

**Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук**

(Украина, Днепродзержинск, Национальный горный университет),

**А.Г. Ликаренко, В.И. Бутенко, канд. техн. наук**

(Украина, Криворожский металлургический факультет НМетАУ)

## **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ ПРЕРЫВИСТЫЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК ШАХТНОЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ**

**Введение.** Применение устройств защиты от утечек в контактных сетях электровозного транспорта на горнорудных шахтах связано с необходимостью учета специфических условий их эксплуатации. Это связано прежде всего с большим грузопотоком и значительной разветвленностью контактной сети при наличии низких устойчивых уровней сопротивления ее изоляции.

В связи с большими грузопотоками, а также необходимостью различного рода оперативных переключений тяговых преобразователей в сети и на отдельных секциях к защите предъявляются требования параллельной работы тяговых преобразователей на подстанции. Параметры контактных сетей, которые необходимо принимать при разработке защиты от утечек тока, следующие.

Протяженность контактных сетей в шахтах Кривбасса, получающих питание от одной тяговой подстанции, составляет в среднем 4 км и изменяется в пределах 2–8,5 км при максимальной протяженности одной цепи от тяговой подстанции до 1,3 км. Количество подключений к контактной сети одной тяговой подстанции для стрелочных переводов равно 15–60, для контактных датчиков – 10–20 шт. Число параллельно работающих тяговых агрегатов на подстанции достигает четырех, а в подавляющем большинстве случаев составляет два. Одновременно работает 4–5 электровозов. Устойчивые уровни изоляции сети находятся в пределах 4–9 кОм/км. Продольное активное сопротивление сети имеет минимальный уровень 0,25–0,3 Ом/км, а индуктивность составляет  $(1,1–1,8) \cdot 10^{-3}$  Гн/км [1]. Значительная разветвленность контактных сетей, в которых возможны частые недопустимые режимы работы электрооборудования, а также сложность поиска повреждений в этих условиях требуют построения селективной системы защиты от токов утечки.

Исследования, выполненные в Украинском НИИ безопасности труда в горнорудной и металлургической промышленности (НИИБТГ) показали, что достичь нормируемой по условиям электробезопасности чувствительности защиты от утечек тока в условиях параметров контактных сетей рудных шахт возможно только при разделении цепей силового и оперативного токов [1]. Это достигается созданием циклического прерывания цепей нагрузок, включением в них вентильных заградителей и наложением в паузе на сеть оперативного тока в направлении, встречном рабочему. Однако все созданные устройства с таким принципом работы являются электромагнитнонесовместимыми с тяговым электрооборудованием. Так, устройство защиты УЗО-2 снижает допустимую дли-

тельность работы двигателя электровоза по сравнению с номинальным часовым режимом его работы при питании сглаживаемым током до значения 0,235. Исследованиями НИИБТГ установлено, что электромагнитная совместимость выпрямителя, формирующего импульсное напряжение по форме, аналогично УЗО-2, достигается при продолжительности цикла 0,2 с, относительных продолжительностях включения напряжения 29/30 и паузе 1/30 [1]. При таких параметрах импульсного напряжения мощность электродвигателя снижается до 0,95 паспортного значения, что соответствует нормативу отключения мощности от паспортного значения для случая отсутствия устройств, которые сглаживают пульсации. При такой продолжительности включения импульсное напряжение приравнивается к постоянному, т.е. условия обеспечения электробезопасности сохраняются.

**Цель статьи** – определение структурной схемы преобразователя импульсного напряжения согласно вышеуказанным параметрам цикла, относительной продолжительностью включения напряжения и паузе.

**Результаты исследований.** Теоретическим обобщением результатов известных работ установлено, что наиболее приемлемым является компромиссное решение построения структуры такого преобразователя, при работе которого необходимо ограничение обратного напряжения на вентилях до допустимого значения по условиям надежности работы электрооборудования, а полученное при этом быстрое действие прерывания силового тока нагрузки позволит достичь заданного значения относительной продолжительности включения импульсного напряжения преобразователя [1]. Это наиболее просто выполняется при использовании инверторного режима работы трехфазного мостового преобразователя с естественной коммутацией вентилей для прерывания тока силовой цепи, частным случаем реализации которого является снятие сигналов управления с вентилей преобразователя [2]. Экспериментальная оценка показала, что токи перегрузки  $1,3 I_n$  при самом неблагоприятном сочетании индуктивности и активного сопротивления цепи контактной сети отключаются в течение  $4,67 \cdot 10^{-3}$  с, при этом общая длительность паузы силового напряжения, необходимая для контроля сопротивления утечки, не превышает  $6,7 \cdot 10^{-3}$  с. На основании этого, данная длительность паузы при формировании импульсного напряжения была принята в качестве исходной для разработки структурной схемы преобразователя.

Теоретическим обобщением установлены следующие требования к функциональной схеме преобразователя импульсного напряжения для защиты от утечек тока шахтной контактной сети:

1. Для достижения электромагнитной совместимости преобразователя с тяговым электрооборудованием продолжительность цикла импульсного напряжения должна быть не менее 0,2 с, при относительной продолжительности включения напряжения 29/30 и длительности паузы 1/30 [2].

2. Частота импульсного напряжения должна быть жестко синхронизирована с частотой переменного тока питающей сети, т.е. периоды цикла импульсного напряжения  $T_u$  и переменного тока питающей сети  $T_c$  должны быть связаны соотношением

$$T_{ц} = KT_c, \quad (1)$$

где  $K$  – количество периодов переменного тока питающей сети, соответствующее периоду импульсного напряжения, т.е. относительная продолжительность цикла.

3. Вентили преобразователя должны открываться с нулевого значения прямого напряжения на них.

4. Импульсы напряжения должны формироваться с синусоидальной формой переднего и заднего фронтов.

5. Угол проводимости всех выпрямительных контуров преобразователя в режиме нагрузки должен быть максимальным.

6. Среднее значение импульсного напряжения должно составлять не менее 0,95 от значения постоянного напряжения, т.е. от значения непрерывного выпрямителя.

7. Для функциональной параллельной работы нескольких тяговых преобразователей на подстанции с обеспечением защиты от утечек тока в преобразователе должно предусматриваться:

- одновременность воздействия на автоматические выключатели при срабатывании чувствительного элемента защиты от утечек тока;
- наличие одного источника оперативного тока и одного чувствительного органа для всех параллельно включенных преобразователей;
- возможность оперативных переключений при защите всех отдельных секций сети, питающихся от подстанции, и блокировка подачи напряжения при отсутствии защиты на отдельной секции.

Структурная схема тягового преобразователя, разработанная на основе приведенных выше требований, защищена авторским свидетельством [3] и представлена на рис. 1. Элементы структурной схемы и их обозначения:

V1–V6 – силовые вентили тягового преобразователя;

V7 – вентиль для разряда энергии, накопленной в индуктивности сети;

Н01–Н03 – нуль-органы соответственно первой, второй и третьей фаз переменного тока питающей сети;

ИПЭ – источник импульсного питания управляющих электродов силовых вентилях преобразователя;

ДЧ – делитель частоты напряжения питающей сети переменного тока;

КЛ1, КЛ2 – бесконтактные ключи;

И – логический элемент совпадения;

ФИ – формирователь широких импульсов управления;

ЧО – чувствительный орган защиты.

Работа тягового преобразователя заключается в следующем. Делитель частоты ДЧ, получая сигналы первой фазы напряжения сети переменного тока, при переходе его через нулевое значение, с помощью нуль-органа Н01 преобразовывает их в чередующиеся сигналы заданной частоты и длительности. Эти сигналы поступают на входы ключей КЛ1 и КЛ2 и закрывают их. При этом ключи “запоминают” свое состояние и остаются закрытыми до тех пор, пока

открывающие сигналы не поступят на вторые их входы – от ФИ и И. Ключи КЛ1, КЛ2, закрываясь, снимают сигналы управления с электродов вентилях преобразователя, последние в свою очередь закрываются при уменьшении силового тока до минимального значения тока удерживания последней проводящей пары вентилях и прерывают электроснабжение сети. При этом прерывание силового тока предусмотрено для следующих режимов. Прерывание номинальных токов и токов допустимых перегрузок производится воздействием сигнала защиты на формирователь импульсов ФИ. При возникновении в сети токов короткого замыкания, превышающих допустимую величину, по сигналу от сработавшего чувствительного органа подается открывающий сигнал на тиристор V7, который открывается и гасит энергию, запасенную в индуктивности сети, обеспечивая надежное отключение преобразователя при появлении сверхтоков.

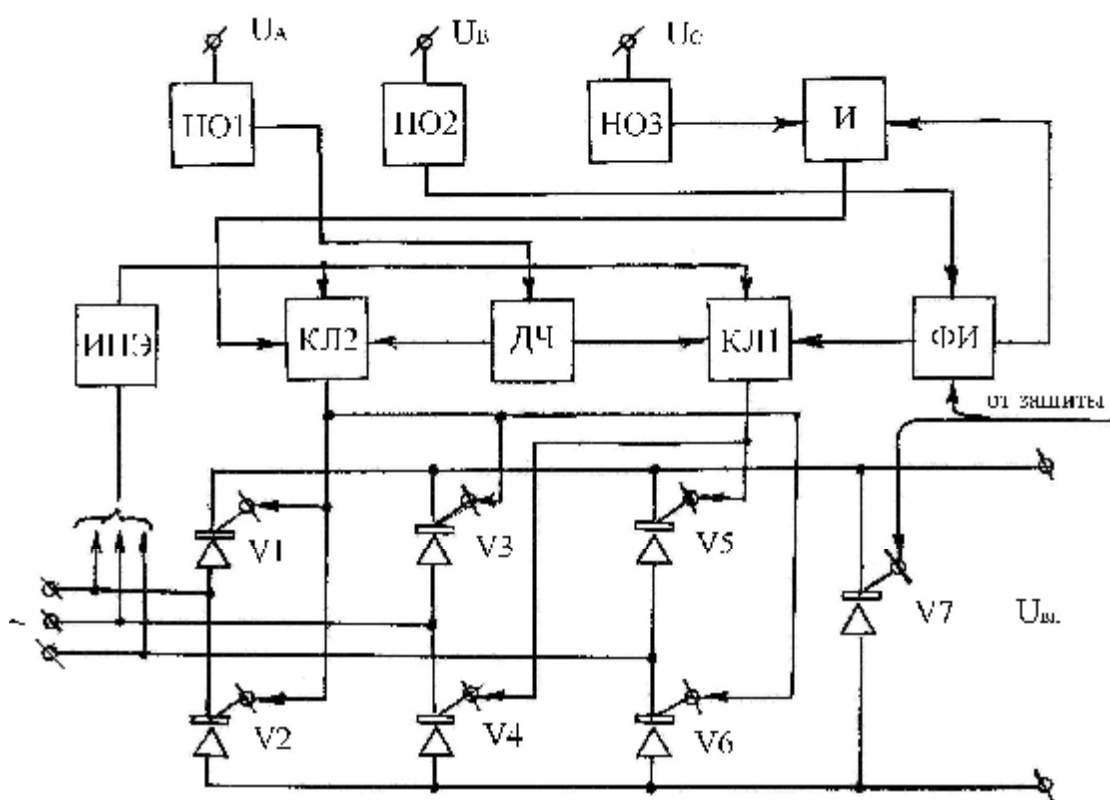


Рис. 1. Структурная схема преобразователя переменного тока в постоянный прерывистый для защиты от утечек шахтной тяговой сети постоянного тока с циклическим прерыванием цепи нагрузок

При отсутствии недопустимых значений сопротивлений утечки или КЗ в сети, после истечения времени контрольной паузы напряжения, открывается ключ КЛ1 по сигналу с нуля-органа НО2, формирующий сигналы напряжения второй фазы сети переменного тока при переходе его через нулевое значение. Ключ КЛ1, открываясь, разрешает прохождение сигналов от ИПЭ на управляющие электроды первой проводящей пары вентилях V4 и V5, которые, открываясь, и на выходе преобразователя формируют импульс напряжения с синусоидальным передним фронтом, при котором скорость нарастания тока силовой цепи ограничивается не только параметрами нагрузки и сети, но и синусои-

дальной формой переднего фронта импульса этого напряжения. Сигнал с нуля-органа НО3, т.е. сигнал третьей фазы напряжения сети переменного тока при переходе через нулевое значение открывает ключ КЛ2 через логический элемент совпадения И. Ключ КЛ2 начинает пропускать сигналы управления от источника ИПЭ на управляющие электроды остальных вентилях V1, V2, V3, V6. Логический элемент совпадения И позволяет открывать этот ключ только после формирования сигнала с формирователя широких импульсов ФИ, поскольку на его входе появится сигнал только лишь при наличии открывающих сигналов на обоих его входах. Это необходимо для того, чтобы при подаче напряжения на схему преобразователя или при автоматическом повторном включении напряжения после срабатывания защит, управляющий сигнал на ключ КЛ2 не поступал бы раньше, чем на ключ КЛ1 во избежание хотя бы единичного формирования импульса силового напряжения преобразователя с крутым передним фронтом. Все это позволяет формировать необходимой длительности паузы и импульсы постоянного тока с синусоидальными их фронтами. При этом продолжительность импульсов напряжения можно регулировать и выбирать при помощи изменения коэффициента деления частоты ДЧ, который преобразует поступающие на него сигналы от нуля-органа НО1 с частотой напряжения питающей сети (50 Гц) в заданную частоту прерывания силового тока сети (заданную частоту импульсов формируемого импульсного напряжения). Выражение для определения которой можно представить в виде

$$f_u = \frac{1}{T_u} = \frac{1}{2pK} \cdot \quad (2)$$

Длительность паузы выбирается при помощи определения соответствующих фаз питающей сети переменного тока подаваемых на входы нуля-органов НО1, НО2, НО3. С учетом принятой необходимости формирования импульсов постоянного напряжения с синусоидальными фронтами и длительностью паузы  $2\pi/3$  ключ КЛ2 закрывают на протяжении  $4\pi/3$ .

Предложенная структурная схема преобразователя (рис. 1) была использована при разработке и серийно освоенного в производстве преобразовательного агрегата рудничного нормального исполнения ВТПЕ-500-275-У5 с защитой от токов утечки в контактной сети шахтного электровозного транспорта [1].

#### *Технические данные преобразовательного агрегата ВТПЕ-500-275-У5*

1.	Номинальное напряжение, В:	
	• питающей сети трехфазного переменного тока	6000
	• цепей на входе преобразовательной секции и цепей собственных нужд (трехфазное переменное)	230
	• выпрямленное постоянное импульсное на выходе агрегата	275
2.	Частота питающей сети переменного тока, Гц	50
3.	Номинальный ток на выходе агрегата, А	500
4.	Номинальная мощность агрегата, кВт	137,5
5.	Режим работы	Длительный
6.	Способ охлаждения	Естественный воздушный

7.	Схема выпрямления	Трехфазная мостовая
8.	Цикличность прерывания цепи питания нагрузки (не более), с	0,2
9.	Время паузы в питании нагрузки (не более), с	0,01
10.	Сопrotивление уставки срабатывания в режиме (не менее), кОм:	
	• утечки при прикосновении человека	6
	• критического сопротивления изоляции по пожарной безопасности	1,0
	• опережающего контроля сопротивления изоляции при отключенной сети	12
11.	Время автоматического повторного включения сети после исчезновения утечки (не более), с	1,0
12.	Исполнение рудничное нормальное	РН-2
13.	Степень защиты преобразовательной секции (IP)	
	• силового блока	22
	• отсека системы управления и защиты	54
14.	Габаритные размеры преобразовательной секции, мм	800x1900x x600
15.	Масса преобразовательной секции, кг	350

В состав тягового преобразователя входит преобразовательный трансформатор ТПС-160/6-77 и преобразовательная секция, упрощенная принципиальная схема которой изображена на рис. 2.

В преобразовательную секцию входит силовой блок, блок управления и защиты преобразователя БЗУ, а также блок защиты от утечек тока контактной сети БЗУ. Силовой блок преобразователя состоит из автоматического выключателя QF, силовых тиристоров VS1–VS6, составляющих мостовую схему выпрямления, быстродействующих предохранителей FV1–FV6 и реактора L1, индуктивность которого обеспечивает термическую устойчивость тиристоров при коротком замыкании.

Блоки БУЗ и БЗУ включают в себя функциональные элементы, построенные на интегральных микросхемах. Блок БУЗ воздействует на управляющие электроды вентилей силового преобразователя через оптронные вентили VS7.2–VS12.2 и резисторы R1–R6 и на автоматический выключатель QF. Блок БЗУ воздействует на коммутаторы преобразователя через БУЗ.

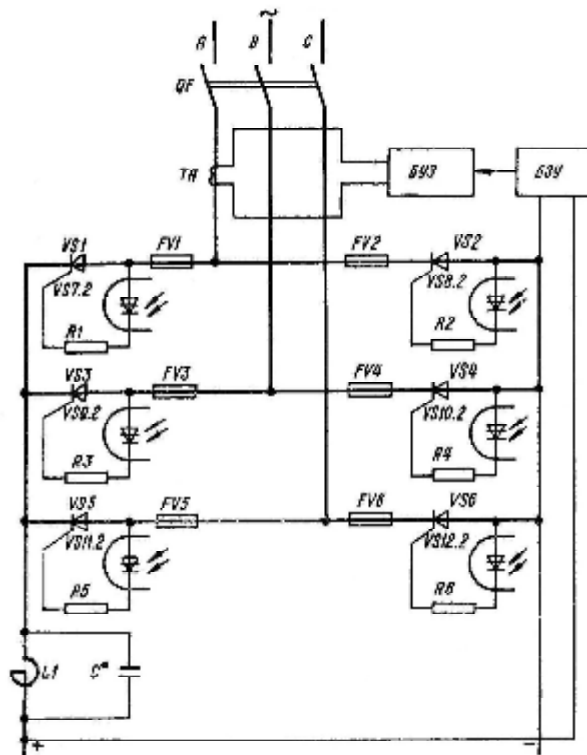


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема преобразовательной секции агрегата ВТПЕ-500-275-У5

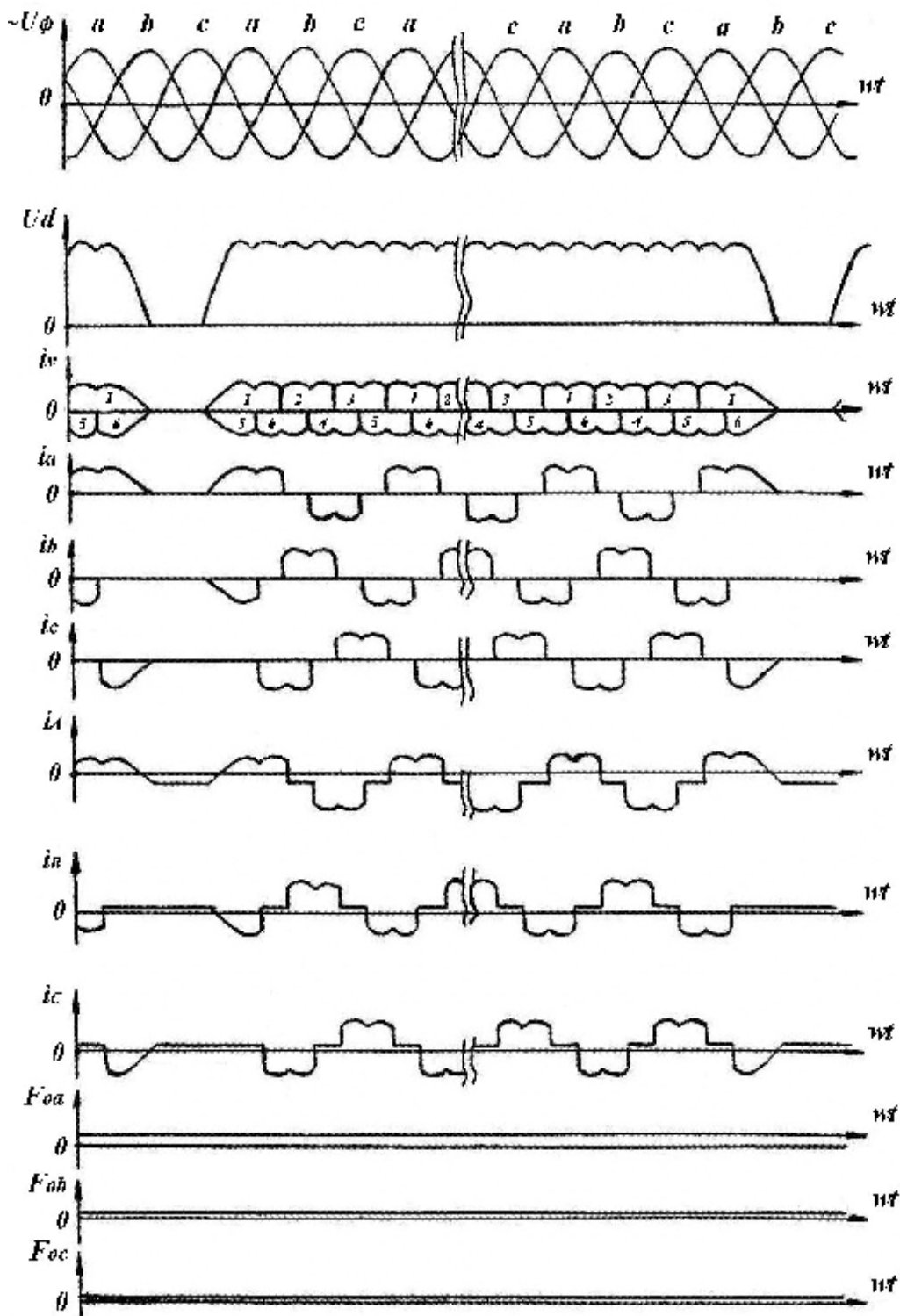


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и токов преобразователя, а также преобразовательного трансформатора

Переменное напряжение в постоянное импульсное преобразуется по командам блока БУЗ путем формирования последовательности импульсов постоянного напряжения силовыми вентилями VS1–VS6 и циклического их включения. При этом формирование передних фронтов импульсов производится с нулевого значения синусоиды переменного напряжения питающей сети при помощи раздельной коммутации выпрямительных контуров преобразователя пу-

тем открывания первого выпрямительного контура с нулевого значения синусоидального напряжения соответствующей фазы питающей сети, последующего выпрямления напряжения выпрямительными контурами на протяжении заданной длительности формируемого импульса и последующего выключения контуров преобразователя естественной коммутацией силовых вентилях. Задний фронт формируется также по синусоиде питающего напряжения до нулевого значения. На рис. 3 изображены временные диаграммы сетевого напряжения  $U_{\phi}$ , постоянного импульсного напряжения  $U_d$ , токи в вентиле  $i_v$ , токи в обмотках преобразовательного трансформатора  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ , и магнитные потоки остаточного намагничивания  $F_{oa}, F_{ob}, F_{oc}$ . Из диаграмм видно, что преобразователь является электромагнитносовместимым с тяговым электрооборудованием.

### **Выводы**

1. Для защиты от токов утечки контактных сетей электровозного транспорта горнорудных шахт, основанной на принципе разделения цепей силового и оперативного токов, создан и освоен в производстве преобразователь переменного тока в прерывистый с цикличностью прерывания цепи нагрузок.

2. Импульсное напряжение преобразователя имеет продолжительность цикла 0,2 с при относительной продолжительности включения напряжения 29/30 и паузе 1/30, а фронты его импульсов – синусоидальность формы. Такие параметры прерывания снижают мощность тягового электродвигателя в пределах 0,5 % от паспортного значения, а силовой ток не содержит высокочастотных составляющих. Это обеспечивает электромагнитную совместимость преобразователя импульсного напряжения с тяговым электрооборудованием.

3. Импульсное напряжение преобразователя по электрическим и энергетическим показателям приравнивается к выпрямленному постоянному напряжению трехфазного выпрямителя, что подтверждает его техническую приемлемость без ухудшения условий электробезопасности существующих сетей.

### **Список литературы**

1. Электробезопасность рудничной откатки / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, А.Г. Ликаренко и др. – К.: Техника, 1988. – 188 с.
2. Полупроводниковые выпрямители / Е.И. Беркович, В.Н. Ковалев, Ф.И. Ковалев и др.; Под ред. Ф.И. Ковалева и Г.И. Мостковой. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
3. Авторское свидетельство 8 24362 СССР МКИ<sup>3</sup> НО2Н 7НО, НО2М 1/18. Преобразователь переменного тока в постоянный прерывистый / А.Г. Животовский, А.Г. Ликаренко, Ю.Н. Батасов, Ю.Г. Бацеев. – Опубликовано в Б.И., 1981. – №15.