

УДК 621.311

**А. Т. Бурков, М. М. Мирсаитов****РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ СЕТИ  
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ВЛ-80Р И УТУ-1**

Дата поступления: 08.04.2016

Решение о публикации:

**Цель:** Оценить качество потребления электроэнергии, разработать методику исследования и рекомендаций по повышению качества потребления электроэнергии в электротяговой сети за счёт перехода от зонно-фазового управления однофазными выпрямителями на импульсный способ регулирования с помощью 4q-S на электровозах. **Метод исследования:** Для решения научной задачи применён современный метод математического моделирования с использованием стандартной программы MATLAB Simulink. **Результаты:** Рассмотрены особенности режимов работы электротяговой сети однофазного переменного тока железных дорог Узбекистана при эксплуатации электровозов с зонно-фазовым и импульсным управлением с помощью четырёхквadrантного преобразователя 4q-S в силовых цепях. Приведены результаты анализа режимов электротяговой сети при работе электровозов с различными энергетическими характеристиками. Оценено их влияние на показатели качества потребления электроэнергии. Выявлены факторы, обуславливающие потери электроэнергии при эксплуатации электровозов с зонно-фазовым управлением и электровозов с импульсным регулированием с помощью 4q-S. Сформулированы рекомендации по снижению реактивной мощности и потерь электроэнергии в электротяговой сети при работе электровоза УТУ-1. **Практическая значимость:** Разработана имитационная модель электрической железной дороги, включающая систему внешнего и тягового электроснабжения, а также электровозы с разными видами преобразователей однофазно-постоянного тока. Модель включает новые функции обработки данных процессов в электротяговой сети, позволяющие получить сравнительный анализ потоков энергии в питающей сети, гармонических составляющих напряжения и токов на тяговой подстанции и у токоприёмников рассматриваемых электровозов, дать оценку качества потребления электроэнергии методом анализа активной, реактивной, полной мощности, а также мощности искажения. Создана методика исследования и алгоритм оценки качества потребления электроэнергии, даны рекомендации по совместному применению традиционных электровозов ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием и электровозов нового поколения УТУ-1 с импульсным управлением и четырёхквadrантным преобразователем на железных дорогах Узбекистана.

Электротяговая сеть, электроприёмник, нелинейная нагрузка, качество потребления электроэнергии, несинусоидальность тока, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, источники гармоник, дополнительные активные потери, мощность искажения, коэффициент мощности, математическая модель, выпрямитель, зонно-фазовое управление, четырёхквadrантный преобразователь.

**Anatoliy T. Burkov**, D. Eng, professor, elsnabgd@mail.ru; **\*Mirziyod M. Mirsaitov**, postgraduate student, mirziyodmail@mail.com (Petersburg State Transport University), MODES OF ELECTROTRACTION NETWORKS IN THE OPERATION OF VL-80R AND UTY-1 ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Objective:** To assess the quality of electricity consumption and to provide recommendations for improving the quality of electricity consumption in electrical traction networks by switching from zone-phase control of single-phase rectifiers to impulse control method using 4q-S on electric locomotives. **Methods:**

Standard MATLAB Simulink program for mathematic simulation was used to solve the problem. **Results:** Specific features of the operation modes of electrical traction single-phase AC railways in Uzbekistan with emphasis on locomotives with zone-phase and impulse control using a four-quadrant converter (4q-S) in power circuits. Results of the analysis focus on locomotive networks with different power characteristics, evaluating their impact as quality indicators of electric power consumption. Factors were identified that contributed to energy losses in locomotives with zone-phase control and electric locomotives with pulse control 4q-S. It's recommended that reactive power is reduced. **Practical importance:** The simulation model of an electric railway, including a system of external and traction electric supply and electric locomotives with different types of converters using single phase DC was developed. The model includes a data processing function in electrical traction networks, allowing for comparative analysis of energy flows in the supply network. Through the analysis of active, reactive, apparent power and power distortion, the quality of energy consumption can be accurately assessed. Research methodology and algorithm of quality assessment of electricity consumption were created, as well as recommendations for joint application of traditional VL-80R electric locomotives with zone-phase control and UTY-1 electric locomotives of the new generation with impulse control and four-quadrant converter on the Railways of Uzbekistan.

Electrical traction network, receivers, non-linear load, quality of electricity consumption, non-sinusoidal current and voltage, harmonics, sources of harmonics, additional active loss, power distortion, power factor, mathematical model, rectifier, zone-phase control, four-quadrant converter.

На железных дорогах Узбекистана эксплуатируются традиционные электровозы ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием [11] и электровозы УТУ-1 нового поколения с асинхронными двигателями и четырёхквadrантными преобразователями. Энергетические характеристики этих электровозов отличаются по показателям качества электропотребления.

Электрический подвижной состав (ЭПС) с зонно-фазовым регулированием влияет на качество электропотребления за счёт повышенного уровня обмена с питающей сетью реактивной мощностью, на искажения синусоидальности потребляемого тока и на загрузки электротяговой сети нечётными высшими гармоническими составляющими. Это вызывает нестабильность уровня напряжения в контактной сети (КС) и увеличивает потери мощности в электротяговой сети, а также отрицательно (негативно) влияет на электроэнергетические показатели тяговых подстанций (ТП) и системы внешнего электроснабжения.

Электровозы нового поколения, оборудованные однофазными преобразователями с импульсным принципом управления, позволяющими формировать синусоидальную

кривую тока в питающей сети при взаимодействии с электротяговой сетью, создают благоприятные условия для снижения загрузки сетей реактивной энергией и уменьшения содержания высших гармонических составляющих. Эти условия способствуют повышению энергетической эффективности работы электротяговой сети.

Электровозы ВЛ-80Р и современные электровозы УТУ-1 с асинхронным приводом находятся в эксплуатации на линии скоростной магистрали Ташкент – Самарканд.

При совместной работе ЭПС с зонно-фазовым регулированием и с импульсными четырёхквadrантными преобразователями могут быть реализованы режимы работы, в которых электровоз с импульсным регулированием может выступать как компенсатор отстающей реактивной мощности и как регулятор гармонического состава тока тяговой сети.

Для достижения поставленной цели разработаны математическая модель и методика исследования потребления электроэнергии из электротяговой сети электровозами ВЛ-80Р и УТУ-1 [8, 10]. Даны рекомендации по повышению качества потребления электроэнергии

при раздельной и совместной работе электро-  
возов ВЛ-80Р и УТУ-1 на участках железных  
дорог Узбекистана.

### Исходные данные исследуемой электротяговой сети

Расчётная схема системы тягового электро-  
снабжения с электровозами ВЛ-80Р и УТУ-1  
приведена на рис. 1.

ТП с трёхфазным трансформатором обес-  
печивает электроэнергией однофазную на-  
грузку электротяговой сети. ТП питается от  
высоковольтной линии центрального питания  
(ЦП) 110 кВ, 50 Гц. По КС электроэнергия  
напряжением 25 кВ подаётся к электровозам  
[13]. Цепь тягового тока замыкается по обрат-  
ной рельсовой сети (РС). Схема электровоза  
ВЛ-80Р включает блок тягового трансформа-  
тора (ТТ), блок управления выпрямительной  
установкой однофазного тока (УС); сглажи-

вающий реактор ( $L_d$ ), коллекторный двигатель  
постоянного тока (ДТП) с обмоткой возбуж-  
дения (ОВ). На электровозе УТУ-1 применя-  
ется современный бесколлекторный тяговый  
электропривод, схема которого содержит ТТ,  
четырёхквadrантный преобразователь (4q-S),  
конденсаторный фильтр ( $C_d$ ), автономный ин-  
вертор напряжения с широтно-импульсной  
модуляцией (АИН ШИМ) и асинхронный  
двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.  
Основные технические данные электровозов  
приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведена схема питания и сек-  
ционирования контактной сети на рассматри-  
ваемом участке.

Основное оборудование и параметры  
тяговых подстанций (рис. 2) приведены в  
табл. 2.

Энергетические показатели электротяговой  
сети на участке Янгиер – Разъезд № 13 (рис. 3)  
железных дорог Узбекистана исследованы при  
консольном питании электровозов ВЛ-80Р и

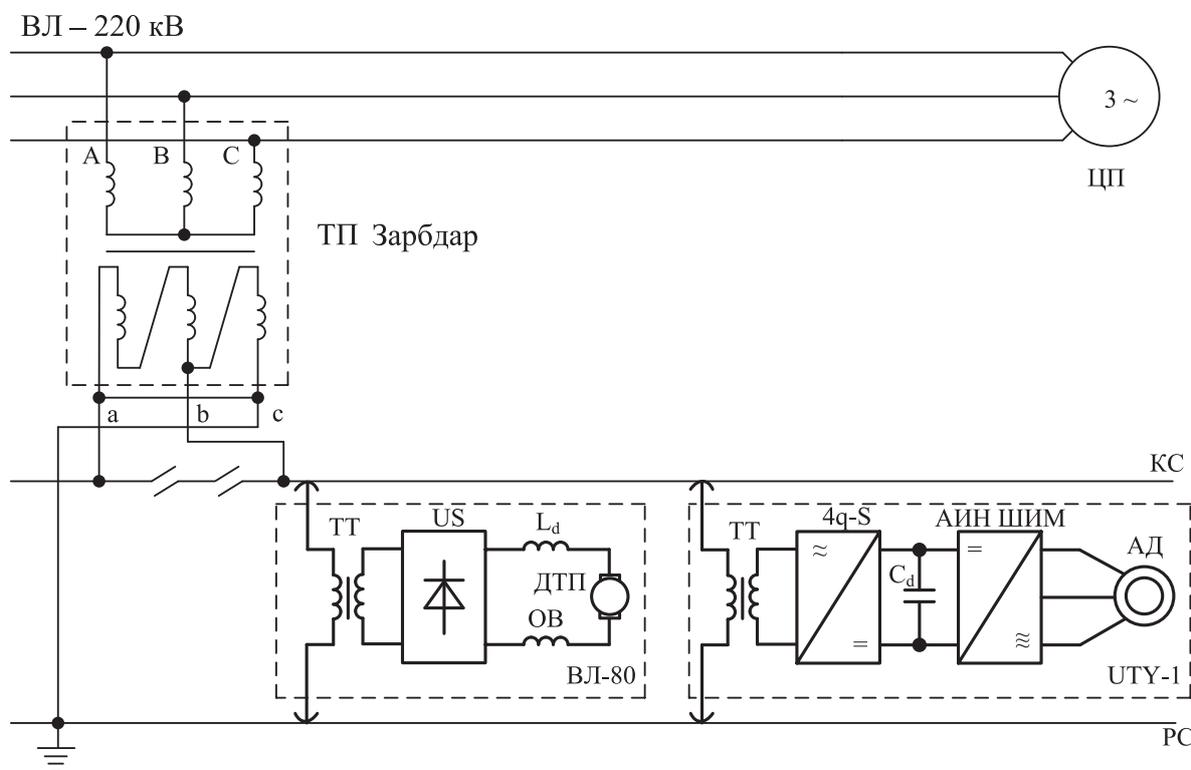


Рис. 1. Расчётная схема системы внешнего и тягового электроснабжения  
с электровозами ВЛ-80Р и УТУ-1

ТАБЛИЦА 1. Основные технические данные электровозов ВЛ-80 Р и УТУ-1

| Параметры и характеристики                         | Тип электровоза          |             |
|--|--------------------------|-------------|
|  | ВЛ-80Р                   | УТУ-1       |
| Род тока   | Переменный               |             |
| Номинальное питающее напряжение, кВ                | 25                       |             |
| Частота, Гц  | 50                       |             |
| Формула ходовой части                              | $2_0-2_0-2_0-2_0$        | Во-Во-Во    |
| Колея, мм  | 1520                     |             |
| Конструкционная скорость, км/ч                     | 110                      | 120         |
| Масса электровоза с 2/3 запаса песка, т            | $192 \pm 4$              | $138 \pm 1$ |
| Масса, приходящаяся на ось, т                      | $24 \pm 0,7$             | 23          |
| Коэффициент мощности в продолжительном режиме тяги | 0,84                     | 0,95        |
| Работоспособность при напряжении питания, кВ       | 19–29                    |             |
| Тяговый двигатель                                  | НБ-418 К6                | 1ТВ-2624    |
| Мощность двигателя, кВт                            | 790                      | 1020        |
| Номинальное напряжение звена постоянного тока, В   | 950                      | 2063        |
| Система управления электровозом                    | Косвенная, дистанционная |             |

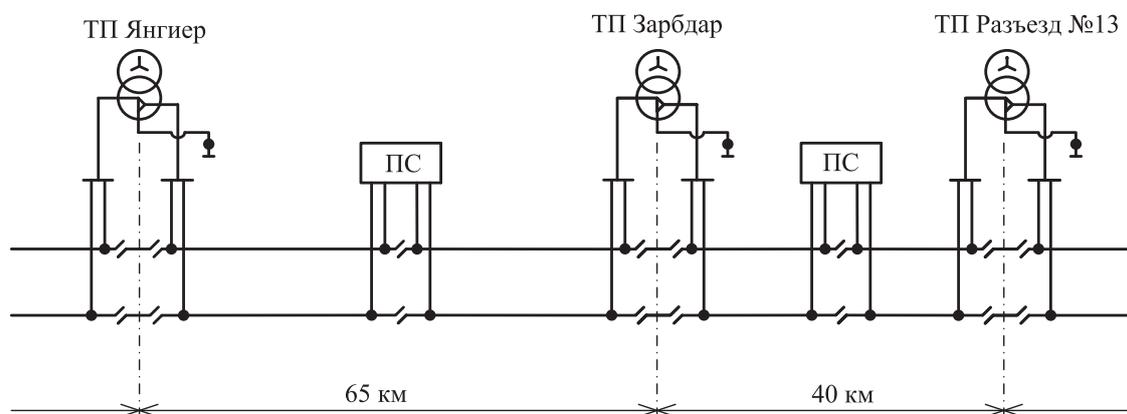


Рис. 2. Схема питания и секционирования контактной сети участка Янгиер – Разъезд № 13

ТАБЛИЦА 2. Основное оборудование тяговых подстанций

| Подстанция | Тип трансформатора       | Номинальная мощность, кВА | Номинальное напряжение, кВ | Ток холостого хода, % | Напряжение короткого замыкания, % |
|------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Янгиер     | ТДТНЖ-25000/<br>110-69У1 | 25000                     | 110/27,5                   | 0,9                   | 10,5                              |
| Зарбдар    | ТДТНЖ-40000/<br>220-76У1 | 40000                     | 220/27,5                   | 1,1                   | 12,5                              |
| Разъезд 13 | ТДТНЖ-25000/<br>110-69У1 | 25000                     | 110/27,5                   | 0,9                   | 10,5                              |

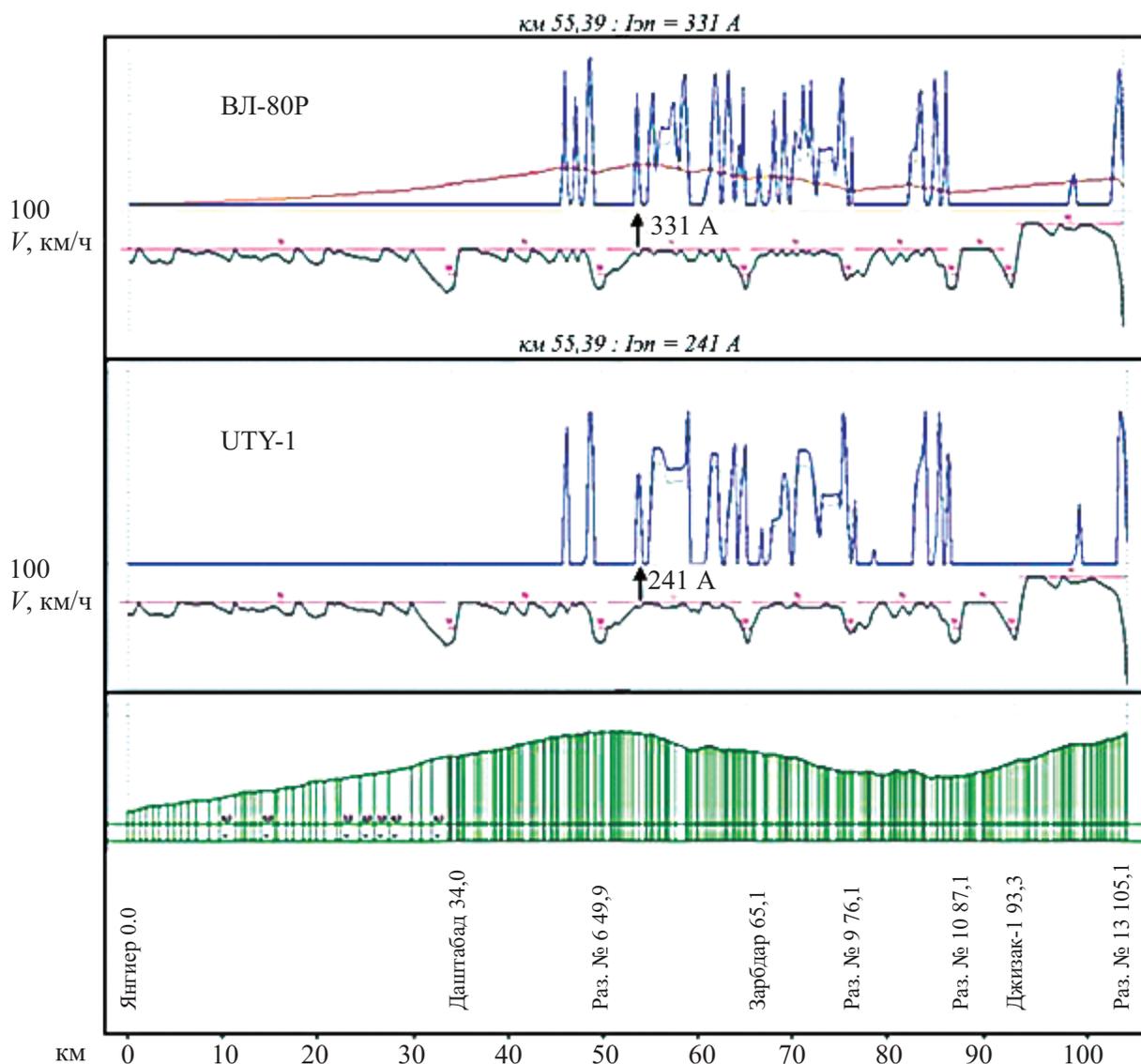


Рис. 3. Профиль пути участка Янгйер – Разъезд № 13, диаграммы токопотребления и скорости движения электровозов ВЛ-80Р и УТУ-1

УТУ-1 от тяговой подстанции Зарбдар с токами нагрузки электровозов, полученными по результатам тяговых и электрических расчётов, выполненных с помощью комплекса программ расчёта тягового электроснабжения (КОРТЭС) разработки ОАО «ВНИИЖТ».

Электровозы ВЛ-80Р или УТУ-1, следующие по участку Янгйер – Разъезд № 13 с грузовыми составами массой 2200 т, при проходе 55 километра, удалённого от тяговой подстанции Зарбдар на 10 км, потребляют из тяговой сети в данной точке 331 А и 241 А, соответственно.

### Метод исследования

Для решения научной задачи разработана имитационная модель электрической железной дороги в пакете MATLAB/Simulink (рис. 4) [2]. Модель включает в себя модули источника питания системы внешнего электроснабжения 1 [5], силового трансформатора подстанции 2, эквивалентной электротяговой сети 3, принятой в соответствии с [4] для однопутного участка с удельным активным сопротивлением  $R = 0,194$  Ом и с индуктивностью  $L = 1,477$  мГн на 1 км длины контактной сети.

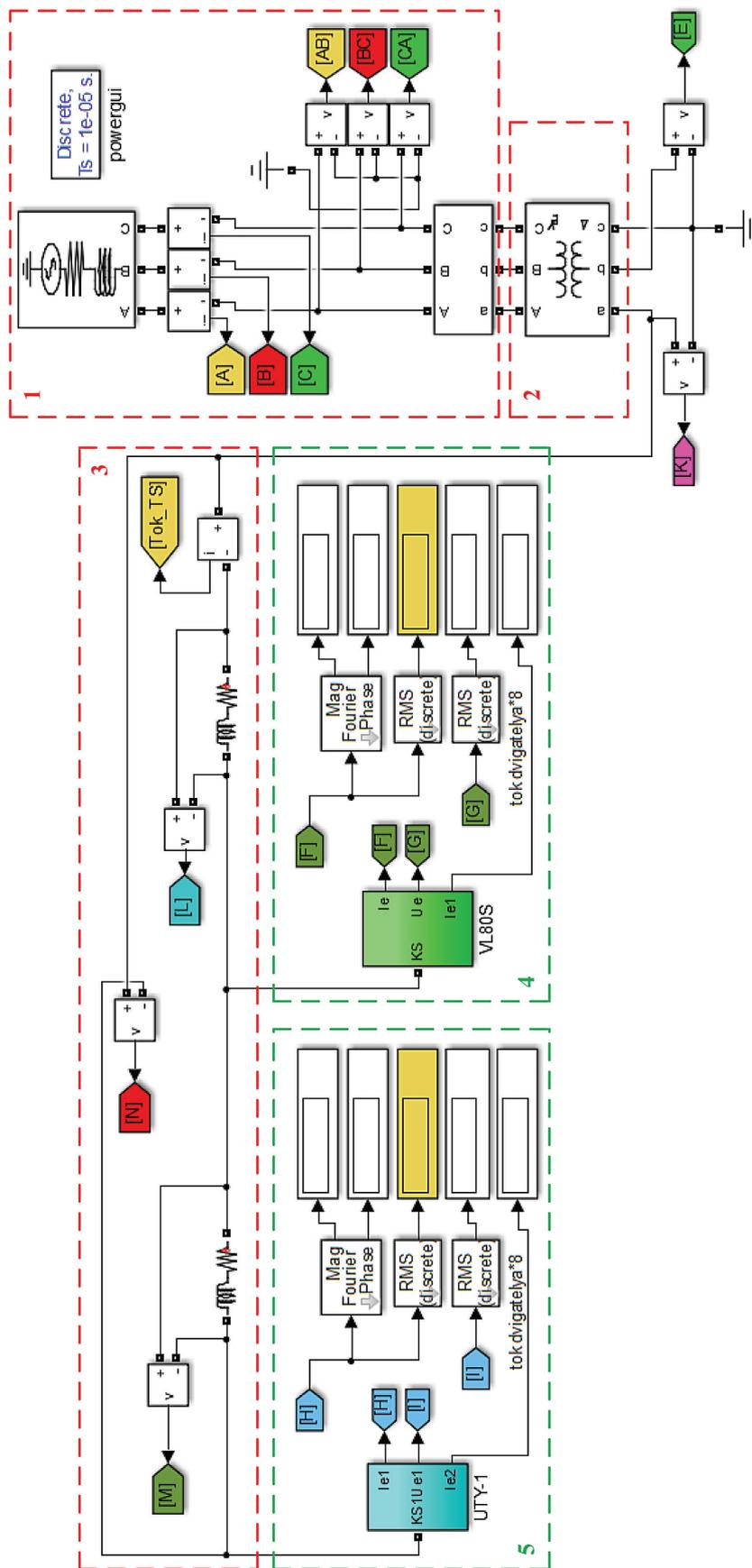


Рис. 4. Реализация имитационной модели в пакете Matlab/Simulink для мгновенной схемы электроподводящей сети по приведённым исходным данным

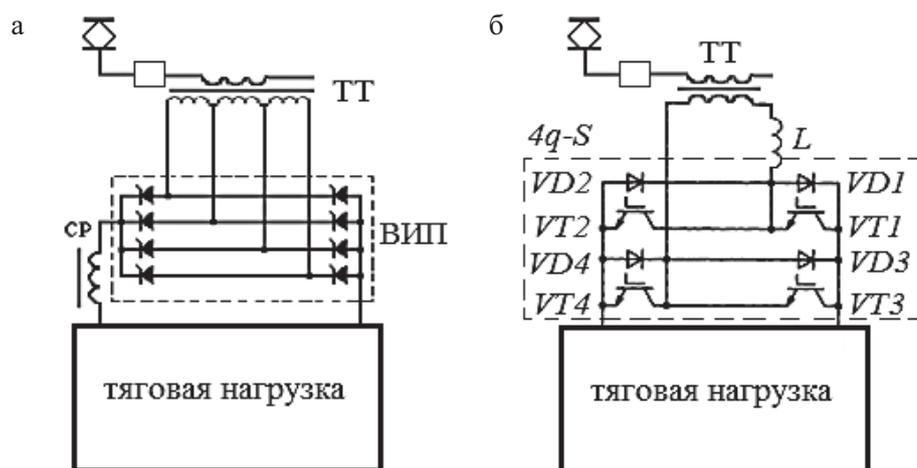


Рис. 5. Модели тяговых преобразователей для электровазов ВЛ-80Р (а) и УТУ-1 (б) в программе Matlab/Simulink

Модели тяговых преобразователей электровазов 4 и 5 представлены на рис. 5.

Модель силового трёхфазного трансформатора тяговой подстанции выполнена с учётом особенностей его работы на однофазную нагрузку электротяговой сети [15].

Силовые схемы электровазов в модели представлены блоками ТТ, ВИП (4q-S) [12] и тяговой нагрузкой. Питание тяговых двигателей осуществляется от преобразователей однофазного тока контактной сети в постоянный ток. Асинхронный тяговый двигатель с АИН ШИМ представлен эквивалентной активной нагрузкой с противо-ЭДС ( $E_d$ ) для контура постоянного напряжения [14]. На рис. 5 представлены модели выпрямителя с зонно-фазовым регулированием ВЛ-80Р (рис. 5а) и четырёхквadrантным преобразователем с импульсным управлением УТУ-1 (рис. 5б) [9].

Адекватность математической модели подтверждена удовлетворительным совпадением результатов моделирования с данными, полученными в работах [6, 7], а также на макет-модели электрической железной дороги в учебно-исследовательской лаборатории ПГУПС.

Качество электрообеспечения тяговой нагрузки на линии Янгьер – Разъезд № 13 оценено по результатам анализа процессов в электротяговой сети с помощью разработанной имитационной модели. За показатели качества приняты коэффициент мощности,

значения гармонических составляющих напряжения и тока до 20-го порядка [1], полный (суммарный) коэффициент гармоник напряжения с учётом влияния всех гармоник напряжения до 20-го порядка  $k_{U(n)}$  в точке передачи электроэнергии, потоки активной, реактивной мощности и мощности искажения, а также мощность потерь электроэнергии в электротяговой сети.

На рис. 6 приведены диаграммы напряжений, токов и мощностей для рассматриваемых электровазов в режиме, указанном в исходных данных.

Из анализа диаграмм (рис. 6) следует, что активная мощность передаётся к ЭПС основной гармонической составляющей  $P_{(1)}$ , а мощность искажения  $D$  не участвует в передаче энергии от ТП к ЭПС, а носит характер обмена энергией так же, как и реактивная составляющая мощности основной гармонической составляющей  $Q_{(1)}$ . Искажение по току при эксплуатации электроваза УТУ-1 значительно меньше, чем у электроваза ВЛ-80Р.

### Анализ результатов моделирования режимов работы электротяговой сети

При синусоидальных напряжении и токе полная, активная и реактивная мощности выражаются следующим образом:

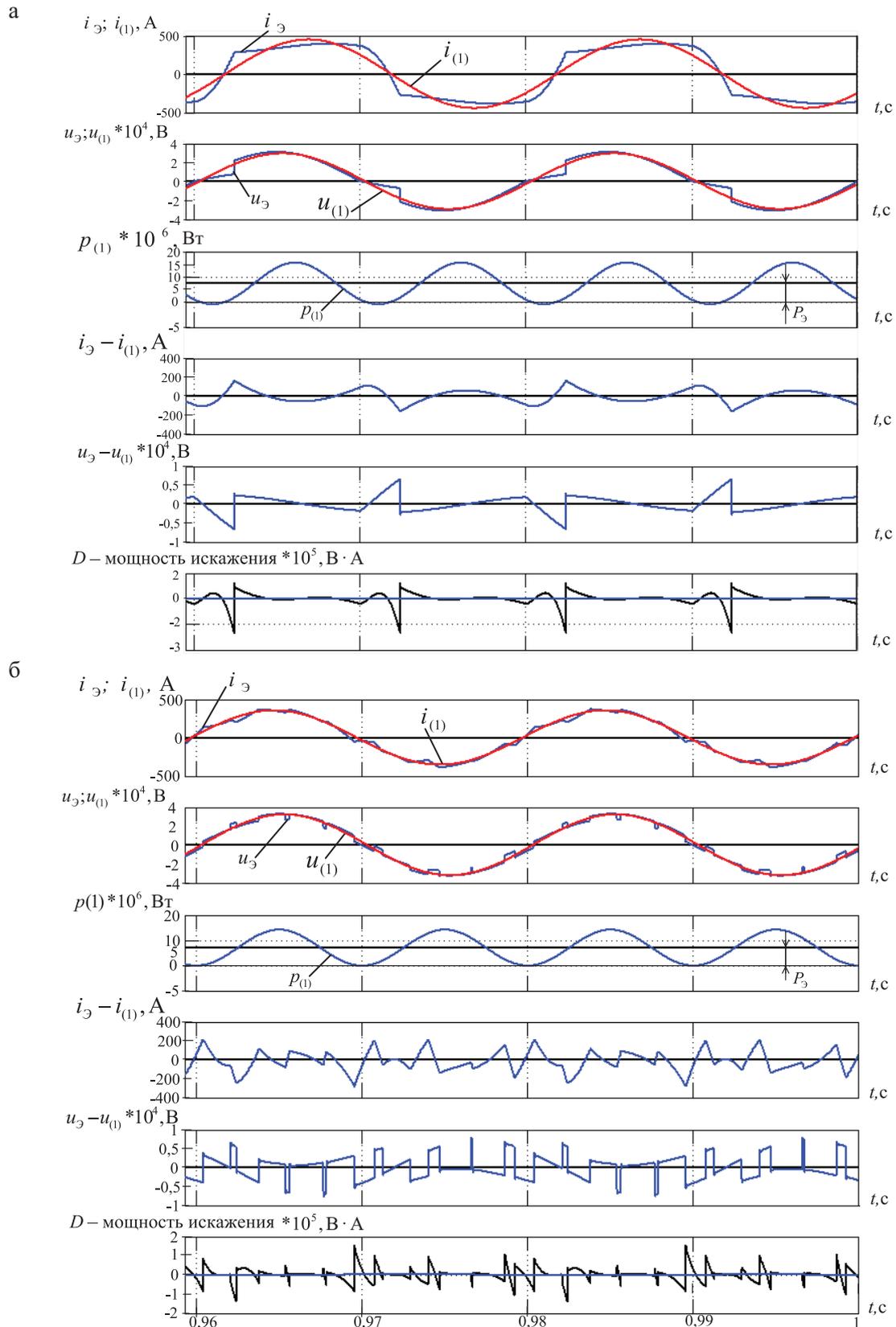


Рис. 6. Диаграмма токов, напряжений и мощностей электровозов ВЛ-80Р (а) и УТУ-1 (б) для режима работы на 55 км линии Ташкент – Самарканд с поездами массой 2200 т

$$S = U \cdot I;$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi;$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi,$$

где  $U, I$  – эффективные значения напряжения и тока, соответственно;  $\varphi$  – фазовый угол сдвига между кривыми напряжения и тока.

Мгновенная мощность в этом случае составляет [4]:

$$p(\omega t) = ui = UI[\cos - \cos(2\omega t - \varphi)].$$

Мгновенная мощность (см. рис. 6) пульсирует с двойной частотой сети относительно среднего значения  $P = UI \cos \varphi$ .

В реальной схеме токи и напряжения электропроводящей сети несинусоидальны и содержат кроме основной гармонической спектр высших гармонических составляющих.

При несинусоидальности тока и напряжения [3] полная мощность определяется произведением эффективных значений несинусоидальных напряжения и тока:

$$S = U \cdot I = \sqrt{U_{(1)}^2 + \sum_{n>1} U_{(n)}^2} \cdot \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_{n>1} I_{(n)}^2}, \quad (1)$$

где  $U$  и  $I$  – эффективные значения полных напряжения и тока, соответственно;  $U_{(1)}$  и  $I_{(1)}$  – эффективные значения основных гармонических составляющих напряжения и тока, соответственно;  $U_{(n)}$  и  $I_{(n)}$  – эффективные значения высших гармонических составляющих напряжения и тока порядка  $n$ , соответственно.

При допущении передачи активной мощности за счёт основной гармонической составляющей напряжения и тока

$$P_{(1)} = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)},$$

где  $\varphi_{(1)}$  – фазовый угол между основными гармоническими составляющими напряжения и тока.

Условная неактивная мощность определяется высшими гармоническими составляющими

и реактивной составляющей основной гармоники:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_{(1)}^2}.$$

Коэффициент мощности определяется по формуле

$$k_m = \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{U_{(1)}}{U} \cdot \frac{I_{(1)}}{I} \cdot \cos \varphi_{(1)} = k_{uU} \cdot k_{iI} \cdot \cos \varphi_{(1)},$$

где  $k_{uU}$  и  $k_{iI}$  – коэффициенты искажения по напряжению и току, соответственно.

В свою очередь, эквивалентная неактивная мощность  $Q$  может быть разделена на реактивную мощность основной гармонической составляющей и мощность искажения, определяемую высшими гармоническими составляющими тока и напряжения.

Указанные составляющие мощности представлены графически в виде совокупности треугольников мощностей для основной гармонической составляющей и дополнительным треугольником искажения [4] (рис. 7).

Используя диаграмму (рис. 7), выделим в составе полной мощности  $S$  составляющую

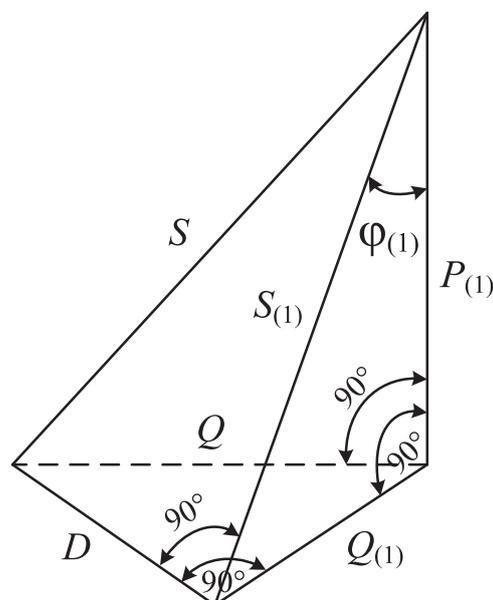


Рис. 7. Диаграмма определения полной, активной и реактивной мощностей и мощности искажения

$D$ , зависящую от высших гармонических составляющих напряжения и тока:

$$D = \sqrt{S^2 - S_{(1)}^2}. \quad (2)$$

Исследуем содержание составляющих полной мощности, проанализировав выражение (1). Раскроем выражение (1) в форме суммы квадратов составляющих мощности, определяемых произведениями квадратов гармонических составляющих напряжения и тока, чередующихся по сочетаниям номеров гармонических составляющих до девятого порядка. Результаты выделения квадратов составляющих мощности систематизированы в табл. 3.

Из состава полной мощности  $S$  выделены квадраты полной мощности  $S_{(1)}^2$  и высших  $D_{(3)}^2, D_{(5)}^2, D_{(7)}^2, D_{(9)}^2$  гармонических составляющих, а также составляющих полной мощности с разными сочетаниями номеров высших гармонических составляющих напряжения и тока. Например,  $D_{(1,3)}^2$  соответствует произведению квадрата напряжения первой и квадрата третьей гармонических составляющих.

Из анализа компонентов мощности, приведённых в табл. 3, принято предположение, что составляющие мощности разделяются на 3 группы: гармонические составляющие мощности высших порядков (диагональ таблицы), составляющие от основных гармонических напряжения или тока и гармонических составляющих высшего порядка тока и напряжения (вертикаль и горизонталь таблицы) и все

остальные сочетания номеров гармоник высшего порядка (оставшиеся клетки таблицы).

Таким образом, активная мощность, передаваемая к потребителю, определяется активной мощностью основной гармоники, а неактивная мощность обмена энергией между источником и потребителем определяется по выражению

$$Q = \sqrt{Q_{(1)}^2 + D^2},$$

где по формуле (2)

$$D = \sqrt{\sum_{n=1}^9 U_{(n)}^2 \cdot \sum_{n=1}^9 I_{(n)}^2 - U_{(1)}^2 \cdot I_{(1)}^2}.$$

По указанным формулам рассчитана мощность основных и высших гармонических составляющих тока и напряжений тяговой сети у рассматриваемых электровозов при нахождении их на расстоянии 10 км от тяговой подстанции. Результаты расчётов приведены в правой части табл. 4–7.

Результаты гармонического анализа токов и напряжений питающих линий тяговой подстанции и электровозов с разными типами управления приведены в левой части табл. 4–7. Выделены основные и нечётные высшие гармонические составляющие до 20-го порядка.

Результаты расчётов, приведённые в табл. 4–7, при применении электровозов с четырёхквadrантным преобразователем с импульсным регулированием и электровозов с

ТАБЛИЦА 3. Компоненты квадрата полной мощности электрической сети с несинусоидальными током и напряжением

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| $S_{(1)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(1)}^2$   | $D_{(1,3)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(3)}^2$ | $D_{(1,5)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(5)}^2$ | $D_{(1,7)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(7)}^2$ | $D_{(1,9)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(9)}^2$ |
| $D_{(3,1)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(1)}^2$ | $D_{(3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(3)}^2$   | $D_{(1,3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(5)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(7)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(9)}^2$ |
| $D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(1)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(3)}^2$ | $D_{(5)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(5)}^2$   | $D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(7)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(9)}^2$ |
| $D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(1)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(3)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(5)}^2$ | $D_{(7)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(7)}^2$   | $D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(9)}^2$ |
| $D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(1)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(3)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(5)}^2$ | $D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(7)}^2$ | $D_{(9)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(9)}^2$   |

ТАБЛИЦА 4. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности питающей линии тяговой подстанции при эксплуатации ВЛ-80Р

| Гармоники  | $U_m$ ,<br>В | $I_m$ ,<br>А | $\varphi_{(n)}$ | $P(n)$ ,<br>кВт | $Q_{1(n)}$ ,<br>квар | $S(n)$ ,<br>кВА | $S$ ,<br>кВА | $D$ ,<br>квар | $k_m$ | $\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$ |
|------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------|-------|-------------------------|
| 1-я        | 38600        | 447,8        | -30,17          | 7472            | 4343                 | 8642,5          | 8970,5       | 2403,3        | 0,83  | 0,996<br>0,966          |
| 3-я        | 2303         | 105,1        | 92,11           | 4,457           | 120,94               | 121,02          |              |               |       |                         |
| 5-я        | 1762         | 48,33        | 268,5           | 1,1146          | 42,56                | 42,58           |              |               |       |                         |
| 7-я        | 1167         | 22,92        | 91,54           | 0,359           | 13,37                | 13,34           |              |               |       |                         |
| 9-я        | 715,1        | 10,92        | 91,88           | 0,128           | 3,9                  | 3,90            |              |               |       |                         |
| Эфф. знач. | 27388        | 328          |                 |                 |                      |                 |              |               |       |                         |

ТАБЛИЦА 5. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности электровоза ВЛ-80Р

| Гармоники  | $U_m$ ,<br>В | $I_m$ ,<br>А | $\varphi_{(n)}$ | $P(n)$ ,<br>кВт | $Q_{1(n)}$ ,<br>квар | $S(n)$ ,<br>кВА | $S$ ,<br>кВА | $D$ ,<br>квар | $k_m$ | $\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$ |
|------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------|-------|-------------------------|
| 1-я        | 36810        | 447,8        | -28,015         | 7276            | 3871                 | 8241,7          | 8612,5       | 2499,74       | 0,84  | 0,987<br>0,966          |
| 3-я        | 3798         | 105,1        | 94,51           | 15,7            | 199                  | 199,59          |              |               |       |                         |
| 5-я        | 2901         | 48,33        | 267             | 3,669           | 70                   | 70,1            |              |               |       |                         |
| 7-я        | 1921         | 22,92        | 92,59           | 0,995           | 22                   | 22              |              |               |       |                         |
| 9-я        | 1177         | 10,92        | 92,71           | -0,3            | 6,42                 | 6,43            |              |               |       |                         |
| Эфф. знач. | 26295        | 328          |                 |                 |                      |                 |              |               |       |                         |

ТАБЛИЦА 6. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности питающей линии тяговой подстанции при эксплуатации УТУ-1

| Гармоники  | $U_m$ ,<br>В | $I_m$ ,<br>А | $\varphi_{(n)}$ | $P(n)$ ,<br>кВт | $Q_{1(n)}$ ,<br>квар | $S(n)$ ,<br>кВА | $S$ ,<br>кВА | $D$ ,<br>квар | $k_m$ | $\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$ |
|------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------|-------|-------------------------|
| 1-я        | 40640        | 354,6        | 8,56            | 7125,2          | 1072,5               | 7205,5          | 7213         | 328,8         | 0,988 | 0,999<br>0,999          |
| 3-я        | 366,7        | 15,85        | 91,57           | 0,08            | 2,905                | 2,906           |              |               |       |                         |
| 5-я        | 27,58        | 0,3          | -163,1          | 0,004           | 0,0012               | 0,004           |              |               |       |                         |
| 7-я        | 19,19        | 0,1          | -119,3          | 0,0005          | 0,0009               | 0,001           |              |               |       |                         |
| 9-я        | 17,34        | 0,37         | 70              | 0,001           | 0,003                | 0,003           |              |               |       |                         |
| Эфф. знач. | 28738        | 251          |                 |                 |                      |                 |              |               |       |                         |

ТАБЛИЦА 7. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности электровоза УТУ-1

| Гармоники  | $U_m$ ,<br>В | $I_m$ ,<br>А | $\varphi_{(n)}$ | $P(n)$ ,<br>кВт | $Q_{1(n)}$ ,<br>квар | $S(n)$ ,<br>кВА | $S$ ,<br>кВА | $D$ ,<br>квар | $k_m$ | $\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$ |
|------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|--------------|---------------|-------|-------------------------|
| 1-я        | 40 230       | 354,6        | 11              | 7001,7          | 1361                 | 7132,8          | 7140,7       | 336,56        | 0,981 | $\frac{0,999}{0,999}$   |
| 3-я        | 601,9        | 15,85        | 93,88           | 0,322           | 4,76                 | 4,77            |              |               |       |                         |
| 5-я        | 44,66        | 0,3          | -162,5          | 0,006           | 0,002                | 0,006           |              |               |       |                         |
| 7-я        | 30,55        | 0,1          | -123,1          | 0,0009          | 0,001                | 0,0017          |              |               |       |                         |
| 9-я        | 29,66        | 0,37         | 71              | 0,0018          | 0,005                | 0,005           |              |               |       |                         |
| Эфф. знач. | 28 450       | 251          |                 |                 |                      |                 |              |               |       |                         |

зонно-фазовым управлением существенно различаются по значениям мощности искажения, которые определяются регулированием угла сдвига основной гармоники тока относительно напряжения и формированием кривой потребляемого тока, близкой к синусоидальной кривой. Значения  $\varphi_{(n)}$ , приведённые в табл. 6, 7, показывают, что электровоз УТУ-1 является формирователем синусоидального тока и генератором опережающей реактивной мощности.

Сравнение режимов работы сети при питании рассматриваемых электровозов с одинаковой массой поезда показывает, что при применении ЭПС с 4q-S с импульсным регулированием потери в электротяговой сети сокращаются в 1,5–2 раза, так как эффективное значение тока при той же мощности снижается примерно на 30% за счёт существенного уменьшения реактивной мощности. Благодаря значительному снижению реактивной энергии и, как следствие, полной энергии, коэффициент мощности на тяговой подстанции  $k_m = 0,99$ , а на электровозе  $k_m = 0,98$ , тогда как при работе электровоза ВЛ-80 Р  $k_m$  на тяговой подстанции и на самом электровозе составил 0,83 и 0,84, соответственно. Применение электровоза с повышенным коэффициентом мощности существенно снижает потребление реактивной мощности, а также способствует сокращению потерь в электротяговой сети.

Сравнение показывает, что увеличение искажений тока и напряжения приводит к увеличению неактивной мощности, зависящей от реактивной мощности основной гармоники и мощности искажения.

Увеличение числа учитываемых высших гармонических составляющих отражается на характере изменения значений гармонических напряжения, тока и мощности высшего порядка. Для ВЛ-80Р характерно существенное изменение в спектре высших гармонических тока: значения с повышением порядка монотонно уменьшаются (рис. 8а). Для УТУ-1 характерно изменение в спектре напряжения по определённой закономерности: с увеличением порядка высших гармонических напряжения в зоне частот, близких к частоте модуляции, отмечаются повышенные значения амплитуд соответствующих гармонических напряжения (рис. 8б).

На рис. 8 приведены результаты спектрального анализа высших гармонических составляющих тока электровоза с однофазным выпрямителем, напряжений электровоза с четырёхквadrантным преобразователем и тяговой подстанции при его работе, подтверждающие общие закономерности формирования спектров несинусоидального тока и напряжения с коммутационными искажениями при работе входных преобразователей однофазного постоянного тока.

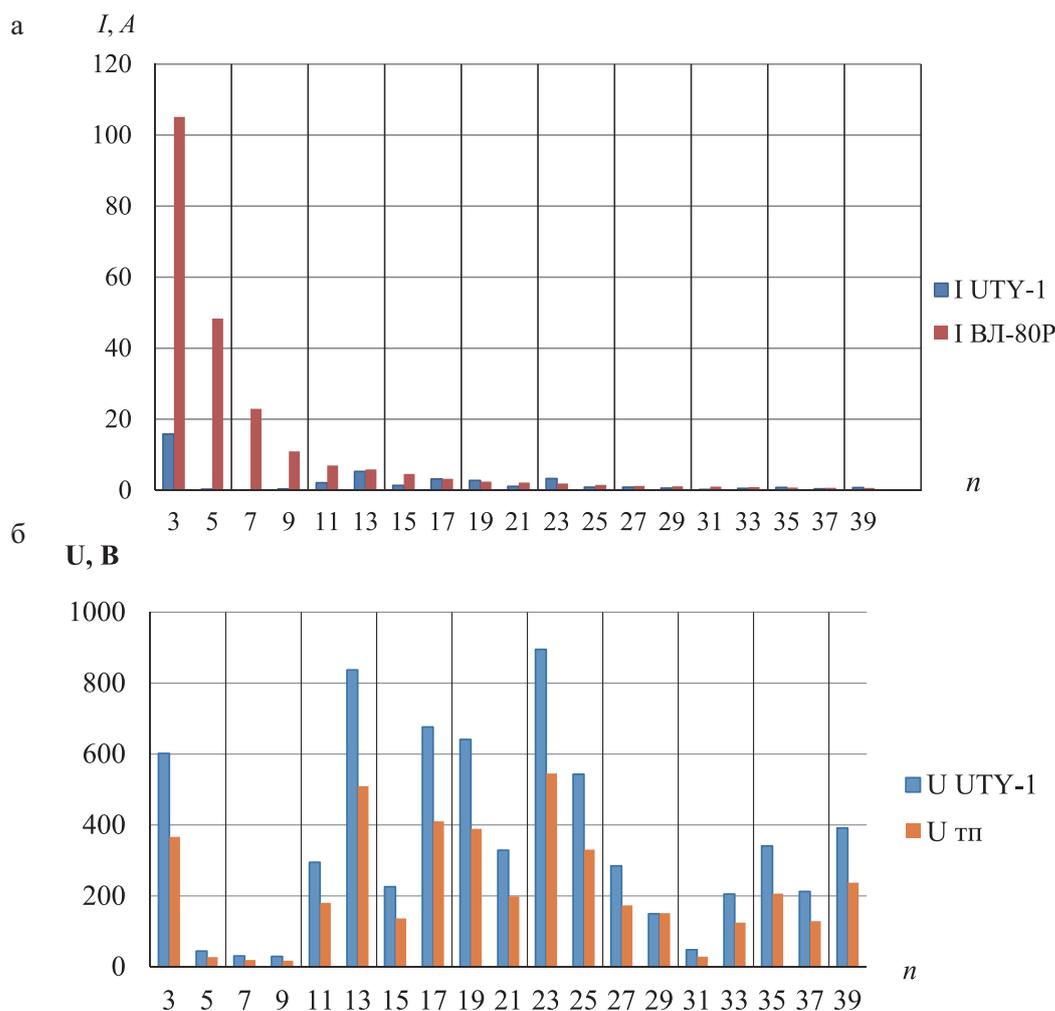


Рис. 8. Диаграммы высших гармонических тока ВЛ-80 Р (а) и напряжений УТУ-1 и тяговой подстанции при работе УТУ-1 (б)

## Выводы

Электропоезда ВЛ-80Р и УТУ-1 являются источниками нелинейных искажений напряжения и тока электротяговой сети, вызываемых генерированием преобразователями энергии тягового электропривода высших гармонических составляющих напряжения и тока с частотами, многократно превышающими частоту сети 50 Гц. Спектральный состав и мощность высших гармонических составляющих, определяющие дополнительные потери и мощность искажения, существенно различаются для электропоездов с зонно-фазовым регулированием и с импульсным управлением. Выявлена особенность формирования спек-

трального состава напряжения и тока для различных электропоездов. Наибольшие искажения по току – у преобразователей с зонно-фазовым регулированием, по напряжению – на высоких частотах для импульсных преобразователей 4q-S.

Качество электропотребления электропоездами с зонно-фазовым регулированием и с импульсным управлением преобразователей характеризуется различающимися значениями показателей обмена в сети реактивной энергией и энергией искажения при передаче одинаковой по мощности активной энергии.

Интегральным показателем качества электропотребления является коэффициент мощности, который оценивается значениями

0,84 для ВЛ-80Р и 0,98 для УТУ-1. Увеличение коэффициента мощности электровозов УТУ-1 по сравнению с электровозами ВЛ-80Р при равной передаваемой активной мощности позволяет уменьшить эффективное значение тока электротяговой сети на 25–30% за счёт компенсации реактивной энергии основной гармонической составляющей на самом электровозе и формирования тока, близкого к синусоиде.

### Библиографический список

1. Алексеев А. С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / Алексеев А. С. – М., 2009. – 302 с.
2. Ануфриев И. Е. MATLAB 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
3. Бурков А. Т. Управление электроэнергетическими процессами локомотивов с асинхронным приводом : дис. ... докт. тех. наук : 05.22.07 / А. Т. Бурков. – Л. : ЛИИЖТ, 1982. – 470 с.
4. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника / А. Т. Бурков. – Т. 2. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. – 307 с.
5. Бурьяноватый А. И. Использование пакета MATLAB-Simulink для расчёта режимов электрических сетей / А. И. Бурьяноватый, М. А. Иванов, А. Е. Шаговик // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте: материалы VI Международ. симп. «Элтранс-2011», 25–28 окт. 2011 г. – СПб. : ПГУПС, 2013–584 с.
6. Быков Ю. Г. Регулировочные характеристики однофазного обратимого преобразователя напряжения / Ю. Г. Быков, Ю. М. Иньков, М. Д. Симонен // Электричество. – 1996. – № 9. – С. 63–65.
7. Гарбузов И. И. Влияние бортовых компенсирующих устройств на энергетические показатели качества электровозов переменного тока : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / И. И. Гарбузов. – М. : МГУПС (МИИТ), 2015. – 181 с.
8. Дашенко О. Ф. MATLAB в инженерных и научных расчетах / О. Ф. Дашенко, В. Х. Кириллов, Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей. – Одесса : Астропринт, 2003. – 214 с.
9. Джуров И. А. Повышать энергоэффективность рекуперативного торможения / И. А. Джуров // Локомотив. – 2010. – № 7. – С. 4–6.
10. Дьяконов В. П. MATLAB 7.\* / R2006 / R2007 : самоучитель / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 768 с.
11. Кулинич Ю. М. Повышение качества электроэнергии, потребляемой с электровозом однофазного постоянного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности : дис. ... д-ра тех. наук : 05.09.03 / Ю. М. Кулинич. – М., 2002. – 270 с.
12. Литовченко В. В. 4q-S четырёхквadrантный преобразователь электровозов переменного тока / В. В. Литовченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 64–73.
13. Савоськин А. Н. Исследование электромагнитных процессов в электрической железной дороге переменного тока на базе вычислительного комплекса реального времени / А. Н. Савоськин, А. А. Чучин, Д. И. Болдин, М. В. Телегин // Вестн. ВЭЛНИИ. – 2011. – № 1 (61). – С. 23–38.
14. Телегин М. В. Адаптивная система комбинированного автоматического управления током тяговых двигателей электроподвижного состава : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.06 / М. В. Телегин. – М., 2013. – 267 с.
15. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

### References

1. Alekseyev A. S. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya toka kollektornykh tyagovykh dvigateley elektrovoza [System for Automatic Current Control in Commutator Traction Engine of an Electric Locomotive]. Moscow, 2009. 302 p.
2. Anufriyev I. Ye., Smirnov A. B. & Smirnova Ye. N. MATLAB 7. St. Petersburg, BKhV-Petersburg, 2005. 1104 p.
3. Burkov A. T. Upravleniye elektroenergeticheskimi protsessami lokomotivov s asinkhronnym privodom

[Control of Power Processes in Induction-motor Drive Locomotives]. Leningrad, LIIZhT, 1982. 470 p.

4. Burkov A. T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Equipment]. Vol. 2. Moscow, UMTs po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2015. 307 p.

5. Buryanovatyy A. I., Ivanov M. A. & Shagovik A. Ye. Ispolzovaniye paketa MATLAB-Simulink dlya rascheta rezhimov elektricheskikh setey [Application of MATLAB-Simulink Software Suite to Calculation of Electrical Networks' Regimes]. *Elektrifikatsiya i razvitiye infrastruktury energoobespecheniya tyagi poyezdov na zheleznodorozhnom transporte: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma „Eltrans-2011“ (Electrification and Development of Power Provision Infrastructure for Train Traction on Railway Transport: Proc. of 6<sup>th</sup> Intl. Symp. “Eltrans-2011”)*, Oct. 25–28, 2011. St. Petersburg, PGUPS, 2013. 584 p.

6. Bykov Yu. G., Inkov Yu. M. & Simonov M. D. *Elektrichestvo – Electricity*, 1996, no. 9, pp. 63-65.

7. Garbuzov I. I. Vliyaniye bortovykh kompensiruyushchikh ustroystv na energeticheskiye pokazateli kachestva elektrovozov peremennogo toka [Influence of On-board Compensating Devices on Power Quality Indices of Alternating Current Locomotives]. Moscow, MGUPS (MIIT), 2015. 181 p.

8. Dashchenko O. F., Kirillov V. Kh., Kolomiyyets L. V. & Orobey V. F. MATLAB v inzhenernykh i nauchnykh raschetakh [MATLAB in Engineering and Scientific Calculations]. Odesa, Astroprint, 2003. 214 p.

9. Dzhurov I. A. *Lokomotiv – Locomotive*, 2010, no. 7, pp. 4-6.

10. Dyakonov V. P. MATLAB 7.\*/R2006/R2007. Samouchitel [MATLAB 7.\*/R2006/R2007. Self-teaching Guide]. Moscow, DMK Press, 2008. 768 p.

11. Kulinich Yu. M. Povysheniye kachestva elektroenergii, potrebyayemoy s elektrovozom odnofazno-postoyannogo toka, na osnove primeneniya gibridnogo kompensatora reaktivnoy moshchnosti [Improving Quality of Power Consumed by Single-phase Direct-current Electrical Locomotive Through Application of Hybrid Reactive Capacity Correcting Device]. Moscow, 2002. 270 p.

12. Litovchenko V. V. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Univ. Journ. Electromechanics*, 2000, no. 3, pp. 64-73.

13. Savoskin A. N., Chuchin A. A., Boldin D. I. & Telegin M. V. *Vestnik VEINII – VEINII JSC Proc.*, 2011, no. 1 (61), pp. 23-38.

14. Telegin M. V. Adaptivnaya sistema kombinirovannogo avtomaticheskogo upravleniya tokom tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Adaptive System of Combined Automatic Current Control of Electrical Rolling Stock Tractive Engines]. Moscow, 2013. 267 p.

15. Chernykh I. V. Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i Simulink [Simulation of Electrotechnical Devices in MATLAB, SimPower Systems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

БУРКОВ Анатолий Трофимович – доктор техн. наук, профессор; \*МИРСАЙТОВ Мирзиёд Мирозадович – аспирант, Mirziyodmail@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).