

Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Государственное высшее учебное заведение Национальный горный университет),

А.Г. Ликаренко, В.И. Бутенко, кандидаты техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В СИСТЕМЕ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК ШАХТНОЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ

Направление разработки защиты от утечек в контактных сетях шахтного электровозного транспорта, основанной на принципе разделения во времени цепей силового и оперативного токов, получило в последние десятилетия широкое развитие. Главным достоинством этого класса устройств защиты от утечек является возможность получить высокую чувствительность при контроле сопротивлений утечек за счет высокого качества заградителей для оперативного тока при включении в цепи нагрузок полупроводниковых вентилей. Данное направление защиты от утечек разработано институтом МакНИИ и первоначально было реализовано в устройстве защитного отключения УЗО-2, которое формировало паузу для контроля утечек в импульсном напряжении в каждый период переменного тока питающей сети [1]. Длительность импульса напряжения составляла $2/3$ периода, а паузы – одну треть. Так как частота прерываний составила 50 Гц, то это вызвало недопустимые увеличения тепловых потерь в электродвигателях электровоза [2] и сделало его несовместимым с устройством УЗО-2. Результаты научных работ по установлению такой несовместимости опубликовано не было, однако сам факт ее существования доказывался разработкой нового устройства УЗО-300, в котором длительность импульса силового напряжения уже составила 160 мс, а длительность паузы была снижена до 500 мкс [3]. Это существенно снизило потери на перемагничивание в электродвигателях. Однако, из-за применения искусственной коммутации в преобразователе, импульсы напряжения в контактной сети формировались прямоугольной формы, что обусловило электромагнитную несовместимость УЗО-2 с рудничным электрооборудованием из-за высокого уровня высокочастотных помех. Кроме того, надежность силового преобразователя с искусственной коммутацией оказалась весьма низкой.

В данной работе ставятся задачи теоретического исследования энергетических показателей устройства УЗО-2, а на их основе – влияния относительной продолжительности цикла импульсного напряжения по форме аналогичного УЗО-2 (с синусоидальными фронтами) на температурный режим электродвигателя электровоза типа ЭДР – 25П.

Силовое напряжение с синусоидальными фронтами, аналогичное как в УЗО-2, было принято за исследуемое, поскольку оно не содержит высокочастотных составляющих, что в свою очередь обеспечивает надежность работы

управляемых вентилей преобразователя в условиях высокой скорости нарастания силового тока и напряжения (перенапряжения).

Энергетические показатели преобразования УЗО-2 рассчитывались по схемам и векторной диаграмме напряжений действующих контурах выпрямителя, которые представлены на рис. 1. В соответствии с векторной диаграммой (рис.1 в) напряжение выпрямителя УЗО-2 может быть представлено функцией:

$$U_{ВП}(\omega t) = \begin{cases} +U_{AC(m)} \sin(\omega t - 30^\circ), & \text{если } 30^\circ \leq \omega t \leq 150^\circ; \\ -U_{BC(m)} \cos \omega t, & \text{если } 150^\circ \leq \omega t \leq 270^\circ. \end{cases} \quad (1)$$

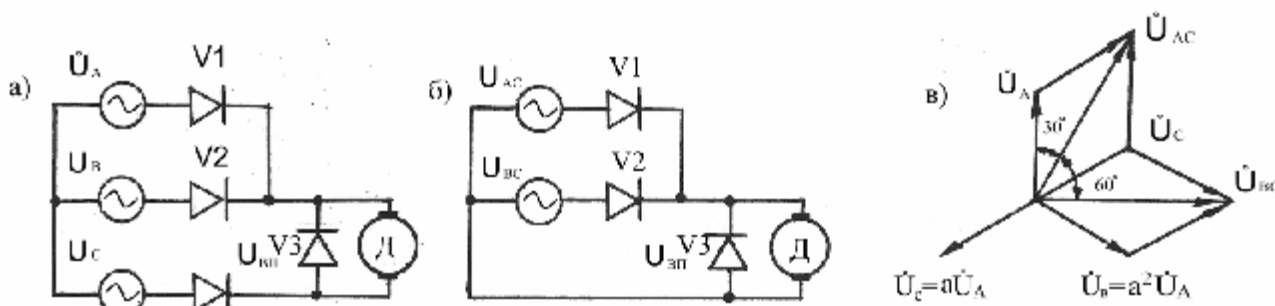


Рис.1. Схемы выпрямления для фазных напряжений (а) и преобразованная для линейных напряжений (б), векторная диаграмма напряжений выпрямителя УЗО-2 (в).

Для разложения функции напряжения (1) в ряд Фурье, преобразуем ее в симметричную функцию относительно оси ординат путем сдвига сегмента:

$$U_{ВП}(\omega t) = \begin{cases} -U_{AC(m)} \sin(\omega t - 60^\circ), & \text{если } -120^\circ \leq \omega t \leq 0; \\ +U_{BC(m)} \cos(\omega t - 30^\circ), & \text{если } 0 \leq \omega t \leq 120^\circ. \end{cases} \quad (2)$$

Построенные по выражениям (1) и (2) временные диаграммы напряжения выпрямителя УЗО-2 до и после его симметрирования приведены на рис. 2.

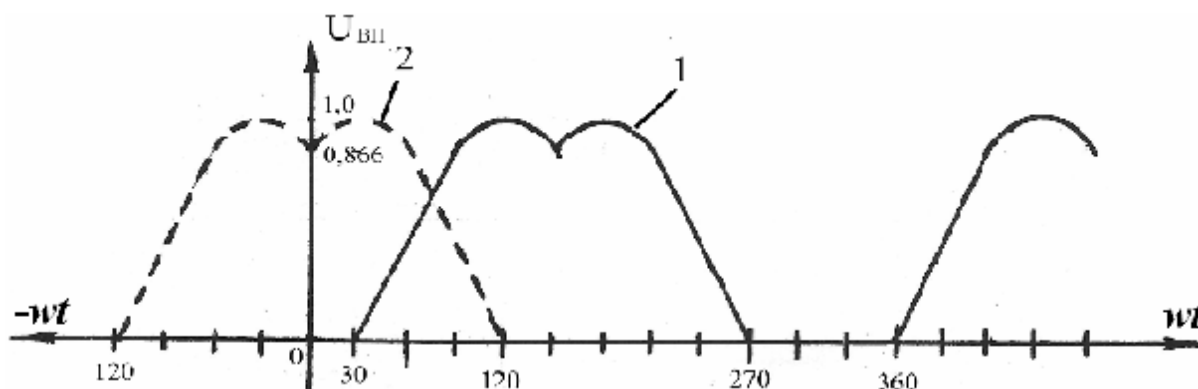


Рис.2. Временная диаграмма напряжения выпрямителя УЗО-2:
1 – по выражению (1); 2 – после симметрирования по выражению (3)

После преобразования функции напряжения выпрямителя УЗО-2 в четную функцию, ее разложение в ряд Фурье имеет вид [4]:

$$U_{ВП}(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) : n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2U_{Л(m)}}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \cos(\omega t - 30^\circ) \cdot \cos(n\omega t) d\omega t,$$

где $U_{Л(m)} = U_{AC(m)} = U_{BC(m)}$ – амплитуда линейного напряжения сети;

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{\pi} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \Big|_0^{\frac{2\pi}{3}} \quad a_1 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\frac{\omega t}{2} + \frac{1}{4} \sin 2\omega t \right] \Big|_0^{\frac{\pi}{3}} + \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sin^2 \omega t}{2} \right) \Big|_0^{\frac{2\pi}{3}}.$$

Для гармоник $n = 2, 3, 4, \dots$ коэффициенты ряда Фурье определяются по выражению:

$$a_n = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\omega t}{2(1+n)} + \frac{\sin(1-n)\omega t}{2(1-n)} \right] \Big|_0^{\frac{2\pi}{3}} - \frac{1}{\pi} \left[\frac{\cos(1-n)\omega t}{2(1-n)} + \frac{\cos(1-n)\omega t}{2(1-n)} \right] \Big|_0^{\frac{2\pi}{3}}; \quad (4)$$

Результаты расчетов коэффициентов ряда Фурье для напряжения выпрямителя УЗО-2 приведены в таблице. Там же для сравнения приведены данные для схемы однополупериодного выпрямления. Из сравнения видно, что выпрямитель УЗО-2 по своим электрическим и энергетическим показателям соответствует схеме однополупериодного выпрямления, имеющего наихудшие показатели среди известных схем выпрямления. Однако улучшить эти показатели за счет включения на выходе УЗО-2 сглаживающего фильтра невозможно, так как это устранил паузу в электроснабжении линий, которая специально создавалась для осуществления контроля сопротивлений утечек и изоляции сети.

Электрические показатели выпрямителя УЗО-2 в сравнении с однополупериодным выпрямителем

Коэффициенты гармоник ряда Фурье a_n (3)			Действующие значения напряжения гармоники выпрямителя, В						Коэффициент пульсации $\frac{U_{1(m)}}{U_0}$	Коэффициент формы кривой $\frac{U_{ВП}}{U_0}$
Выпрямитель УЗО-2										
$a_0/2$	a_1	a_3	a_6	U_0	U_1	U_3	U_6	$U_{ВП}$		
0,478	0,577	0,119	0,027	181,5	219,4	45,4	10,3	288,5	1,71	1,59
Однополупериодный выпрямитель										
0,45	-	-	-	171,0	-	-	-	-	1,57	-

Влияние относительной продолжительности цикла импульсного напряжения по форме аналогично как УЗО-2 (с синусоидальными фронтами) исследовалось в предположении, что периоды импульсного напряжения T_u , форми-

руемого управляемым преобразователем по схеме моста Ларионова, и питающего напряжения сети T_C связаны между собой соотношением:

$$T_{\text{ц}} = K_{\text{ц}} \cdot T_C, \quad (5)$$

где: $K_{\text{ц}}$ – относительная продолжительность цикла питающего напряжения.

Влияние относительной продолжительности цикла импульсного напряжения на тепловой режим двигателя электровоза ЭДР–25П исследовалось экспериментально на стенде, где реальные токи его нагрузки создавались с помощью генератора, системы Г-Д. Основным было то положение, что допустимая мощность электродвигателя в том или ином режиме эксплуатации определяется величиной допустимого значения температуры его нагрева, а паспортное значение тока определяет граничную допустимую температуру для каждой части электродвигателя на протяжении часа безостановочной работы. Исходя из этого положения, была снята базовая зависимость температуры нагрева электродвигателя от времени его работы при питании от источника постоянного напряжения для установления влияния импульсного напряжения разной относительной продолжительности включения на его температурные режимы. Определяя время нагревания электродвигателя в безостановочном режиме работы до базового значения температуры при разных продолжительностях включения импульсного напряжения (5), определялось допустимое время работы электродвигателя от заданной продолжительности включения, а оценка отклонения этого времени от паспортного значения производилась по формуле:

$$\alpha = \frac{t_{n.n}}{t_{II}} \leq 0,95 = 95\%; \quad (6)$$

где α – коэффициент отклонения безостановочного режима работы электродвигателя при нормативе допустимого снижения значения в случае отсутствия устройств, что сглаживают пульсации – 95%; $t_{n.n}$ – время работы электродвигателя в безостановочном режиме до достижения предельно допустимой температуры нагрева (базового значения) при импульсном напряжении с заданной относительной продолжительностью цикла $K_{\text{ц}}$; t_{II} – паспортное время работы электродвигателя при питании его от источника постоянного тока и номинальном токе нагрузки.

Система управления преобразователя формировала импульсное напряжение с заданной относительной продолжительностью цикла $K_{\text{ц}}$ (5) при выполнении общих требований: а) частота импульсного напряжения формировалась в жесткой ее синхронизации с частотой питающей сети; б) открывание вентиля преобразователя обеспечивалось с нулевого значения прямого напряжения на них; в) длительность паузы в цикле импульсного напряжения была принята такой же как в известном устройстве УЗО-300 – $2/3\pi$, т.е. $6,7 \cdot 10^{-3}$ с.

Формирование импульсов напряжения с синусоидальной формой переднего и заднего фронтов осуществлялось при помощи отдельной коммутации фаз питающей сети переменного тока по алгоритму: *а)* в исходном состоянии преобразователь закрыт за счет снятия сигналов управления со всех выпрямительных контуров; *б)* за счет подачи импульсов управления только на один из выпрямительных контуров, преобразователь переводился в режим однополупериодного выпрямления; *в)* через четверть периода напряжения сети на этом контуре преобразователь переводился в режим трехфазного выпрямления за счет подачи импульсов управления на остальные выпрямительные контуры; *г)* после непрерывного выпрямления заданного количества периодов напряжения сети, т.е. после заданной относительной продолжительности цикла импульсного напряжения $K_{\text{ц}}$, преобразователь переводился в закрытое состояние за счет снятия сигналов управления со всех выпрямительных контуров; *д)* длительностью снятия сигналов управления определялась длительность заданной паузы в импульсном напряжении. Далее по этому же алгоритму формировались все последующие циклы импульсного напряжения.

В процессе проведения экспериментальных исследований было снято пять зависимостей теплового режима электродвигателя электровоза для наиболее характерных значений относительной продолжительности цикла импульсного напряжения, которые были приняты в известных устройствах защиты от утечек, и постоянного тока ($K_{\text{ц}} = \infty$). На рис. 3, *а* приведены графики зависимостей нагрева главного полюса электродвигателя электровоза от длительности цикла импульсного напряжения.

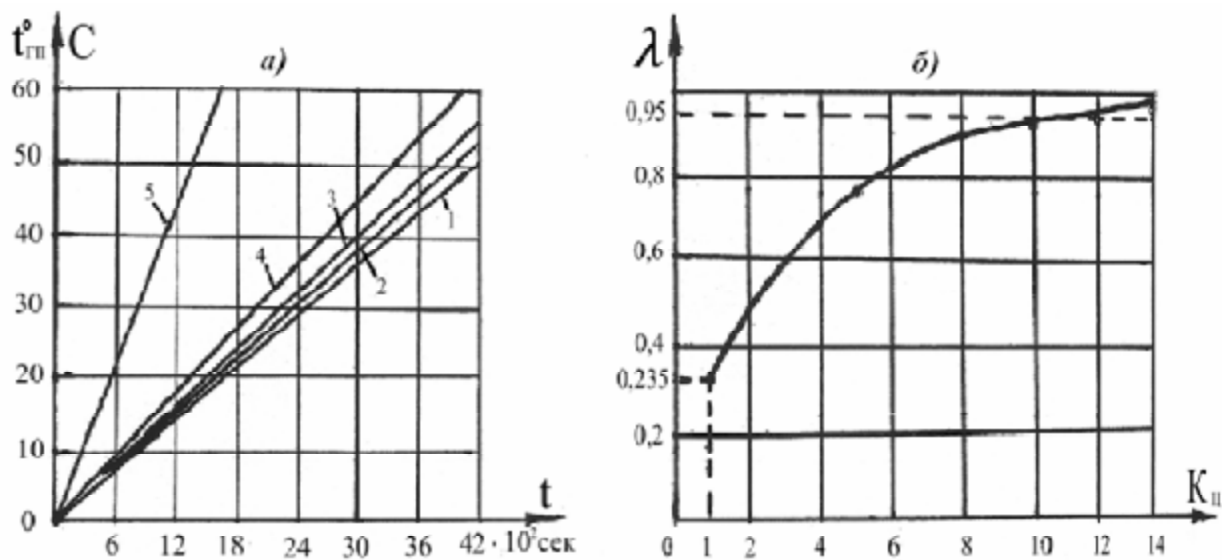


Рис.3. Графики зависимостей температуры нагрева главного полюса электродвигателя $\Delta t_{\text{ГП}}$ для часового режима t (*а*) и снижения времени безостановочного режима работы от длительности цикла импульсного напряжения $K_{\text{ц}}$ (*б*) при его значениях в периодах напряжения сети: 1 – ∞ ; 2 – 10 периодов; 3 – 8 периодов; 4 – 5 периодов; 5 – 1 период (УЗО-2)

Согласно выражению (6) выполнен расчет зависимости снижения длительности непрерывного режима работы тягового электродвигателя при пита-

нии его импульсным напряжением с различными значениями относительной длительности цикла по отношению к тепловому режиму работы при питании его постоянным током. График этой зависимости представлен на рис. 3, б. Из него видно, что снижение допустимой длительности непрерывного режима работы двигателя электровоза, питаемого от выпрямителя УЗО-2 ($K_{\text{ц}}=1$), по сравнению с номинальным часовым режимом его работы при питании постоянным током составляет 0,235, что определяет полную несовместимость преобразователя УЗО-2 с тяговым электродвигателем электровоза типа ЭДР-25П. Исходя из допустимого отклонения относительности непрерывного теплового режима работы двигателя электровоза по сравнению номинальным часовым режимом его работы т.е. отклонения от номинального значения на 5%, была определена минимальная величина длительности цикла импульсного напряжения, при которой не требуется использовать дополнительные сглаживающие устройства для тока двигателя электровоза. Из зависимостей (рис. 3, б) установлено, что минимальная длительность цикла импульсного напряжения по этому условию должна быть не менее 0,2 сек., что допустимо по нормативу электробезопасности, т.е. при $K_{\text{ц}} > 10$ обеспечивается электромагнитная совместимость преобразователя с тяговым электродвигателем и нормативом электробезопасности. При $K_{\text{ц}} < 10$ для достижения их совместимости требуется применение дополнительных средств для сглаживаний пульсации тока электродвигателя и обеспечения, таким образом, приемлемости условий теплового режима работы.

Тепловые зависимости электродвигателя (рис. 3) были получены с шунтирующим вентилем V3 (рис. 1, а) и установлено, что его влиянием можно пренебречь.

Выводы

1. Электрические и энергетические показатели выпрямителя УЗО-2 соответствуют схеме однополупериодного выпрямления. Мощность питаемого от него тягового электродвигателя снижается до 0,235 паспортного значения.

2. Для достижения электромагнитной совместимости преобразователя импульсного напряжения аналогичного по форме УЗО-2 относительная продолжительность включения импульсного напряжения должна быть увеличена до 10 периодов напряжения сети, т.е. должна быть равной 0,2 сек., что допустимо так же по нормативу электробезопасности. При этом мощность электродвигателя снижается на 5% от паспортного значения, что соответствует нормативу отклонения мощности от паспортного значения при отсутствии сглаживающих устройств.

Список литературы

1. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980, – 334 с.

2. Пастухов А. А. Устройства защиты шахтных контактных сетей постоянного тока. – Безопасность труда в промышленности. – 1983. – №2. – С. 31-32.
3. Волкотруб С. А., Гринь К. А., Колосюк В. П., Радюков В. В. //В кн.: Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР.: Тез. докл. и сообщ. II Всесоюз. науч.-техн. конф. – Д. – Марганец, 1979, – С. 282–283.
4. Воробьев Н. Н. Теория рядов. Изд. 2-е, – М.: Наука, 1973, – 208 с.
5. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М., 1972, 416 с.