



УДК 621.311

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).86–97

Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, М. Е. Алексеев

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

Дата поступления: 15 мая 2019 г.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Аннотация.** Эффективное напряжение в сети переменного тока снижается из-за генерирования и смещения по фазе уравнивающего тока прямоугольной формы относительно напряжения в сети, а форма кривой напряжения в электрической сети переменного тока искажается. Для выявления и устранения причины неудовлетворительной работы рекуператоров электрической энергии использованы новые энергетические характеристики на основе уточненного закона сохранения энергии в электромагнитном поле, математическое моделирование и спектральный анализ несинусоидального напряжения, тока на выходе рекуператоров электрической энергии. В процессе исследования учитывалось снижение напряжения на выходе рекуператоров электрической энергии во время коммутации тока в силовых полупроводниковых приборах инвертора и сокращение продолжительности передачи энергии в сеть переменного тока. Проведенный анализ результатов расчета энергетического процесса при работе инверторов, ведомых сетью, показал, что фазовое смещение несинусоидального уравнивающего тока на выходе инвертора относительно переменного напряжения в сети сопровождается значительным увеличением его реактивной составляющей. Для повышения напряжения в контактной сети переменного тока предложено с помощью IGBT транзисторов устранять возможность опрокидывания инвертора, поддерживая на минимальном уровне угол фазового опережения тока на выходе инвертора относительно переменного напряжения сети. В работе приводятся примеры регулирования активной мощности рекуператора с повышением эффективного напряжения в контактной сети переменного тока за счет плавного изменения тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей и переключения секций вторичных обмоток тягового трансформатора на электроподвижном составе.

**Ключевые слова:** рекуператор, уравнивающий ток, активная мощность, фазовое смещение, спектральный анализ, гармонические составляющие, эффективное напряжение, сеть переменного тока.

T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchenok, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, M. M. Alekseev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: May 15, 2019

## INCREASE OF EFFICIENCY OF ELECTRIC ENERGY RECOVERY INTO AC ELECTRICAL NETWORKS

**Abstract.** The RMS voltage in the AC circuit decreases due to the generation and offset in phase of the surge current of a rectangular shape relative to the voltage in the network, and a voltage waveform in an electrical AC network distorts. New energy characteristics are used to identify and eliminate the cause of the unsatisfactory performance of electric energy recuperators. These characteristics are based on a revised law of conservation of energy in the electromagnetic field, mathematical modeling and the spectral analysis of non-sinusoidal voltage, current at the output of electric energy recuperators. In the process of the research, a decrease in the voltage at the output of the electric energy recuperators was taken into account during the switching of current in power semiconductor devices of the inverter and reduction in the duration of energy transfer to the AC network. The analysis of results of calculation of the energy process during the operation of the grid-controlled inverters showed that the phase shift of non-sinusoidal leveling current at the output of the inverter with relation to alternating voltage in network is followed by significant increase in its reactive component. To increase the voltage in the AC network, it was proposed to eliminate the possibility of inverter triggering using IGBT transistors, keeping the current advance phase angle at the output of the inverter relative to the AC network voltage to a minimum. The work provides examples of regulating the reactive power of the recuperator. In these examples, the RMS voltage of the overhead AC network increases due to the smooth change in current in the excitation windings of traction motors and switching of the traction transformer in the electric rolling stock.

**Keywords:** recuperator, leveling current, active power, phase shift, spectral analysis, harmonious components, RMS voltage, AC network.

### Введение

Использование и преобразование потенциальной и кинетической энергии поезда в электрическую энергию позволяет решать задачи по со-

кращению затрат на электрическую тягу поездов и обеспечивать энергосбережение в отрасли [1, 2]. При решении данной сложной технической задачи необходимо учитывать ограничения по



допустимой силе торможения из-за нарушения сцепления колес с рельсами [3] и режимы работы системы тягового электроснабжения [4]. На энергетическую эффективность рекуперации электрической энергии оказывают влияние графики движения поездов, организация и технология вождения поездов [5, 6], а также профиль железнодорожного пути [7]. Из оценки эффективности рекуперации электрической энергии от тягового электроподвижного состава в контактную сеть постоянного тока следует, что инженерные задачи в основном решены [8].

Для электрического торможения поездов и рекуперации электрической энергии в электрическую сеть переменного тока в настоящее время применяются однофазные и трехфазные выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП), ведомые сетью, и однофазные четырехквadrантные 4- $qS$  преобразователи [9, 10]. Во время работы данного оборудования эффективное напряжение в сети переменного тока снижается из-за загрузки уравнивающим током прямоугольной формы, кривая мгновенных значений переменного напряжения в сети искажается. Исследование направлено на изучение энергетических процессов в известных устройствах рекуперации энергии для определения и устранения причины их неудовлетворительной работы.

Применяемая в учебных учреждениях России и за рубежом теория энергетических процессов [10, 11] в электрических цепях с полупроводниковыми приборами основана на выделении основной гармоники напряжения и первой гармоники тока из спектра гармонических составляющих несинусоидального напряжения и тока на входе преобразователя. Данный метод позволил при допустимой погрешности упростить расчет активной мощности на входе полупроводниковых преобразователей с различными импульсными способами управления силовыми полупроводниковыми приборами (СПП). Известная теория энергетических процессов не позволяет выявить причину неудовлетворительной работы импульсных полупроводниковых преобразователей. Разработанными в ИрГУПС энергетическими характеристиками учитывается сокращение необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за непроводящего состояния полупроводниковых приборов рекуператоров электрической энергии и реактивных элементов электроэнергетической системы [12, 13]. Работу рекуператоров электрической энергии можно улучшить за счет технических решений, которые

позволяют устранить причину снижения их энергетической эффективности.

### Теоретическое обоснование

Баланс мощностей на выходе рекуператора [3] с учетом сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии реактивными элементами и СПП рекуператора равен

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta S$  – часть полной мощности  $SG$ , на выходе рекуператора, которая не используется для рекуперации электрической энергии и энергообмена в электрической цепи;  $P$  и  $Q$  – соответственно суммарная активная и реактивная мощность гармонических составляющих напряжения и тока на выходе рекуператора.

Расчет и измерение составляющих предложенного баланса мощностей (1) можно выполнять с использованием преобразования Фурье, аналитических расчетов, математического моделирования и контрольно-измерительных приборов на практике.

Расчет мощности  $\Delta S$ , которая образуется на выходе рекуператора, учитывающей электрический потенциал контактной сети во время коммутации СПП инвертора, производится по формуле

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2 \cdot I_k^2} = U_P \cdot I_{in}, \quad (2)$$

где  $U_{pk}$  – действующее напряжение  $k$ -ой гармонической составляющей на выходе рекуператора во время коммутации СПП инвертора;  $I_k$  – действующий ток  $k$ -ой гармонической составляющей на выходе рекуператора;  $k$  – номер гармонической составляющей;  $n$  – номер последней учитываемой гармоники;  $U_P$  – действующее напряжение на выходе рекуператора во время коммутации СПП инвертора;  $I_{in}$  – действующий ток на выходе рекуператора.

Активная мощность на выходе рекуператора характеризует часть электрической энергии, которая необратимо преобразована в иной вид энергии, в тепловые потери энергии в силовой цепи и передана в систему внешнего электроснабжения:

$$P = U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (3)$$

где  $U_{c0}$  – постоянная составляющая напряжения на выходе рекуператора во время передачи энергии в сеть переменного тока;  $U_{ck}$  – действующее напряжение  $k$ -ой гармонической составляющей на выходе рекуператора во время передачи энергии в сеть переменного тока;  $I_0$  – постоянная составляющая тока на выходе рекуператора;  $I_{ck}$  – действующий ток  $k$ -ой гармоники тока на выходе



рекуператора;  $\varphi_k$  – угол сдвига по фазе  $k$ -ой гармоники тока относительно одноименной  $k$ -ой гармоники напряжения на выходе рекуператора.

Реактивная мощность на выходе рекуператора, которая характеризует часть электрической энергии, расходуемой на энергообмен между источником энергии и реактивными элементами электрической цепи, вычисляется по формуле

$$Q = \pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}, \quad (4)$$

аргумент полной мощности и выходного электрического сопротивления  $\varphi_{\Sigma}$  рекуператора –

$$\varphi_{\Sigma} = \arctg \left[ \frac{\pm \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}}{U_{c0} \cdot I_0 + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k} \right]. \quad (5)$$

### Метод и результаты исследования

С помощью выражений (1–5) и математического моделирования в среде «Simulink» программы «MATLAB» можно получить оценку энергетической эффективности выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза «Ермак» 2ЭС5К при работе инвертором в середине межподстанционной зоны с двухсторон-

ним питанием контактной сети переменного тока (рис. 1).

Угол регулирования тиристоров ВИП  $\alpha$  изменяется системой импульсно-фазового управления вручную или системой автоматического регулирования в пределах от  $\pi$  до 0 электрических градусов и в данном случае  $\alpha = 1440$ , угол опережения включения тиристоров инвертора  $\beta = 36$  электрических градусов. Углы коммутации тиристоров ВИП  $\gamma = 15,7$  электрических градусов можно определить с помощью осциллограмм напряжений и токов в первичной и вторичной обмотке тягового трансформатора (рис. 2). Активная мощность на входе рекуператора  $P_d = U_{dc} \cdot I_d = 1224 \cdot 3515 = 4302,36$  кВт, она рассчитывается с использованием показаний приборов для измерения напряжения  $U_{dc}$  и действующего тока в обмотках электрических машин  $I_d$  (см. рис. 1).

Для расчета активной и реактивной мощности в балансе мощностей (1) на выходе инвертора можно воспользоваться Fast Fourier Transform (FFT) анализом с помощью осциллографов и блока «powergui» (см. рис. 1).

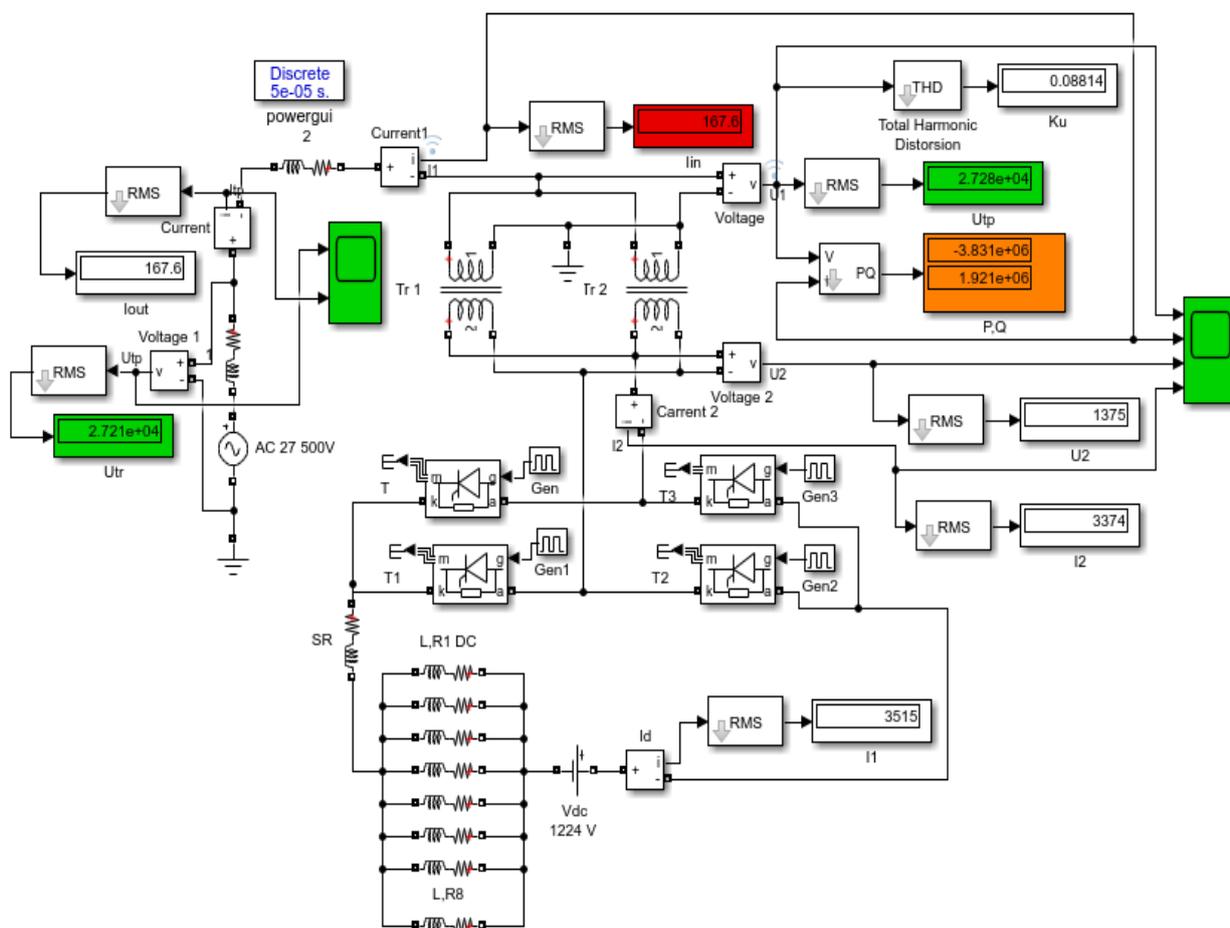


Рис. 1. Математическая модель процесса рекуперации электрической энергии однофазным инвертором в контактную сеть переменного тока

В результате спектрального анализа несинусоидальных кривых  $U_1$  и  $I_1$  получены величины и начальные фазы одноименных гармонических составляющих: действующее значение напряжения первой гармоники  $U_1(1) = 27\,170$  В,  $f_1 = 50$  Гц, действующее значение тока первой гармоники  $I_1(1) = 157,7$  А,  $f_1 = 50$  Гц (рис. 3).

По формуле (3) рассчитана активная мощность с учетом угла сдвига по фазе одноименных гармонических составляющих тока относительно напряжения:  $P_1 = 27\,170 \cdot 157,7 \cdot \cos(2,10 - 208,80) = -3\,827,8$  кВт,  $P_3 = -5,94$  кВт,  $P_5 = -1,81$  кВт,  $P_7 = -0,70$  кВт,  $P_9 = -0,55$  кВт,  $P_{11} = -0,38$  кВт,  $P_{13} = -0,31$  кВт,  $P_{15} = -0,26$  кВт,  $P_{17} = -0,14$  кВт,

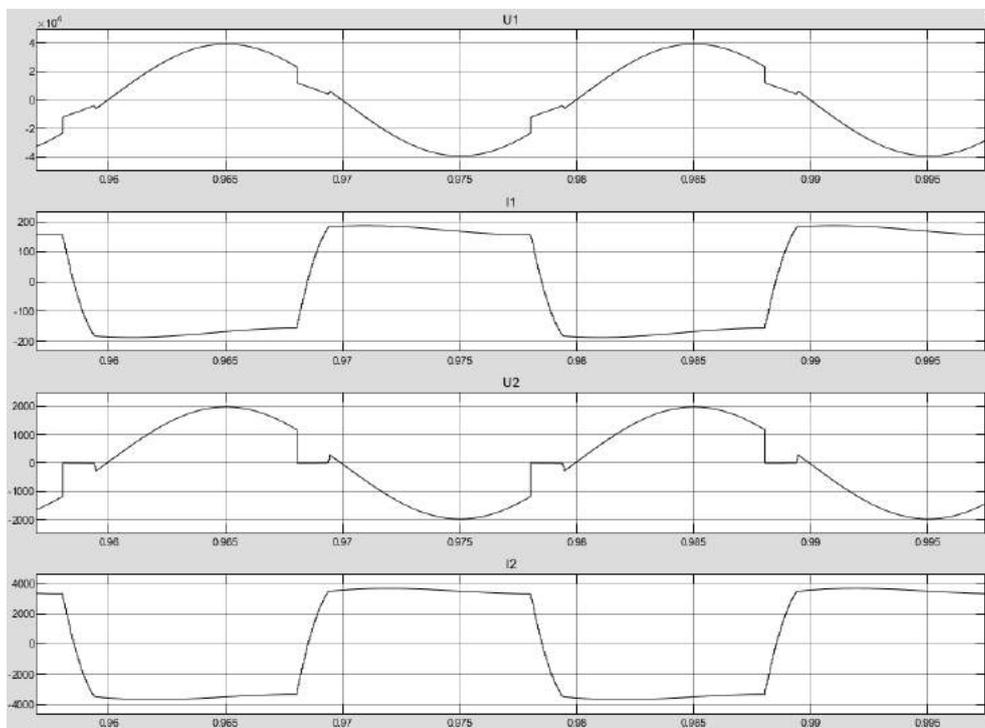
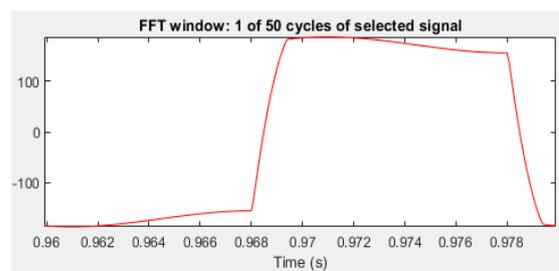
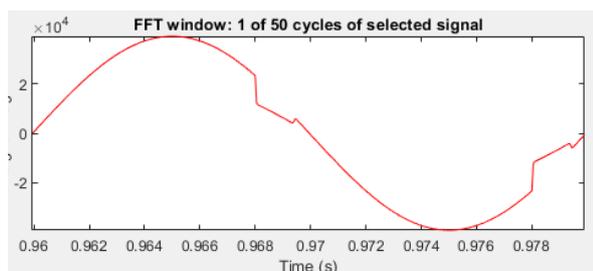


Рис. 2. Осциллограммы напряжения  $U_1$ , тока  $I_1$  в первичной и  $U_2, I_2$  во вторичной обмотке тягового трансформатора при работе выпрямительно-инверторного преобразователя



Frequency (Hz)	Magnitude (%)	Phase (°)
0 Hz (DC)	0.00%	90.0°
50 Hz (Fnd)	100.00%	2.1°
100 Hz (h2)	0.00%	110.1°
150 Hz (h3)	4.75%	156.7°
200 Hz (h4)	0.00%	129.8°
250 Hz (h5)	4.22%	209.7°
300 Hz (h6)	0.00%	149.2°
350 Hz (h7)	3.52%	262.0°
400 Hz (h8)	0.00%	168.5°
450 Hz (h9)	2.73%	-44.3°
500 Hz (h10)	0.00%	187.6°
550 Hz (h11)	1.93%	13.4°
600 Hz (h12)	0.00%	206.8°
650 Hz (h13)	1.26%	80.1°
700 Hz (h14)	0.00%	226.3°
750 Hz (h15)	0.90%	162.2°
800 Hz (h16)	0.00%	246.1°
850 Hz (h17)	0.92%	246.3°
900 Hz (h18)	0.00%	266.1°
950 Hz (h19)	1.05%	-44.2°

Frequency (Hz)	Magnitude (%)	Phase (°)
0 Hz (DC)	0.00%	90.0°
50 Hz (Fnd)	100.00%	208.8°
100 Hz (h2)	0.00%	-76.1°
150 Hz (h3)	29.93%	252.3°
200 Hz (h4)	0.00%	-66.1°
250 Hz (h5)	16.03%	-56.7°
300 Hz (h6)	0.00%	-55.7°
350 Hz (h7)	9.59%	-6.2°
400 Hz (h8)	0.00%	-45.4°
450 Hz (h9)	5.80%	47.9°
500 Hz (h10)	0.00%	-35.2°
550 Hz (h11)	3.37%	104.9°
600 Hz (h12)	0.00%	-25.1°
650 Hz (h13)	1.86%	170.3°
700 Hz (h14)	0.00%	-14.9°
750 Hz (h15)	1.12%	251.6°
800 Hz (h16)	0.00%	-4.5°
850 Hz (h17)	0.97%	-22.7°
900 Hz (h18)	0.00%	6.0°
950 Hz (h19)	1.00%	48.2°

Рис. 3. Результаты спектрального анализа периодических функций  $U_1$  и  $I_1$



$P_{19} = -0,065$  кВт и суммарная активная мощность учитываемых гармонических составляющих  $P = -3\ 837,0$  кВт.

Погрешность расчета и математического моделирования составляет 0,16 %. По формуле (4) рассчитана реактивная мощность на выходе инвертора электровоза:  $Q_1 = 27\ 170 \cdot 157,7 \cdot \sin(2,10 - 208,80) = 1\ 925,2$  кВАр,  $Q_3 = -60,62$  кВАр,  $Q_5 = -28,7$  кВАр,  $Q_7 = -14,42$  кВАр,  $Q_9 = -6,77$  кВАр,  $Q_{11} = -2,78$  кВАр,  $Q_{13} = -1,0$  кВАр,  $Q_{15} = 0,68$  кВАр,  $Q_{17} = -0,09$  кВАр,  $Q_{19} = -0,08$  кВАр. Суммарная реактивная мощность учитываемых гармонических составляющих равна  $Q = 1\ 935,74$  кВАр. С помощью прибора  $P, Q$  (см. рис. 1) измерена реактивная мощность  $Q = 1\ 921,0$  кВАр первой гармоники напряжения  $U_{1(1)}$  и тока  $I_{1(1)}$ .

По формуле (5) рассчитан аргумент полной мощности выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС  $\varphi_{\Sigma} = \arctg(1\ 935,74 / 3\ 837) = 26,77^\circ$ , который свидетельствует об активно-индуктивном характере выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС. Полная мощность на токоприемнике ЭПС  $S = U_{tp} \cdot I_{tp} = 27\ 280 \cdot 167,6 = 4\ 572,13$  кВА. Мощность на токоприемнике во время коммутации тиристорov инвертора  $\Delta S = \Delta U \cdot I_{tp} = 9\ 007 \cdot 167,6 = 1\ 510$  кВА.

Коэффициент мощности ВИП в режиме рекуперации  $K_M = P / S = 3\ 831 / 4\ 572,13 = 0,84$ .

Коэффициент полезного действия (КПД) ВИП при работе в режиме рекуперации  $\eta_{ВИП} = (P / P_d) \cdot 100\% = (3\ 837 / 4\ 302,36) \cdot 100\% = 89\%$ .

Проверяется баланс мощностей (1) на выходе рекуператора электрической энергии ЭПС и определяется погрешность расчетов:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}; \sqrt{4572,13^2 - 1510^2} = \sqrt{3837^2 + 1935,74^2},$$

$4\ 315,6$  кВА  $\approx 4\ 297,6$  кВА, погрешность расчета составляет 0,4 %.

Потери активной мощности в контактной сети переменного тока при двухстороннем питании с активным сопротивлением  $R_{kc} = 2,5$  Ом:

$$\Delta P_{kc} = I_{tp}^2 \cdot R_{kc} = 167,6^2 \cdot 2,5 = 70,2$$
 кВт.

Потери активной мощности в контактной сети составляют 13 %, в ВИП ЭПС – 87 % от ее суммарных потерь.

Активная мощность, передаваемая в систему внешнего электроснабжения равна  $P - \Delta P_{kc} = 3\ 837 - 70,2 = 3\ 766,8$  кВт.

На токоприемнике ЭПС во время рекуперации энергии напряжение составляет 27 280 В, что выше напряжения на тяговой подстанции (27 210 В), т. е. отклоняется на -1,0 %. Коэффици-

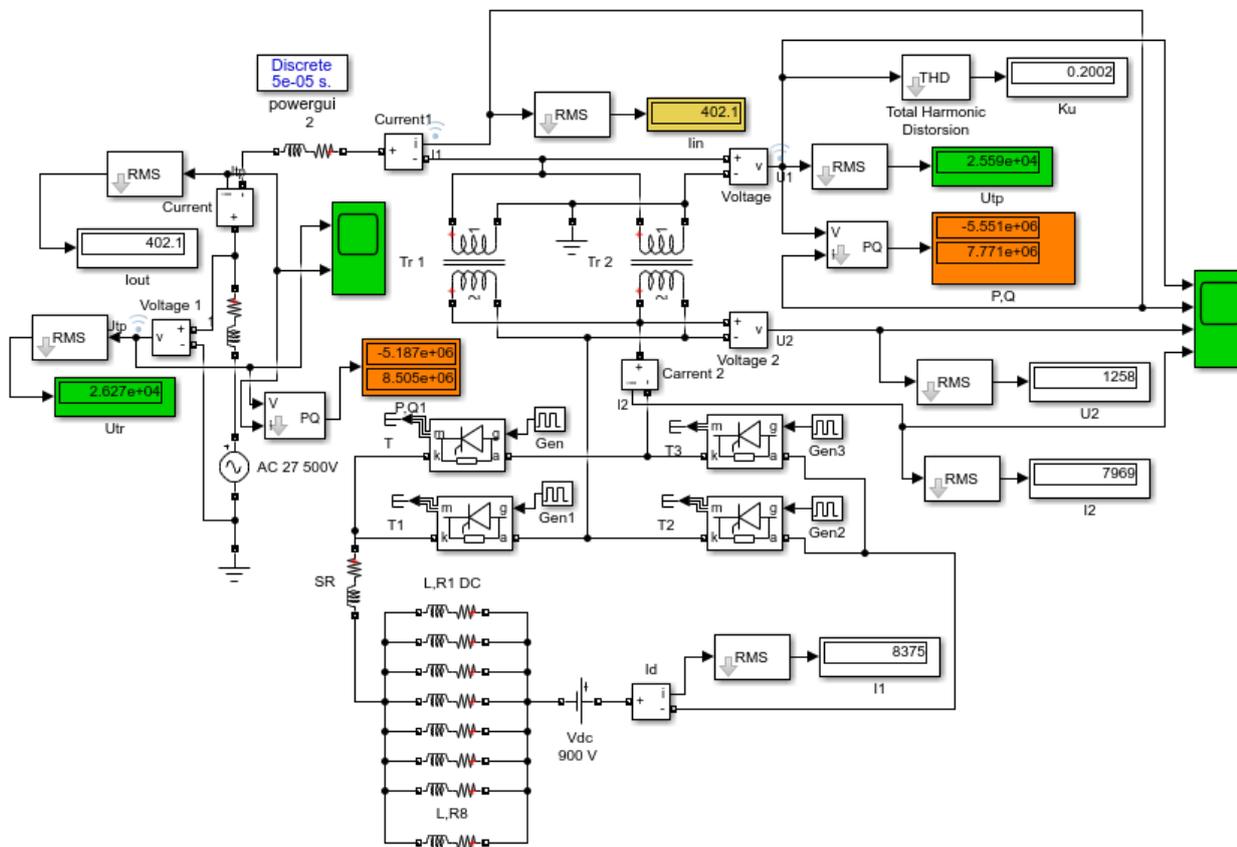


Рис. 4. Математическая модель процесса рекуперации электрической энергии



ент искажения синусоидальности кривой напряжения  $U_1$  (см. рис. 2)  $K_U = 8,8\%$  в контактной сети оценивается с помощью прибора «Total Harmonic Distorsion» во время работы инвертора (см. рис. 1).

При увеличении угла опережения включения тиристорov инвертора  $\beta$  до 72 электрических

градусов при понижении скорости движения ЭПС с целью повышения передачи активной мощности во внешнюю систему электроснабжения математическая модель процесса рекуперации имеет другой вид (рис. 4).

Активная мощность на входе рекуператора

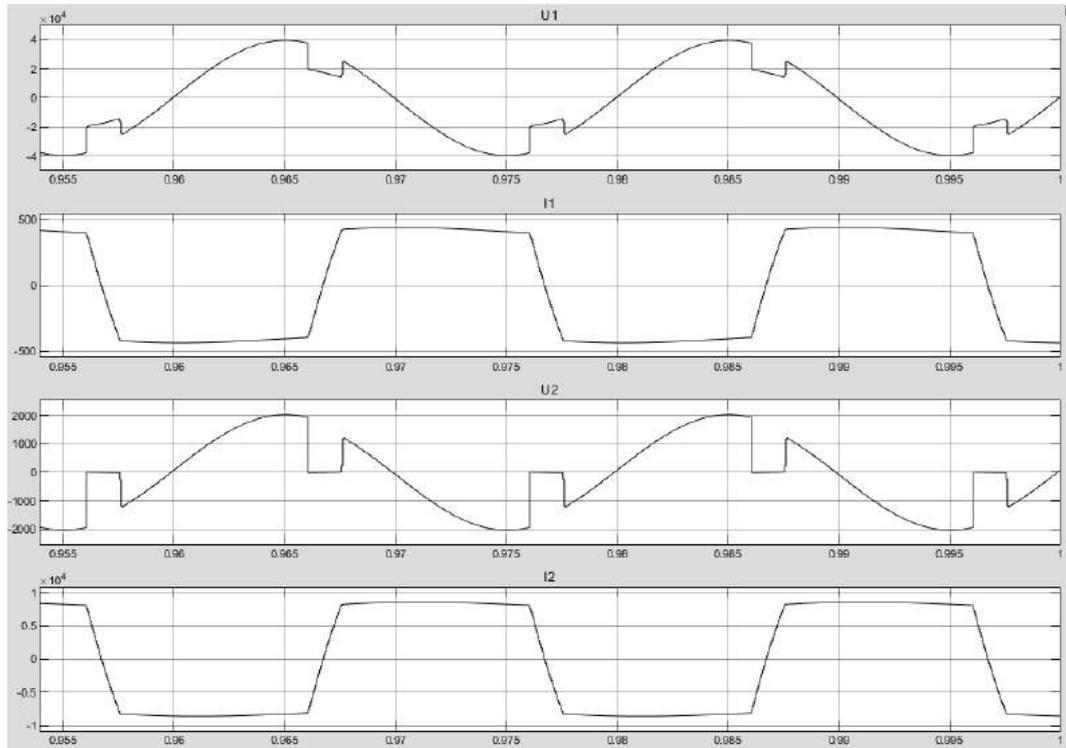


Рис. 5. Осциллограммы напряжения  $U_1$ , тока  $I_1$  в первичной и  $U_2, I_2$  во вторичной обмотке тягового трансформатора при работе выпрямительно-инверторного преобразователя в режиме рекуператора электрической энергии

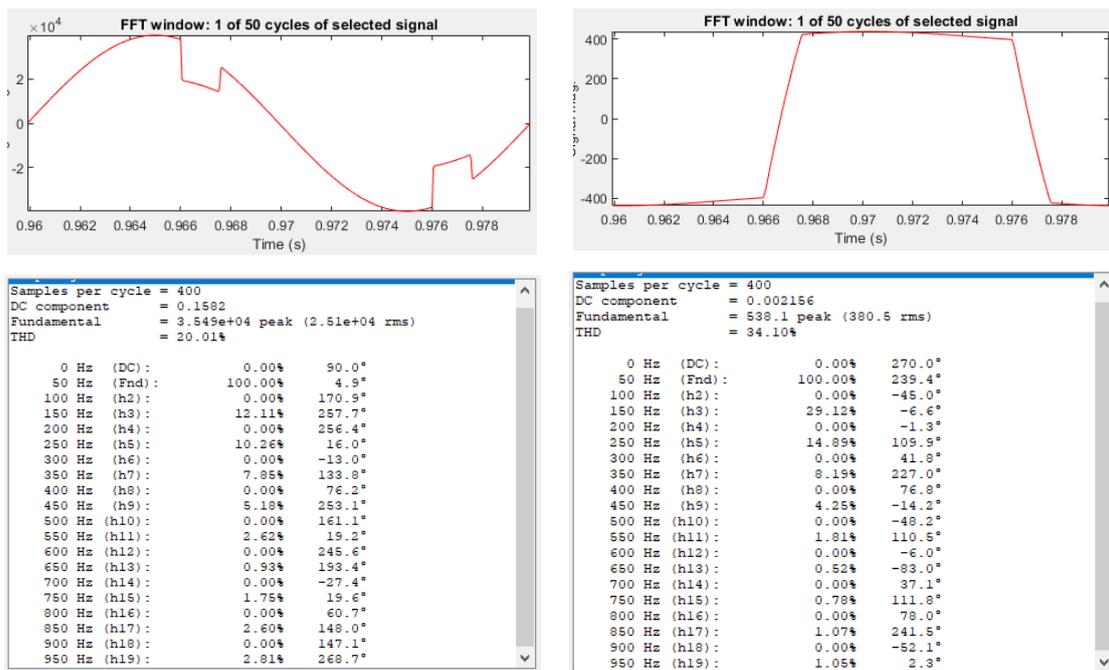


Рис. 6. Результаты спектрального анализа периодических функций  $U_1$  и  $I_1$



равна  $P_d = U_{dc} \cdot I_d = 900 \cdot 8\,375 = 7\,537,5$  кВт и рассчитывается с использованием показаний приборов для измерения напряжения  $U_{dc}$  и действующего тока в обмотках электрических машин  $I_d$ .

Форма кривых мгновенных значений напряжения и тока в первичной и вторичной обмотках тягового трансформатора ЭПС (рис. 5) и блок «powerqui» (см. рис. 4) позволяют выполнить расчеты составляющих баланс мощностей на выходе рекуператора ЭПС.

В результате спектрального анализа несинусоидальных кривых  $U_1$  и  $I_1$  получены величины и начальные фазы одноименных гармонических составляющих (рис. 6). Действующее значение напряжения первой гармоники  $U_{1(1)} = 25\,100$  В,  $f_1 = 50$  Гц, действующее значение тока первой гармоники  $I_{1(1)} = 380,5$  А,  $f_1 = 50$  Гц.

По формуле (3) рассчитана активная мощность с учетом угла сдвига по фазе одноименных гармонических составляющих тока относительно напряжения:  $P_1 = 25\,100 \cdot 380,5 \cdot \cos(4,9^\circ - 239,4^\circ) = -5\,546,03$  кВт,  $P_3 = -33,45$  кВт,  $P_5 = -9,92$  кВт,  $P_7 = -3,43$  кВт,  $P_9 = -0,99$  кВт,  $P_{11} = -0,10$  кВт,  $P_{13} = +0,05$  кВт,  $P_{15} = -0,05$  кВт,  $P_{17} = -0,16$  кВт,  $P_{19} = -0,18$  кВт и суммарная активная мощность учитываемых гармонических составляющих  $P = -5\,594,6$  кВт.

Погрешность расчета и математического моделирования составляет 0,8 %. По формуле (4) рассчитана реактивная мощность на выходе инвертора электровоза:  $Q_1 = 25\,100 \cdot 380,5 \cdot \sin(4,9^\circ - 239,4^\circ) = 7\,775,25$  кВАр,  $Q_3 = -335,12$  кВАр,  $Q_5 = -145,65$  кВАр,  $Q_7 = -61,68$  кВАр,  $Q_9 = -21,0$  кВАр,  $Q_{11} = -4,53$  кВАр,  $Q_{13} = -0,46$  кВАр,  $Q_{15} = -1,30$  кВАр,  $Q_{17} = -2,65$  кВАр,  $Q_{19} = -2,81$  кВАр. Суммарная реактивная мощность учитываемых гармонических составляющих равна  $Q = 7\,784,11$  кВАр. С помощью прибора P, Q (см. рис. 4) измерена реактивная мощность  $Q = 7\,771,0$  кВАр первой гармоники напряжения  $U_{1(1)}$  и тока  $I_{1(1)}$  (см. рис. 6).

С помощью формулы (5) рассчитан аргумент полной мощности выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС  $\varphi_\Sigma = \arctg(7\,784,11 / 5\,594,60) = 54,29^\circ$ , который свидетельствует об активно-индуктивном характере выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС. Полная мощность на токоприемнике ЭПС составила  $S = U_p \cdot I_p = 25\,590 \cdot 402,1 = 10\,289,74$  кВА, мощность на токоприемнике во время коммутации тиристоров инвертора –  $\Delta S = \Delta U \cdot I_p = 9\,007 \cdot 402,1 = 3\,621,71$  кВА.

Коэффициент мощности ВИП в режиме рекуперации  $K_M = P / S = 5\,594,6 / 10\,289,74 = 0,54$ .

При работе в режиме рекуперации КПД ВИП  $\eta_{ВИП} = (P / P_d) \cdot 100 \% = (5\,594,6 / 7\,537,5) \cdot 100 \% = 74,2 \%.$

Проверяется баланс мощностей (1) на выходе рекуператора электрической энергии ЭПС и определяется погрешность расчетов:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}; \sqrt{10289,74^2 - 3621,71^2} = \sqrt{5594,6^2 + 7784,11^2},$$

$9\,631,3$  кВА  $\approx 9\,586,0$  кВА, погрешность расчета составляет 0,5 %.

Потери активной мощности в контактной сети переменного тока при двухстороннем питании с активным сопротивлением  $R_{kc} = 2,5$  Ом:

$$\Delta P_{kc} = I_{tp}^2 \cdot R_{kc} = 402,1^2 \cdot 2,5 = 404,2 \text{ кВт.}$$

Потери активной мощности в контактной сети составляют 17 %, в ВИП ЭПС – 83 % от ее суммарных потерь.

Активная мощность, передаваемая в систему внешнего электроснабжения, составит  $P - \Delta P_{kc} = 5\,594,6 - 404,2 = 5\,190,4$  кВт.

На токоприемнике ЭПС во время рекуперации энергии напряжение меньше, чем на тяговой подстанции, и составляет 25 590 В. Напряжение на шинах тяговой подстанции равно 26 270 В, т. е. отклоняется на –0,95 % от установленного напряжения на холостом ходу трансформатора подстанции. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $U_1$  (см. рис. 5)  $KU = 20,0 \%$  в контактной сети оценивается с помощью прибора «Total Harmonic Distorsion» во время работы инвертора (см. рис. 4).

В результате исследования установлено, что напряжение в контактной сети во время рекуперации электрической энергии снижается. Нелинейные искажения синусоидальности кривой напряжения в контактной сети достигают 8–20 %. Потери активной мощности в тяговом трансформаторе и ВИП ЭПС составляют 83–87 %, а потери активной мощности в контактной сети – составляют 13–17 % от суммарных потерь активной мощности в тяговом трансформаторе, ВИП ЭПС и в контактной сети. Из-за смещения по фазе несинусоидального напряжения на выходе инвертора тиристорами ЭПС относительно переменного напряжения на шинах тяговой подстанции в электрической цепи формируется несинусоидальный уравнивающий ток. Реактивная составляющая уравнивающего тока значительно превосходит по величине активную составляющую с увеличением угла опережения включения тиристоров инвертора  $\beta$  до  $\pi/2$ . Поэтому реактивная мощность, потребляемая от тяговой подстанции, превосходит активную мощность на выходе инвертора ЭПС. Из-за реактивной



составляющей несинусоидального уравнивающего тока потери активной мощности в ВИП и в контактной сети возрастают с увеличением угла опережения включения тиристорных инверторов. Коммутация большого уравнивающего тока тиристорами ВИП ограничивает минимальный угол опережения включения тиристорных инверторов до 36 электрических градусов из-за повышения вероятности опрокидывания инвертора. При угле опережения включения тиристорных инверторов  $\pi/2$  рекуперация энергии прекращается, так как ВИП переходит из режима работы инвертором в режим работы выпрямителем. При  $\beta \geq \pi/2$  угол смещения гармонических составляющих уравнивающего тока возрастает относительно одноименных гармоник переменного напряжения в контактной сети переменного тока, и электрическая энергия потребляется из контактной сети для создания силы торможения ЭПС. Результаты расчета подтверждают актуальность применения технических решений, которые снижают потери активной мощности, повышают действующее напряжение в контактной сети переменного тока во время рекуперации электрической энергии в систему внешнего электроснабжения.

Для совершенствования устройства рекуперации электрической энергии в систему внешнего электроснабжения предложен способ регулирования мощности и устройство трехфазного [14] и однофазного инвертора [15] в математической модели (рис. 7). Вместо тиристорных инверторов применяются IGBT транзисторы с принудительным их запирающим до момента изменения фазы переменного напряжения в контактной сети.

При увеличении активной мощности рекуперации для снижения уравнивающего тока завершение процесса коммутации IGBT транзисторов практически заканчивается до момента смены фазы переменного напряжения, а регулирование мощности инвертора выполняется за счет плавного управления током в обмотках возбуждения ТЭД. Плавное регулирование тока в обмотках возбуждения ТЭД сочетается с переключением секций вторичной обмотки тягового трансформатора ЭПС. В результате спектрального анализа несинусоидальных кривых  $U_1$  и  $I_1$  получены величины и начальные фазы одноименных гармонических составляющих. Действующее значение напряжения первой гармоники  $U_{1(1)} = 27\,760$  В,  $f_1 = 50$  Гц, действующее значение тока первой гармоники  $I_{1(1)} = 81,77$  А,  $f_1 = 50$  Гц.

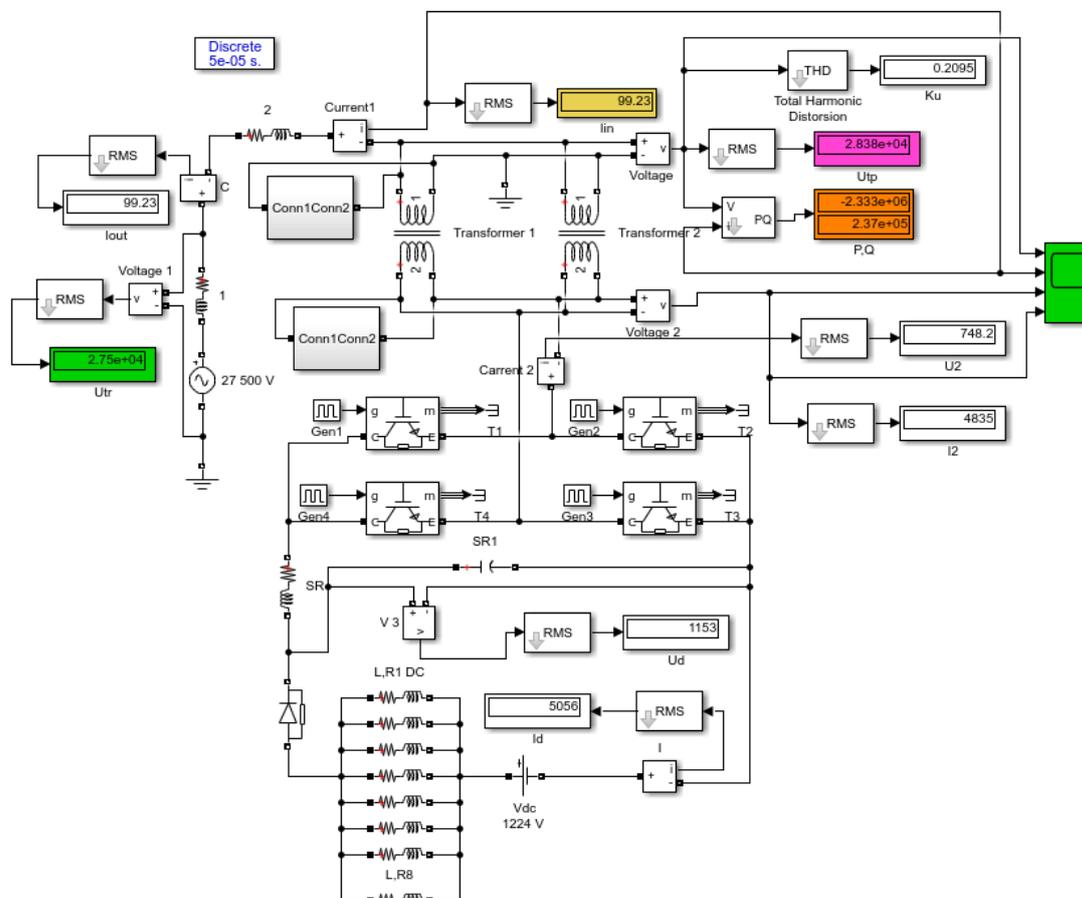


Рис. 7. Математическая модель процесса рекуперации электрической энергии Усовершенствованным инвертором



По формуле (3) рассчитана активная мощность с учетом угла сдвига по фазе гармонических составляющих тока относительно одноименных гармоник напряжения. Суммарная активная мощность учитываемых гармонических составляющих  $P = -2333$  кВт. По формуле (4) найдена реактивная мощность на выходе инвертора электровоза –  $Q = 237$  кВАр. С помощью формулы (5) рассчитан аргумент полной мощности выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС  $\varphi_{\Sigma} = \arctg(237/2333) = 5,8^{\circ}$ , который свидетельствует об активно-индуктивном характере выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС. Полная мощность на токоприемнике ЭПС  $S = U_{tp} \cdot I_{tp} = 28380 \cdot 99,23 = 2816,15$  кВА, мощность на токоприемнике во время коммутации транзисторов инвертора  $\Delta S = \Delta U \cdot I_{tp} = 15620 \cdot 99,23 = 1550,0$  кВА.

Коэффициент мощности ВИП в режиме рекуперации  $K_M = P/S = 2333 / 2816,15 = 0,83$ .

Проверяется баланс мощностей (1) на выходе рекуператора электрической энергии ЭПС и определяется погрешность расчетов:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}; \sqrt{2816,15^2 - 1550^2} = \sqrt{2333^2 + 237^2},$$

$2351,0$  кВА  $\approx 2345,0$  кВА, погрешность расчета составляет  $0,3\%$ .

Потери активной мощности в контактной сети переменного тока при двухстороннем питании с активным сопротивлением  $R_{kc} = 2,5$  Ом:

$$\Delta P_{kc} = I_{tp}^2 \cdot R_{kc} = 99,23^2 \cdot 2,5 = 24,62 \text{ кВт.}$$

Активная мощность, передаваемая в систему внешнего электроснабжения  $P - \Delta P_{kc} = 2333,0 - 24,62 = 2308,4$  кВт.

На токоприемнике ЭПС во время рекуперации энергии напряжение больше, чем на тяговой подстанции и составляет  $28380$  В, напряжение на тяговой подстанции равно  $27500$  В, т. е. не отклоняется от установленного напряжения на холостом ходу трансформатора подстанции. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $U_I K_U = 20,0\%$  в контактной сети оценивается с помощью прибора «Total Harmonic Distorsion» во время работы инвертора (см. рис. 7).

Для повышения мощности рекуперации электрической энергии в систему внешнего электроснабжения предложено не смещать по фазе напряжение на выходе инвертора относительно напряжения на шинах тяговой подстанции, а переключать инвертор к секции вторичной обмотки тягового трансформатора ЭПС с пониженным напряжением, например, к секциям с напряжением  $630$  В (рис. 8) и увеличивать ток в обмотке воз-

буждения до тока часового режима работы ТЭД. Полная мощность на токоприемнике ЭПС  $S = U_{tp} \cdot I_{tp} = 29240 \cdot 202,8 = 5929,87$  кВА. Мощность на токоприемнике ЭПС во время коммутации тиристоров инвертора  $\Delta S = \Delta U \cdot I_{tp} = 14891 \cdot 202,8 = 3020,0$  кВА.

Суммарная активная мощность гармонических составляющих напряжения и тока на токоприемнике ЭПС  $P = -5079$  кВт. Суммарная реактивная мощность на токоприемнике ЭПС  $Q = 302,1$  кВАр. С помощью формулы (5) рассчитан аргумент полной мощности, выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС  $\varphi_{\Sigma} = \arctg(302,1 / 5079) = 3,4^{\circ}$ , который свидетельствует об активно-индуктивном характере выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС.

Коэффициент мощности ВИП в режиме рекуперации  $K_M = P/S = 5079 / 5929,87 = 0,86$ .

Проверяется баланс мощностей (1) на выходе рекуператора электрической энергии ЭПС и определяется погрешность расчетов:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}; \sqrt{5929,87^2 - 3020^2} = \sqrt{5079^2 + 302,1^2},$$

$5103,2$  кВА  $\approx 5088,0$  кВА, погрешность расчета составляет  $0,3\%$ .

Потери активной мощности в контактной сети переменного тока при двухстороннем питании с активным сопротивлением  $R_{kc} = 2,5$  Ом:

$$\Delta P_{kc} = I_{tp}^2 \cdot R_{kc} = 202,8^2 \cdot 2,5 = 102,8 \text{ кВт.}$$

Активная мощность, передаваемая в систему внешнего электроснабжения  $P - \Delta P_{kc} = 5079,0 - 102,8 = 4976,2$  кВт.

Для повышения мощности рекуперации электрической энергии в систему внешнего электроснабжения предложено не смещать по фазе напряжение на выходе инвертора относительно напряжения на шинах тяговой подстанции, а переключать инвертор к секции вторичной обмотки тягового трансформатора ЭПС с пониженным напряжением, например, к секциям с напряжением  $630$  В (рис. 8) и увеличивать ток в обмотке возбуждения до тока часового режима работы ТЭД. Полная мощность на токоприемнике ЭПС  $S = U_{tp} \cdot I_{tp} = 27770 \cdot 232,2 = 6448,19$  кВА. Мощность на токоприемнике ЭПС во время коммутации тиристоров инвертора  $\Delta S = \Delta U \cdot I_{tp} = 9173,1 \cdot 232,2 = 2130,0$  кВА.

Суммарная активная мощность гармонических составляющих напряжения и тока на токоприемнике ЭПС  $P = -5839$  кВт.

Суммарная реактивная мощность на токоприемнике ЭПС  $Q = 1656$  кВАр. С помощью



формулы (5) рассчитан аргумент полной мощности выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС  $\varphi_{\Sigma} = \arctg(1656 / 5839) = 15,8^{\circ}$ , который свидетельствует об активно-индуктивном характере выходного электрического сопротивления инвертора с электрическими машинами ЭПС.

Коэффициент мощности ВИП в режиме рекуперации  $K_M = P / S = 5\,839 / 6\,448,19 = 0,90$ .

Проверяется баланс мощностей (1) на выходе рекуператора электрической энергии ЭПС и определяется погрешность расчетов:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}; \sqrt{6448,19^2 - 2130^2} = \sqrt{5839^2 + 1656^2}$$

$6\,086,2 \text{ кВА} \approx 6\,069,3 \text{ кВА}$ , погрешность расчета составляет 0,3 %.

Потери активной мощности в контактной сети переменного тока при двухстороннем питании с активным сопротивлением  $R_{kc} = 2,5 \text{ Ом}$ :

$$\Delta P_{kc} = I_{tp}^2 \cdot R_{kc} = 232,2^2 \cdot 2,5 = 134,8 \text{ кВт.}$$

Активная мощность, передаваемая в систему внешнего электроснабжения  $P - \Delta P_{kc} = 5\,839,0 - 134,8 = 5\,704,2 \text{ кВт}$ .

На токоприемнике ЭПС во время рекуперации энергии напряжение выше, чем на шинах тя-

говой подстанции и составляет 27 770 В, а напряжение на шинах тяговой подстанции равно 27 280 В, т. е. отклоняется на -0,8 % от установленного напряжения на холостом ходу на шинах подстанции.

Так как напряжение в контактной сети повышается во время работы инвертора ЭПС, целесообразно использовать выработанную электрическую энергию непосредственно для тяги поездов при работе в данной фидерной зоне контактной сети и во встречном направлении движения поездов или передавать электрическую энергию в систему внешнего электроснабжения.

**Заключение**

В результате исследования установлено, что напряжение в контактной сети во время рекуперации электрической энергии разработанным устройством повышается, что позволяет увеличивать интенсивность движения поездов на перевальных, горных участках профиля и повышать производительность железной дороги.

Вместо увеличения угла смещения по фазе уравнительного тока относительно переменного напряжения в сети до 90 электрических градусов для управления активной мощностью рекуперации ВИПом с помощью разработанного рекуператора суммарный

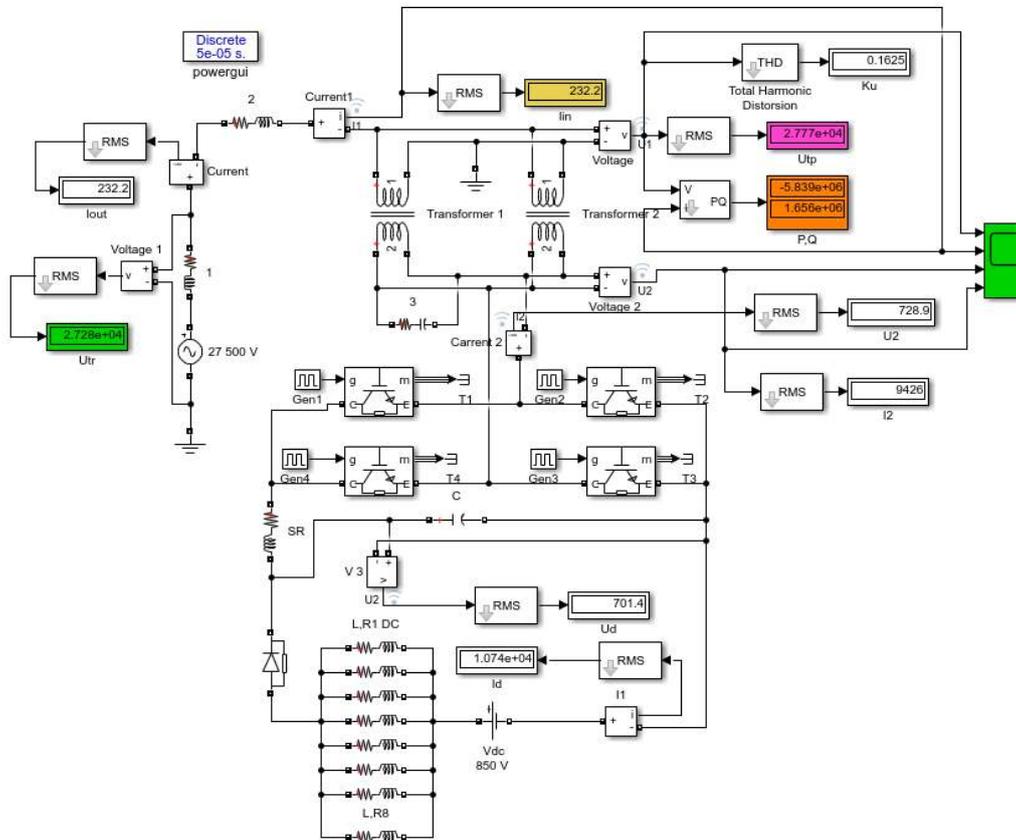


Рис. 8. Математическая модель процесса повышения мощности рекуперации электрической энергии при переключении секций вторичной обмотки тягового трансформатора ЭПС



аргумент полной мощности на выходе рекуператора поддерживается на уровне  $\varphi_{\Sigma} = 3-6$  электрических градусов. Это позволяет ограничивать величину реактивной составляющей уравнительного тока в процессе регулирования активной мощности рекуперации.

Предложено аргумент полной мощности на выходе рекуператора стабилизировать на заданном уровне при регулировании активной мощности рекуперации за счет плавного изменения тока

в обмотках возбуждения тяговых двигателей и переключения секций вторичной обмотки тяговых трансформаторов электроподвижного состава.

Суммарные потери активной мощности в тяговом трансформаторе, в разработанном рекуператоре ЭПС и в контактной сети переменного тока снижаются в 3 раза по сравнению с суммарными потерями активной мощности в тяговом трансформаторе, ВИП ЭПС и контактной сети.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков Е.В., Осипов С.И. Рекуперативное торможение на электроподвижном составе и его эффективность. М., Транспорт, 1965. 204 с.
2. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методика расчета экономической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Транспорт Урала. 2016. № 3 (50). С. 95–99.
3. Способ определения коэффициента сцепления колесной пары с рельсами при торможении / Ю.А. Купцов и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2 (58). С. 112–117.
4. Никифоров М.М. Вильгельм А.С., Гутников В.И. Влияние параметров и режимов работы системы тягового электрооборудования на эффективность использования энергии рекуперации // Изв. Транссиба. 2017. № 1 (29). С. 74–83.
5. Незевак В.Л., Шатохин А.П., Гателюк О.В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения // Изв. Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 59–69.
6. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Изв. Транссиба. 2016. № 1 (25). С. 60–70.
7. Незевак В.Л., Саркенов С.С., Черемисин В.Т. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I-м типом профиля // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3 (55). С. 135–144.
8. Вильгельм А.С., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока // Наука и образование транспорту. 2013. Т. 1. С. 243–247.
9. J.Teigelkotter, D. Sprenger, Moshhnyj preobrazovatel' na IGBT-tranzistorah dlja primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Powerful converter on IGBT-transistors for use on railway rolling stock]. Munich : Siemens AG, 2000.
10. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника. М. : УМЦ ЖДТ, 2015. Т.2. 307 с.
11. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск : Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1990. 219 с.
12. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Якобчук К.П., Астраханцев Л.А. Уточненный закон сохранения энергии // Издательство «Образование и наука» с.р.о. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm). (Дата обращения: 16.04.2018).
13. Энергетическая эффективность электрической тяги поездов / Н.Л. Рябченко и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 61, № 1. С. 144–156.
14. Пат. 2377631 Рос. Федерация. Способ регулирования мощности и устройство трехфазного инвертора / Т.Л. Алексеева, Л.А. Астраханцев и др. № 2008103616/09 ; заявл. 21.04.2008 ; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.
15. Пат. № 2377632 Рос. Федерация. Способ регулирования мощности и устройство однофазного инвертора / Н.Л. Рябченко и др. № 2008103614/09 ; заявл. 10.08.2009; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36.

### REFERENCES

1. Gorchakov E.V., Osipov S.I. Rekuperativnoe tormozhenie na elektropodvizhnom sostave i ego effektivnost' [Regenerative braking in electric rolling stock and its effectiveness]. Moscow: Transport Publ., 1965. 204 p.
2. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vil'gel'm A.S. Metodika rascheta ekonomicheskoi effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispol'zovaniya energii rekuperatsii [The method of calculating the economic efficiency of the application of regenerative braking and the use of energy recovery]. *Transport Urala* [*Transport of the Urals*], 2016. No. 3 (50). Pp. 95–99.
3. Kuptsov Yu.A. et al. Sposob opredeleniya koeffitsienta stsepleniya kolesnoi pary s rel'sami pri tormozhenii [The method of determining the coefficient of adhesion of the wheelset to the rails during braking]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [*Modern Technologies. System Analysis. Modeling*], 2018. No. 2 (58). Pp. 112–117.
4. Nikiforov M.M. Vil'gel'm A.S., Gutnikov V.I. Vliyanie parametrov i rezhimov raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na effektivnost' ispol'zovaniya energii rekuperatsii [Influence of parameters and modes of operation of the traction power supply system on the energy efficiency of recovery]. *Izv. Transsiba* [*Journal of Transsib Railway Studies*], 2017. No. 1 (29). Pp. 74–83.
5. Nezevak V.L., Shatokhin A.P., Gatel'yuk O.V. Optimizatsiya grafika dvizheniya poezdov po kriteriyu rashkoda elektricheskoi energii na tyagu na uchastkakh zheleznykh dorog v usloviyakh primeneniya rekuperativnogo tormozheniya [Optimization of train schedule based on the criterion of electric energy consumption for traction on railway sections under the conditions of regenerative braking]. *Izv. Transsiba* [*Journal of Transsib Railway Studies*], 2015. No. 1 (21). Pp. 59–69.



6. Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Vil'gel'm A.S. Metodologiya otsenki energeticheskoi effektivnosti primeneniya rekuperativnogo tormozheniya i ispol'zovaniya energii rekuperatsii [Methodology for assessing the energy efficiency of the application of regenerative braking and the use of energy recovery]. *Izv. Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2016. No. 1 (25). Pp. 60–70.
7. Nezevak V.L., Sarkenov S.S., Cheremisin V.T. Otsenka vliyaniya paketnoi organizatsii dvizheniya na ob'em elektroenergii na tyagu na uchastkakh postoyannogo toka s I-m tipom profilya [Assessment of the impact of packet traffic on the amount of electricity on the traction in the areas of direct current with the profile type I]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2017. No. 3 (55). Pp. 135–144.
8. Vil'gel'm A.S., Nezevak V.L., Shatokhin A.P. Sravnitel'naya effektivnost' variantov ispol'zovaniya energii rekuperatsii na zheleznykh dorogakh postoyannogo toka [Comparative efficiency of options for the use of energy recovery on the railways of direct current]. *Nauka i obrazovanie transportu [Science and education for transport]*, 2013. Vol. 1. Pp. 243–247.
9. J.Teigelkotter, D. Sprenger, Moshhnyj preobrazovatel' na IGBT-tranzistorah dlja primeneniya na zheleznodorozhnom podvizhnom sostave [Powerful converter on IGBT-transistors for use on railway rolling stock]. Munich : Siemens AG, 2000.
10. Burkov A.T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and converter equipment]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2015. Vol.2. 307 p.
11. Zinov'ev G.S. Pryamye metody rascheta energeticheskikh pokazatelei ventil'nykh preobrazovatelei [Direct methods for calculating the energy performance of valve converters]. Novosibirsk: Novosib. state un-ty Publ., 1990. 219 p.
12. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Yakobchuk K.P., Astrakhantsev L.A. Utochnennyi zakon sokhraneniya energii [Refined energy conservation law]. "Education and Science" sr.o. Publ. URL: [http://www.rusnauka.com/42\\_PRNT\\_2015/Tecnic/5\\_202603.doc.htm](http://www.rusnauka.com/42_PRNT_2015/Tecnic/5_202603.doc.htm). (Access date: 16.04.2018).
13. Ryabchenok N.L. et al. Energeticheskaya effektivnost' elektricheskoi tyagi poezdov [Energy efficiency of electric train traction]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 61, No. 1. Pp. 144–156.
14. Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. et al. *Sposob regulirovaniya moshchnosti i ustroystvo trekhfaznogo invertora [The method of power control and the device three-phase inverter]*. Patent RF 2377631. No. 2008103616/09; appl. 21.04.2008 ; publ. 27.12.2009, Bull. No. 36.
15. Ryabchenok N.L. et al. *Sposob regulirovaniya moshchnosti i ustroystvo odnofaznogo invertora [Method of power control and device of a single-phase inverter]*. Pat. RF No. 2377632. No. 2008103614/09 ; applied 10.08.2009; publ. 27.12.2009, Bull. No. 36.

### Информация об авторах

### Authors

*Алексева Татьяна Леонидовна* - к. т. н., доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [talecseeva843@gmail.com](mailto:talecseeva843@gmail.com)

*Рябченко Наталья Леонидовна* - к. т. н., доцент, заведующая кафедрой математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [astranal@mail.ru](mailto:astranal@mail.ru)

*Астраханцев Леонид Алексеевич* - д. т. н., профессор кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: [astrahancev1943@mail.ru](mailto:astrahancev1943@mail.ru)

*Тихомиров Владимир Александрович* - к. т. н., доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [svat\\_irk@mail.ru](mailto:svat_irk@mail.ru)

*Алексеев Михаил Евгеньевич* – инженер, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [mihaal191114@gmail.com](mailto:mihaal191114@gmail.com)

*Tat'yana Leonidovna Alekseeva* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [talecseeva843@gmail.com](mailto:talecseeva843@gmail.com)

*Natal'ya Leonidovna Ryabchenok* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [astranal@mail.ru](mailto:astranal@mail.ru)

*Leonid Alekseevich Astrakhantsev* – Doctor of Technical Science, Professor at the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [astrahancev1943@mail.ru](mailto:astrahancev1943@mail.ru)

*Vladimir Aleksandrovich Tikhomirov* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Head of the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [svat\\_irk@mail.ru](mailto:svat_irk@mail.ru)

*Mikhail Evgenievich Alekseev* – engineer, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [mihaal191114@gmail.com](mailto:mihaal191114@gmail.com)

### Для цитирования

### For citation

Алексева Т. Л. Повышение эффективности рекуперации электрической энергии в электрические сети переменного тока / Т. Л. Алексева, Н. Л. Рябченко, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, М. Е. Алексеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 86–97. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62). 86–97

Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A., Tikhomirov V.A., Alekseev M.E. Povyshenie effektivnosti rekuperatsii elektricheskoi energii v elektricheskie seti peremennogo toka [Increase of efficiency of electric energy recovery into AC electrical networks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 86–97, DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62). 86–97