

*А.Г. Ликаренко, В.И. Бутенко канд. техн. наук
(Украина, Криворожский металлургический факультет НМетАУ)*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧЕК ШАХТНОЙ ТЯГОВОЙ СЕТИ

Для контактных сетей электровозного транспорта рудных шахт разработан тяговый агрегат ВТПЕ-500-275-У5 с защитой от токов утечки. В последней использован усовершенствованный принцип разделения силового и оперативного токов путем циклического прерывания цепей нагрузки, включения в них вентильных заградителей оперативному току, который налагается на сеть встречно рабочему [1]. Основой защиты является преобразователь переменного напряжения в постоянное прерывистое, в паузе которого производится контроль сопротивления утечки.

Однако прерывистое напряжение преобразователя делает его электромагнитно несовместимым с тяговым электрооборудованием из-за существенного повышения его нагрева потерями на перемагничивание и недопустимого уровня помех, создаваемых высокочастотной составляющей в силовом токе. Так, например, в устройстве защиты УЗО-2, имеющем наибольшую частоту прерываний (каждый период напряжения питающей сети), часовая мощность электродвигателя в непрерывном режиме работы снижается до 0,235 паспортного значения [1].

Для обоснования методов расчета параметров и оценки эффективности преобразовательного агрегата переменного тока в постоянный прерывистый были выполнены исследования по установлению влияния длительности импульсного напряжения на параметры, определяющие его аппаратную надежность: а) выпрямленные напряжения; б) токи через вентили преобразователя; в) напряжения и токи вторичных обмоток силового трансформатора; д) полная мощность каждой из обмоток и полная мощность силового трансформатора.

Исходными данными для исследования этих параметров является режим формирования импульсного напряжения для трехфазного мостового преобразователя, диаграммы напряжений и токов которые представлены на рис.1. Импульсное напряжение преобразователя формируется с синусоидальным передним и задним фронтами и со стабильной длительностью цикла при помощи системы управления жестко синхронизированной с напряжением переменного тока питающей сети. При этом периоды постоянного импульсного напряжения преобразователя $T_{ц}$ и переменного тока питающей сети $T_{с}$ связанные соотношением:

$$T_{ц} = KT_{с}; \quad (1)$$

где: K - количество периодов переменного тока питающей сети, соответствующее периоду постоянного импульсного напряжения (относительная длительность цикла).

Длительность паузы импульсного напряжения принята из условия обеспечения надежности прерывания силового тока нагрузки преобразователя при отсутствии перенапряжений и надежности контроля сопротивления утечки сети. Длительность паузы для исследований нагрузочных режимов преобразователя принята равной $2\pi/3$ рад. Однако при использовании в системе управления преобразователем функции автоматического избирания длительности паузы в зависимости от токовой нагрузки преобразователя, кроме отмеченной паузы, целесообразно рассмотреть также зависимости параметров преобразователя при длительности равных $\pi/3$ и π , которые соответствуют нагрузкам ниже номинальной и выше допустимой.

Оценку параметров преобразователя наиболее целесообразно проводить при помощи общепринятых расчетных параметров - тока нагрузки и выпрямленного напряжения. Для нахождения выражений, связывающих напряжения и токи, в схеме преобразователя использовалось методика расчета параметров преобразователя, приведенная в работе [2]. Она основывается на кусочно-припасовочном методе анализа и идеализации параметров вентилей и трансформатора.

Среднее выпрямленное напряжение преобразователя определялось интегрированием по участкам цикла (рис.1.) по выражению:

$$U_d = \frac{\sqrt{6}U_\phi}{2\pi K} \left[2 \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin\omega t d\omega t + (Kn - n_1) \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin\omega t d\omega t \right], \quad (2)$$

где U_ϕ - действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки питающего трансформатора (В); n - число выпрямительных контуров преобразователя; n_1 - число выпрямительных контуров преобразователя, закрываемых при формировании паузы напряжения.

Для трехфазного мостового преобразователя $n = 6$, а n_1 для длительности паузы $2\pi/3$ равно 4 (см. рис. 1.). Для этой длительности паузы выражение выпрямленного напряжения имеет вид:

$$U_d = \frac{\sqrt{6}U_\phi(6K - 3)}{2\pi K} = \frac{2,34U_\phi}{K}(K - 0,5); \quad (3)$$

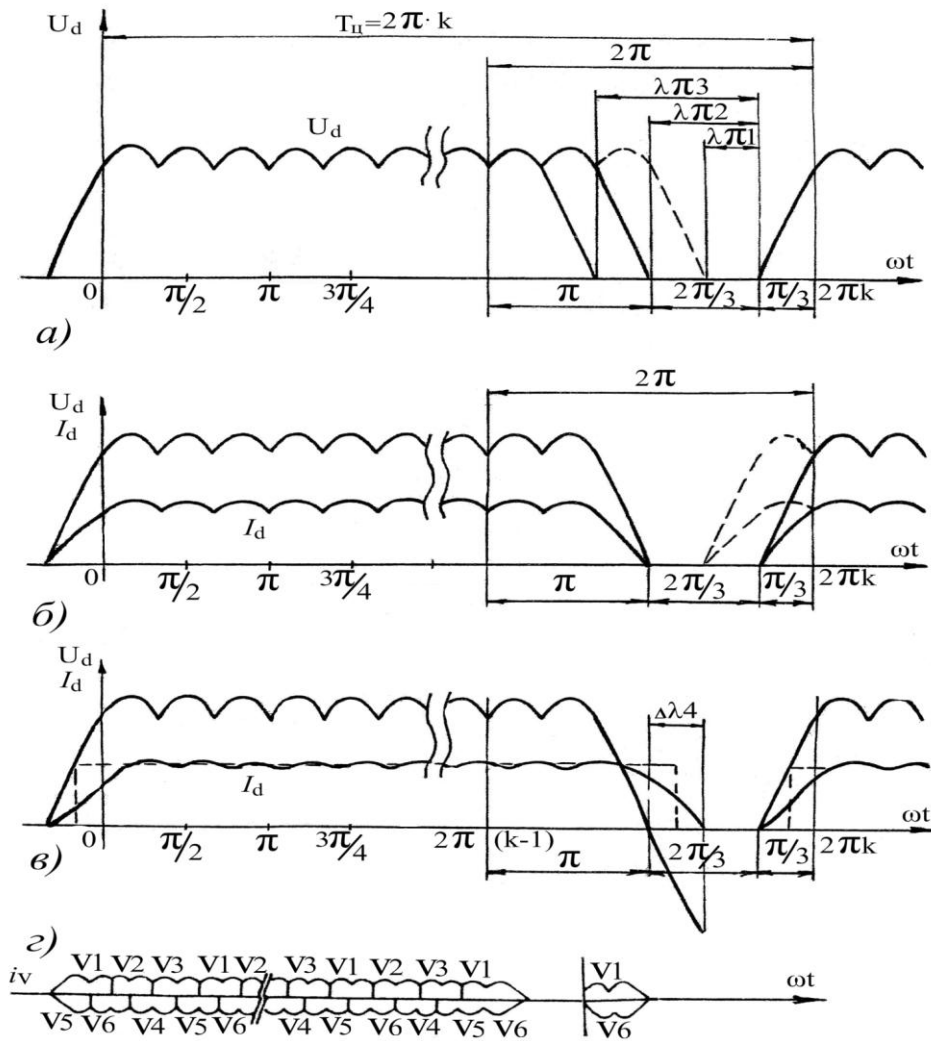


Рис.1. Временные диаграммы выпрямленного напряжения U_d и тока I_d трехфазного мостового преобразователя в режиме формирования импульсного напряжения с синусоидальными фронтами:

a – для длительностей паузы $\lambda = \frac{2\pi}{3}$; $\frac{\pi}{3}$; π ; b – при активной нагрузке; $в$ – при индуктивной нагрузке; $г$ – распределение проводимостей выпрямительных контуров преобразователя.

$T_{ц}$ – длительность цикла импульсного напряжения в количестве периодов питающего напряжения сети

Анализ распределения тока нагрузки между вентилями преобразователя производился для случая активной нагрузки (рис. 1-б). Выражения для токов в вентилях преобразователя имеет вид:

$$I_{V1} = \frac{I_m}{2\pi K} \left[2 \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin \omega t \, d\omega t + 2K \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin \omega t \, d\omega t \right] = \frac{I_m(K+0,5)}{\pi K}; \quad (4)$$

$$I_{V2} = I_{V3} = I_{V4} = \frac{I_m(K-1)}{\pi K}; \quad (5)$$

$$I_{V3} = I_{V4} = \frac{I_m(K - 0,25)}{\pi K}. \quad (6)$$

Для выбора вентиляй по току более целесообразным является определение их токов через выпрямленный ток нагрузки преобразователя I_d , который равен сумме токов катодного или анодного плеча преобразователя:

$$I_d = I_{V1} + I_{V2} + I_{V3} = I_{V4} + I_{V5} + I_{V6} = \frac{I_m \cdot 3(K - 0,5)}{\pi K}. \quad (7)$$

Выразив I_m через I_d и подставив его в (4...6) получаем:

$$I_{V1} = \frac{I_d(K + 0,5)}{(K - 0,5)}; \quad (8)$$

$$I_{V2} = I_{V3} = I_{V4} = \frac{I_d(K - 1)}{3(K - 0,5)}; \quad (9)$$

$$I_{V5} = I_{V6} = \frac{I_d(K - 0,25)}{3(K - 0,5)}. \quad (10)$$

Действующее значение токов вентиляй преобразователя при активной нагрузке с учетом выражений (4) и (7) можно представить в виде:

$$I_{V1} = \frac{I_d 2\pi K}{6K - 3} \sqrt{\frac{1}{2\pi K} \left(2 \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sin^2 \omega t d\omega t + 2K \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin^2 \omega t d\omega t \right)} = \frac{I_d \sqrt{K} \cdot 0,578}{(K - 0,5)} \sqrt{K + 0,321}. \quad (11)$$

Аналогично находим выражения токов для остальных вентиляй преобразователя:

$$I_{V2} = I_{V3} = I_{V4} = \frac{I_d \sqrt{K} \cdot 0,578}{\sqrt{K - 0,5}}; \quad (12)$$

$$I_{V5} = I_{V6} = \frac{I_d \sqrt{K} \cdot 0,578}{(K - 0,5)} \sqrt{K - 0,34}. \quad (13)$$

Для определения мощности питающего трансформатора необходимо определить действующее значение токов вторичных обмоток, выражения для которых можно представить в виде суммы их действующих значений за период цикла импульсного напряжения, которые с учетом (7) имеют вид:

$$I_a = \frac{I_d \sqrt{K} \cdot 0,817}{K - 0,5} \sqrt{K - 0,34}; \quad (14)$$

$$I_{\hat{A}} = I_{\tilde{N}} = \frac{I_d \sqrt{K} \cdot 0,817}{K - 0,5} \sqrt{K - 0,59}. \quad (15)$$

При формировании импульсного напряжения со стабильной длительностью цикла, удовлетворяющего (1) видно, что в период переменного тока на протяжении которого производится прерывание тока силовой цепи и формирования переднего фронта последующего импульса при длительности паузы $2\pi/3$ и синусоидальных фронтах импульсов напряжения необходимо закрывать вентили четырех контуров выпрямления (см.рис.1б.). При этом токи проводящих контуров создают однонаправленные магнитные потоки вынужденного намагничивания. Постоянные составляющие токов вторичных обмоток трансформатора определяются с учетом выражений (8)-(10) и могут быть представлены в виде:

$$I'_a = \frac{2}{2\pi K} \int_0^{\frac{4\pi}{3}} I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_d}{2(K-0,5)}; \quad (16)$$

$$I'_e = I'_c = \frac{I_d}{4(K-0,5)}. \quad (17)$$

Действующее значение токов первичных обмоток трансформаторов определяются по выражениям:

$$I_A = \frac{I_d \cdot 0,74}{K - 0,5} \sqrt{K(K + 0,276) - 0,89}; \quad (18)$$

$$I_B = I_C = \frac{I_d \cdot 0,817}{K - 0,5} \sqrt{K(K - 0,67) - \frac{0,312}{K}}. \quad (19)$$

Полную мощность первичной обмотки трансформатора можно представить в виде:

$$S_1 = U_{\phi} (I_A + I_B + I_C). \quad (20)$$

Подставив выражения (3), (18) и (19) в (20), находим выражения мощности первичной обмотки трансформатора:

$$S_1 = \frac{P_d \cdot K \cdot 0,698}{(K - 0,5)^2} \left[0,453 \sqrt{K(K + 0,276) - 0,89} + \sqrt{K(K - 0,67)} \right]. \quad (21)$$

Полную мощность вторичной обмотки можно представить в виде:

$$S_2 = U_{\phi 2} (I_a + I_e + I_c). \quad (22)$$

Учитывая выражения (3), (14) и (15) после подстановки в (22) находим:

$$S_2 = \frac{P_d \cdot K \cdot 0,698 \cdot \sqrt{K}}{(K - 0,5)^2} \left[0,5\sqrt{(K - 0,34)} + \sqrt{(K - 0,67)} \right]. \quad (23)$$

Типовая мощность трансформатора находится так:

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{P_d \cdot K \cdot 0,349}{(K - 0,5)^2} \left[0,453\sqrt{(K + 0,28)K - 0,89} + \sqrt{K(K - 0,67)} + 0,5\sqrt{K - 0,34} + \sqrt{K - 0,67} \right]. \quad (24)$$

При исследовании тягового преобразователя был проведен расчет его параметров и построены графики их зависимостей от длительности цикла импульсного напряжения, которые представлены на рис. 2.

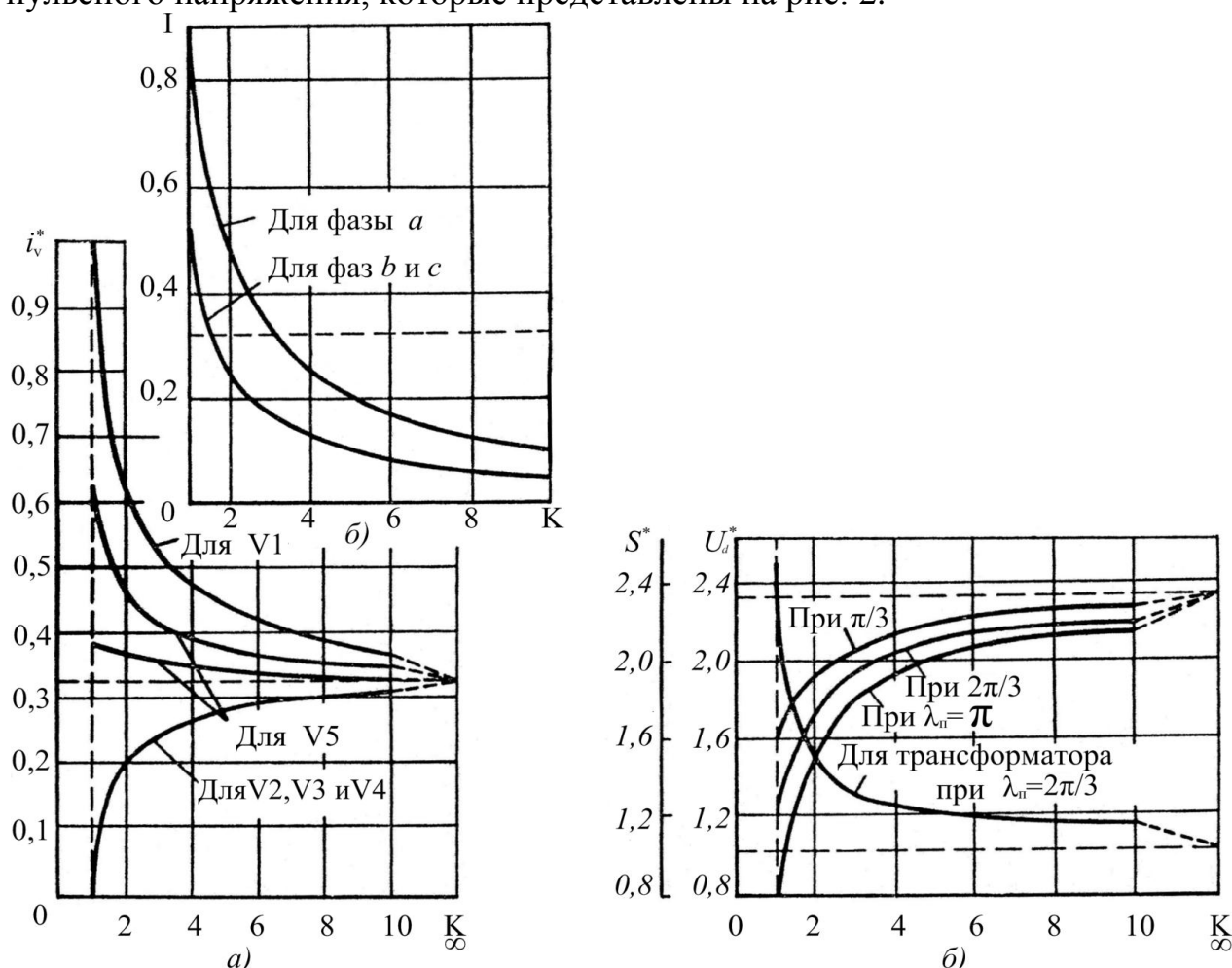


Рис.2. Токи вентиля преобразователя (а), остаточного намагничивания обмоток трансформатора (б) и среднее значение напряжения преобразователя и мощности трансформатора (в) в зависимости от длительности цикла импульсного напряжения.

Анализ зависимостей распределения тока нагрузки между вентилями преобразователя, (см. рис. 2 а), показывает, что оно неравномерно и достигает

максимальной несимметрии при минимальной длительности цикла импульсного напряжения ($K=1$), при которой токи вентилях $V2 \div V4$ равны нулю, а ток вентиля $V1$ составляет 300% от значения тока при непрерывном выпрямлении ($K=\infty$).

Из зависимости величины нескомпенсированного тока вторичной обмотки от относительной длительности цикла импульсного напряжения (рис. 1, б) видно что при минимальном его значении ($K=1$) величина этого тока для наиболее загруженной фазы достигает 100% номинального.

Если за критерий оценки принять распределение токов в вентилях трехфазного мостового преобразователя с нулевой точкой ($33\% I_H$), то можно заключить, что снизить влияние импульсного режима выпрямления на эти параметры преобразователя без применения дополнительных ограничивающих средств возможно путем ограничения минимального значения длительности цикла импульсного напряжения до значений:

- $K \geq 10$ по условию распределения токов в вентилях преобразователя (рис. 2, а);
- $K \geq 3$ по условию величины остаточного тока намагничивания (рис. 2, б).

Анализ зависимости среднего выпрямленного напряжения преобразователя показывает, что при минимальной длительности цикла ($K=1$) оно достигает $1,17 U_{cp}$, т.е. отклоняется от номинального значения для непрерывного выпрямления до 50%. Из зависимости (рис. 2, в) можно заключить, что наименьшей (граничной) длительностью цикла для выпрямленного напряжения является $K=10$, так как его уменьшение здесь составляет 5%, а это находится в допустимых пределах и может быть скомпенсировано за счет переключений дополнительных выводов первичной обмотки трансформатора.

Анализ зависимости полной мощности трансформатора от длительности цикла импульсного напряжения (рис. 2, в) показывает, что при минимальном ее значении ($K=1$) увеличение величины расчетной мощности трансформатора для активной нагрузки от ее значения для непрерывного выпрямления достигает 250%. При активно-индуктивной нагрузке эта зависимость изменяется незначительно. Из зависимости расчетной мощности трансформатора от длительности цикла импульсного напряжения (рис. 2, в) можно заключить, что минимальной (граничной) длительностью цикла для расчетной мощности трансформатора является $K \geq 10$.

Таким образом, за наименьшую длительность цикла импульсного напряжения исходя из всех условий ее ограничения необходимо принять $K=10$, т.е. 0,2 сек., что допустимо по условию обеспечения электробезопасности защитой от утечек тока.

Расчетные соотношения между токами и напряжениями преобразователя и питающего трансформатора при наименьшей (граничной) длительности цикла импульсного напряжения 0,2 сек ($K=10$) сведены в таблицу.

Соотношения напряжений и токов преобразователя ВТП-500-275-У5

Выпрямленные напряжения и ток преобр.		Распределение токов в вентилях преобразователя			Действующее значение токов в вентилях преобразователя			Действующее значение токов вторичной обмотки трансформатора	
$U_d =$	$I_d =$	I_{V1}	$I_{V2} = I_{V3} = I_{V4}$	$I_{V5} = I_{V6}$	I_{V1}	$I_{V2} = I_{V3} = I_{V4}$	$I_{V5} = I_{V6}$	I_a	$I_B = I_C$
$U_{\phi X}$ 0,223	I_{mX} 0,931	I_m 0,334	I_m 0,287	I_m 0,31					
		I_d 0,368	I_d 0,316	I_d 0,342	I_d 0,618	I_d 0,598	I_d 0,593	I_d 0,845	I_d 0,834

Продолжение

Постоянные составляющие токов вторичной обмотки трансформатора		Действующие значения токов первичной обмотки трансформатора		Мощность первичной обмотки трансформатора	Мощность вторичной обмотки трансформатора	Типовая мощность трансформатора $S=0,5(SHS_2)$
$I'_a =$	$I'_e = I'_c =$	I_A	$I_B = I_C =$	$S_1 = U_{\phi X}$ $I_m \cdot 1,546$	$S_2 = U_{\phi X}$ $I_m \cdot 1,333$	$S = U_{\phi X}$ $I_m \cdot 1,94$
I_d 0,053	I_d 0,026	I_d 0,786	I_d 0,83			

Выводы

1. Получены зависимости параметров схемы рудничного тягового преобразователя переменного тока в постоянный прерывистый для защиты от утечек тока контактной сети с разделением силового и оперативного токов от длительности цикла импульсного напряжения.

2. За критерий оценки принято соответствие параметров преобразователя импульсного напряжения параметрам трехфазного выпрямителя с нулевой точкой и установлено, что оно наступает практически в пределах допустимых погрешностей при длительности цикла импульсного напряжения 0,2 с. и более.

3. Приведены все расчетные соотношения токов, напряжений и мощностей для выпрямителя и питающего трансформатора при длительности цикла импульсного напряжения 0,2 с., реализованной в тяговом преобразователе ВТПЕ-500-275-У5.

Список литературы

1. Электробезопасность рудничной откатки / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, А.Г. Ликаренко, А.Г. Животовский. – 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.