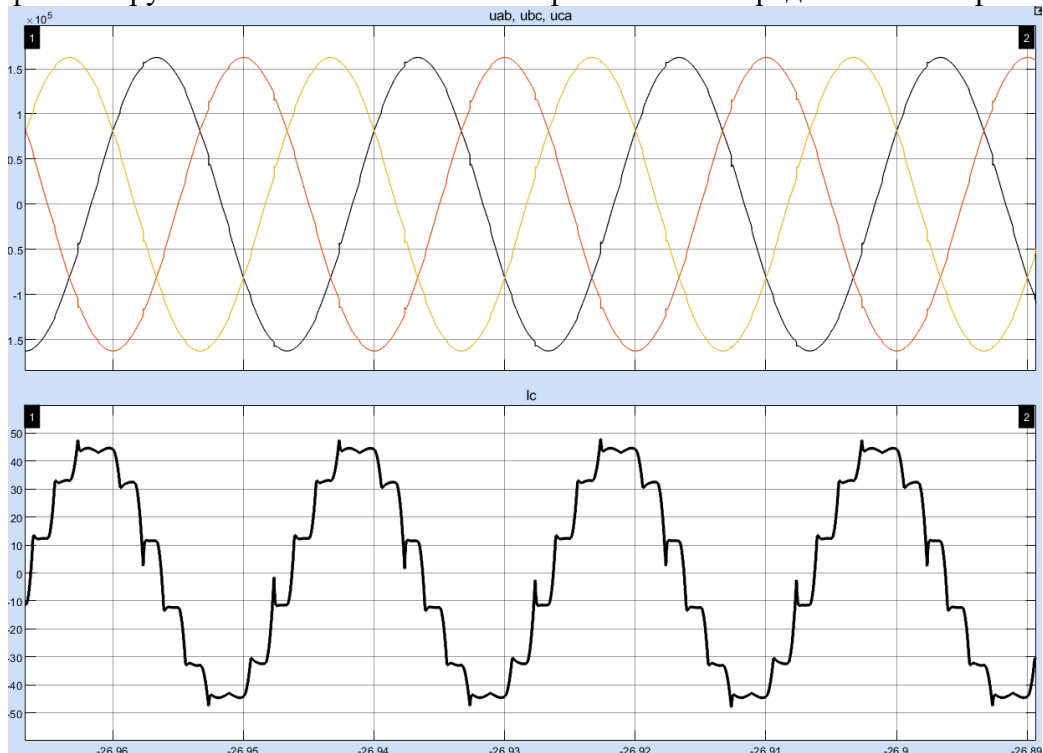


Рис. 8. Графики напряжения и тока во внешней системе электроснабжения

Спектральный анализ мгновенных значений напряжения и тока на вводе тяговой преобразовательной подстанции представлен на рис. 9.

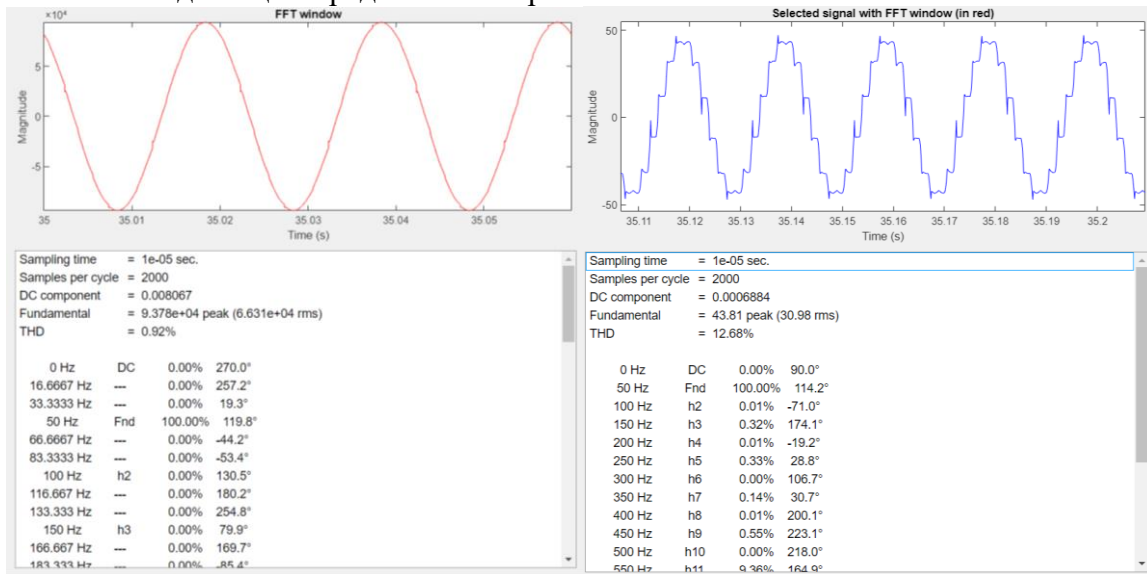


Рис. 9. Результаты спектрального FFT-анализа напряжения и тока

Из полученных данных моделирования можно заметить, что в ток в контактной сети при системе постоянного тока 37,1 кВ (284 А) ниже полученных значений при системе переменного тока 25 кВ (472 А) примерно на 40%. Участковая скорость сохраняется. Система внешнего электроснабжения равномерно нагружена. Суммарный коэффициент нелинейных искажений фазного напряжения составляет - 0,92%, а фазного тока – 12,68%.

Далее была смоделирована система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 37,1 кВ при наличии трехсекционного электровоза с коллекторным двигателем и общей массой поезда 7100 т. на условном подъеме на участке дороги в межподстанционной зоне. Модель участка представлена на рис. 10.

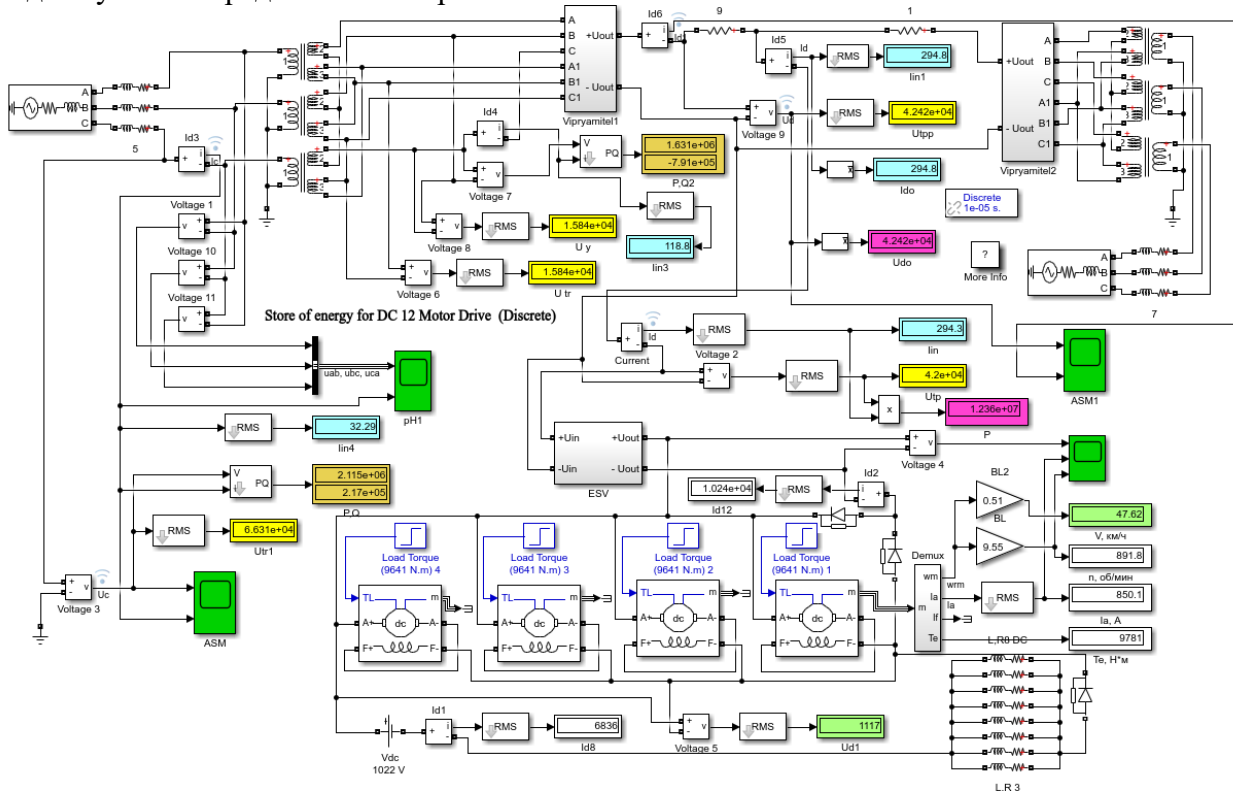


Рис. 10. Модель участка железной дороги, электрифицированного по системе постоянного тока напряжением 37,1 кВ на условном подъеме участка

Полученные результаты:

- Ток в контактной сети = 295 А;
- Скорость на подъёме = 47,62 км/ч;
- Напряжение на выходе выпрямительной установки = 42420 В.

Графики нагрузки системы внешнего электроснабжения представлены на рис. 11.

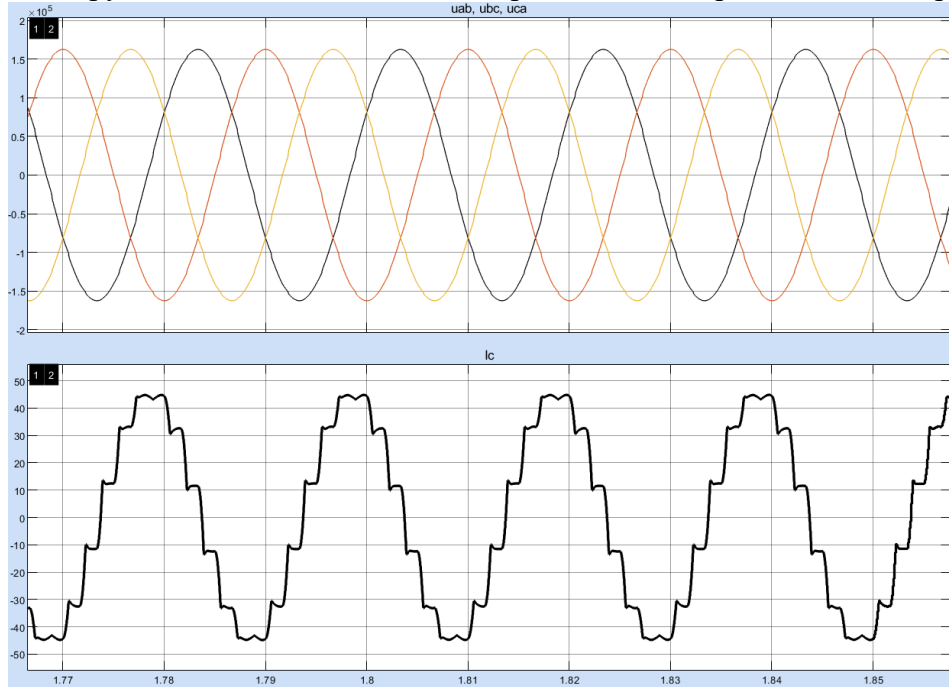


Рис. 11. Графики напряжения и тока во внешней системе электроснабжения

Спектральный анализ мгновенных значений напряжения и тока на вводе тяговой преобразовательной подстанции представлен на рис. 12.

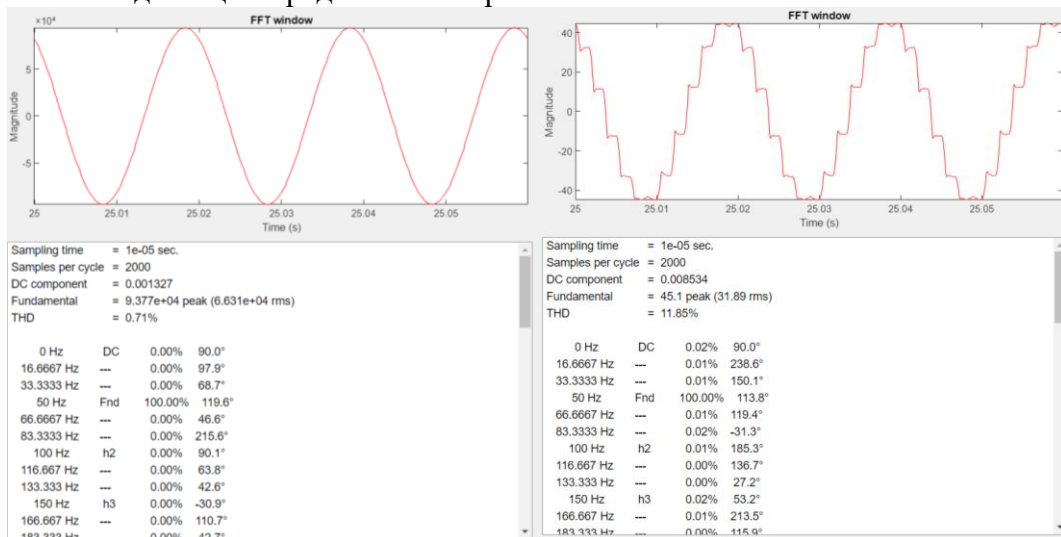


Рис. 12. Результаты спектрального FFT-анализа напряжения и тока

Из полученных данных моделирования можно заметить, что в ток в контактной сети при системе постоянного тока 37,1 кВ (295 А) ниже полученных значений при системе переменного тока 25 кВ (619 А) примерно на 52%. Скорость на подъёме составляет 47,62 км/ч. Система внешнего электроснабжения равномерно нагружена. Суммарный коэффициент нелинейных искажений фазного напряжения составляет - 0,71%, а фазного тока – 11,85%.



В связи с низким процентом нелинейных искажений напряжения и тока, а также малым смещением по фазе кривой тока и напряжения можно говорить о высоком КПД энергетической системы. Токи в контактной сети уменьшились примерно на 40%, соответственно потери электрической энергии уменьшаются примерно на 60%. Уровень напряжения в межподстанционной зоне позволяет работать грузовым электровозам в номинальном режиме, а скорость их движения ограничивается лишь предельно допустимыми токами в проводах контактной подвески.

### **Заключение**

Результаты моделирования для участка железной дороги показывают реальные преимущества системы тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 37,1 кВ перед системой переменного тока напряжением 25 кВ. Развитие данного типа системы позволит решить проблемы увеличения пропускной и провозной способности дороги, равномерной нагрузки системы внешнего электроснабжения, уменьшения потерь электроэнергии, передачи более качественной электроэнергии нетяговых потребителям железной дороги.

Система тяги постоянного тока 37,1 кВ является перспективным направлением для развития скоростного движения поездов и пропуска более тяжеловесных составов по участкам железной дороги. Возможность реализации такой системы тяги определяется необходимостью слаженной работы научно-исследовательских, проектных и производственных организаций железнодорожной транспортной системы.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.-д. транспорта. - Стереотипное издание. Перепечатка с издания 1986 г. – М.: Альянс, 2015. – 319 с.
2. Железные дороги [Электронный ресурс]/Системы электрической тяги – Режим доступа: <https://lokomotiv.ru/elektrosnabzhenie/sistemy-elektricheskoy-tyagi.html>
3. Брагин В.А. Схемы питания потребителей электроэнергии от тяговых подстанций систем тягового электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ, переменного тока 1х25 и 2х25 кВ и схема внешнего электроснабжения электрических железных дорог. Иркутск – 2010.
4. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник, учебное пособие. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2006.
5. Почаевец В.С. Электрические подстанции. – М.: УМЦ ЖДТ, 2012.
6. Звездкин М.Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1985
7. Новая «Стратегия холдинга «РЖД» до 2030 года» утверждена советом директоров ОАО «РЖД» в декабре 2013 года.
8. Инфопедия [Электронный ресурс]/Система тягового электроснабжения тяги постоянного тока напряжением 3 кВ и режимы её работы – Режим доступа: <https://infopedia.su/14xd1d.html>
9. StudFiles [Электронный ресурс]/Система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц – Режим доступа: **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.**
10. Студопедия [Электронный ресурс]/Система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 2х25 кВ – Режим доступа: [https://studopedia.ru/26\\_73321\\_sistema-tyagovogo-elektrosnabzheniya-odnofaznogo-peremennogo-toka-napryazheniem-h-kv.html](https://studopedia.ru/26_73321_sistema-tyagovogo-elektrosnabzheniya-odnofaznogo-peremennogo-toka-napryazheniem-h-kv.html)
11. Sinref.ru [Электронный ресурс]/Перспективные виды систем электрической тяги на ж/д транспорте – Режим доступа: [https://www.sinref.ru/000\\_uchebniki/04600\\_raznie\\_2/177\\_ehlektricheskie-zheleznye-dorogi-2006-god/009.htm](https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_2/177_ehlektricheskie-zheleznye-dorogi-2006-god/009.htm)
12. Вунивере.ру [Электронный ресурс]/Анализ методов улучшения режима тяговой сети



13. «Бюллетень результатов научных исследований» Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 12, 24 кВ для скоростной магистрали Москва – Екатеринбург / Б.А. Аржанников, А.Г. Галкин, А.Т. Бурков, В.А. Мансуров, И.О. Набойченко. 2015. С. 38-44.

14. Б.А. Аржанников, И.О. Набойченко Концепция усиления тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ.

15. Студопедия [Электронный ресурс]/Схемы соединения обмоток трансформаторов на тяговых подстанциях – Режим доступа: [https://studopedia.ru/17\\_27591\\_shemi-soedineniya-obmotok-transformatorov-na-tyagovih-podstantsiyah.html](https://studopedia.ru/17_27591_shemi-soedineniya-obmotok-transformatorov-na-tyagovih-podstantsiyah.html)

16. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника: Учебник Т.1, Т.2. - М.: УМЦ ЖДТ, 2015, Т.1. – 480 с., Т.2. – 307 с.

17. Лукутин Б. В., Обухов С. Г., Плотников И. А. Силовые преобразователи в электро-снабжении. – Томск: ТПУ, 2015. – 150 с.

18. Барковский Б.С., Магай Г.С., Маценко В.П. и др. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

19. Elertra-hvac.ru [Электронный ресурс]/Трансформатор ТДТН, ТДТНЖ, ТДЦТН – рас-шифровка, характеристики, схема, цена – Режим доступа: <http://electra-hvac.ru/rashifrovka-ttdtnzh.html>

20. Л. А. Астраханцев, Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, А. Л. Мартусов, О. В. Лобанов Разработка преобразовательного агрегата для энергетического обеспечения движения поездов / Учебно-методическое пособие по дисциплине Электронная техника и преобразователи в электроснабжении для студентов специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов», специализация «Электроснабжение железных дорог». – Иркутск: ИрГУПС, 2022. – 50 с.

## REFERENCES

1. Bey Yu.M., Mamoshin R.R., Pupynin V.N., Shalimov M.G. Traction substations / Textbook for universities of railway transport. - A stereotypical publication. Reprint from the 1986 edition – Moscow: Alliance, 2015. – 319 p.

2. Railways [Electronic resource]/Electric traction systems – Pre-stop mode: <https://lokomо.ru/elektrosnabzhenie/sistemy-elektricheskoy-tyagi.html>

3. Bragin V.A. Power supply schemes for electricity consumers from traction substations of 3.3 kV DC traction power supply systems, 1x25 and 2x25 kV AC and external power supply scheme for electric railways. Irkutsk – 2010.

4. Opoleva G.N. Schemes and substations of power supply. Handbook, textbook. - М.: FORUM–INFRA-M, 2006.

5. Pochaevets V.S. Electrical substations. - М.: UMTS ZHDT, 2012.

6. Zvezdkin M.N. Power supply of electrified railways. – М.: Transport, 1985

7. The new "Strategy of the Russian Railways Holding until 2030" was approved by the Board of Directors of JSC Russian Railways in December 2013.

8. Infopedia [Electronic resource]/Traction power supply system of 3 kV constant current traction and its operating modes – Access mode: <https://infopedia.ru/14xd1d.html>

9. StudFiles [Electronic resource]/Traction power supply system of single-phase alternating current with voltage of 25 kV, frequency of 50 Hz - Access mode: **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.**

10. Studopedia [Electronic resource]/Traction power supply system of single-phase alternating current with a voltage of 2x25 kV – Access mode: [https://studopedia.ru/26\\_73321\\_sistema-tyagovogo-elektrosnabzheniya-odnofaznogo-peremennogo-toka-napryazheniem-h-kv.html](https://studopedia.ru/26_73321_sistema-tyagovogo-elektrosnabzheniya-odnofaznogo-peremennogo-toka-napryazheniem-h-kv.html)

11. Sinref.ru [Electronic resource]/Promising types of electric traction systems on railway transport – Access mode: [https://www.sinref.ru/000\\_uchebniki/04600\\_raznie\\_2/177\\_ ehlektricheskie-zheleznye-dorogi-2006-god/009.htm](https://www.sinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_2/177_ehlektricheskie-zheleznye-dorogi-2006-god/009.htm)

12. Vunivera.url [Electronic resource]/Analysis of methods for improving the traction system mode
13. "Bulletin of the results of scientific research" The prospect of developing a 12, 24 kV DC electric traction system for the Moscow– Yekaterinburg expressway / B.A. Arzhannikov, A.G. Gal-kin, A.T. Burkov, V.A. Mansurov, I.O. Naboichenko. 2015. pp. 38-44.
14. B.A. Arzhannikov, I.O. Naboychenko The concept of strengthening traction power supply of DC 3.0 kV.
15. Studopedia [Electronic resource]/Connection diagrams of transformer windings at traction substations – Access mode: [https://studopedia.su/17\\_27591\\_shemi-soedineniya-obmotok-transformatorov-na-tyagovih-podstantsiyah.html](https://studopedia.su/17_27591_shemi-soedineniya-obmotok-transformatorov-na-tyagovih-podstantsiyah.html)
16. Burkov A. T. Electronics and converter technology: Textbook Vol.1, Vol.2. - M.: UMTS ZHDT, 2015, Vol.1. – 480 p., Vol.2. – 307 p.
17. Lukutin B. V., Obukhov S. G., Plotnikov I. A. Power converters in electrical supply. – Tomsk: TPU, 2015. – 150 p.
18. Barkovsky B.S., Magay G.S., Matsenko V.P. and others. Twelve-pulse semi-conductor rec-tifiers of traction substations. – M.: Transport, 1990. – 127 p.
19. Elertra-hvac.ru [Electronic resource]/Transformer TDTN, TDTNZH, TDTSTN – decoding, characteristics, scheme, price – Access mode: <http://electra-hvac.ru/rashifrovka-tdtnzh.html>
20. L. A. Astrakhantsev, T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchenok, A. L. Martusov, O. V. Lobanov Development of a converter unit for power supply of train traffic / Educational and methodical manual on the discipline Electronic equipment and converters in power supply for students of specialty 23.05.05 "Train traffic systems", specialization "Power supply of railways roads". – Irkutsk: IrGUPS, 2022. – 50 p.

#### **Информация об авторах**

*Зарубин Андрей Динисович* – студент гр. СОД.1-17-2, Иркутский государственный уни-верситет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [amashi9191@gmail.com](mailto:amashi9191@gmail.com)

*Соболев Михаил Геннадьевич* – студент гр. СОД.1-17-2, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [mikhailsable1930@mail.ru](mailto:mikhailsable1930@mail.ru)

*Астраханцев Леонид Алексеевич* – д.т.н., профессор, профессор каф. ЭТ, Иркутский гос-ударственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [astrahancev1943@mail.ru](mailto:astrahancev1943@mail.ru)

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

*Zarubin Andrey Dinisovich* – student gr. SOD.1-17-2, Irkutsk State Transport University, Ir-kutsk, e-mail: [amashi9191@gmail.com](mailto:amashi9191@gmail.com)

*Sobolev Mikhail Gennadievich* – student gr. SOD.1-17-2, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [mikhailsable1930@mail.ru](mailto:mikhailsable1930@mail.ru)

*Astrakhantsev Leonid Alekseevich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Faculty. ET, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [astrahancev1943@mail.ru](mailto:astrahancev1943@mail.ru)