

Н. Г. ВИСИН, Б. Т. ВЛАСЕНКО, Д. Г. БИЛЫЙ (ДИИТ)

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ СТУПЕНЧАТОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА И РЕОСТАТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДАХ ЭР9Т И ЕПЛ9Т

Розглянуто перехідні процеси в силовому колі тягових двигунів і їх вплив на роботу ступеневого автоматичного пуску електропоїздів ЕР9Т і ЕПЛ9Т. Даються рекомендації щодо підвищення надійності роботи моторвагонного рухомого складу.

*Ключові слова:* електропоїзд, моторвагонний рухомий склад, силове коло тягових двигунів, система ступеневого автоматичного пуску та реостатного гальмування

Рассмотрены переходные процессы в силовой цепи тяговых двигателей и их влияние на работу ступенчатого автоматического пуска электропоездов ЭР9Т и ЕПЛ9Т. Даются рекомендации по повышению надежности моторвагонного подвижного состава.

*Ключевые слова:* электропоезд, моторвагонный подвижной состав, система ступенчатого автоматического пуска и реостатного торможения

The article examines transitional processes in the power circuit of tractive motors and their influence on the work of stepped automatic starting of electric trains ER9T and EPL9T. The recommendations for increasing the reliability of operation of multiple-unit rolling stock are proposed.

*Keywords:* electric train, multiple-unit rolling stock, system of stepped automatic starting and rheostat braking

На железных дорогах Украины длительное время эксплуатируются электропоезда переменного тока ЭР9Т. В последнее время холдинговая компания «Лугансктепловоз» выпускает электропоезда переменного тока ЕПЛ9Т для железных дорог Украины. На этих электропоездах применено ступенчатое автоматическое регулирование напряжения на тяговых двигателях от вторичной обмотки трансформатора с помощью вентильных пробок.

Переход с одной позиции на другую осуществляется силовым контроллером 1КС-006 приводом Л. Н. Решетова под контролем блока регулятора ускорения – БРУ.

Однако в эксплуатации этих электропоездов, как на электропоездах ЭР2Т и ЕПЛ2Т, имеет место нефиксация («проскоки») позиций вала силового контроллера и, как следствие, приводит к срабатыванию защиты тяговых двигателей, буксованию колесных пар моторных вагонов и возникновению продольных динамических ударов в автосцепках электропоезда ЭР9Т.

Для выявления причин и устранения вышеуказанных недостатков произведено в работе исследование переходных процессов.

### 1. Расчет переходных процессов в БРУ при переходе силового контроллера 1КС006(КСП) на очередные позиции

Для включения тиристора  $VS1$  или  $VS2$  (рис. 1) в зависимости от позиций перехода силового контроллера КСП на следующую, конденсатор  $C1$  всегда заряжен на суммарное напряжение от величины датчика тока тяговых двигателей и блока пониженных уставок. При достижении тока в цепи тяговых двигателей тока уставки блока реле ускорения БРУ, это напряжение равно  $U_{C16} = 16$  В и называется напряжением переключения. При этом поступает импульс напряжения на общий вход тиристорного триггера БРУ и включается тиристор, например  $VS1$ . Создается цепь обратной связи  $[+24В - C1 - R1 - V1 - C2...C5 - VS1 - (-)]$ . С этого момента времени начинается переходной процесс в данной цепи и для исследования представляет особый интерес характера изменения напряжения  $U_{C1}(t)$  при токе уставки  $I_{py} = 350$  А. Расчетная схема переходного процесса приведена на рис. 2.

Запишем баланс токов по первому закону Кирхгофа:

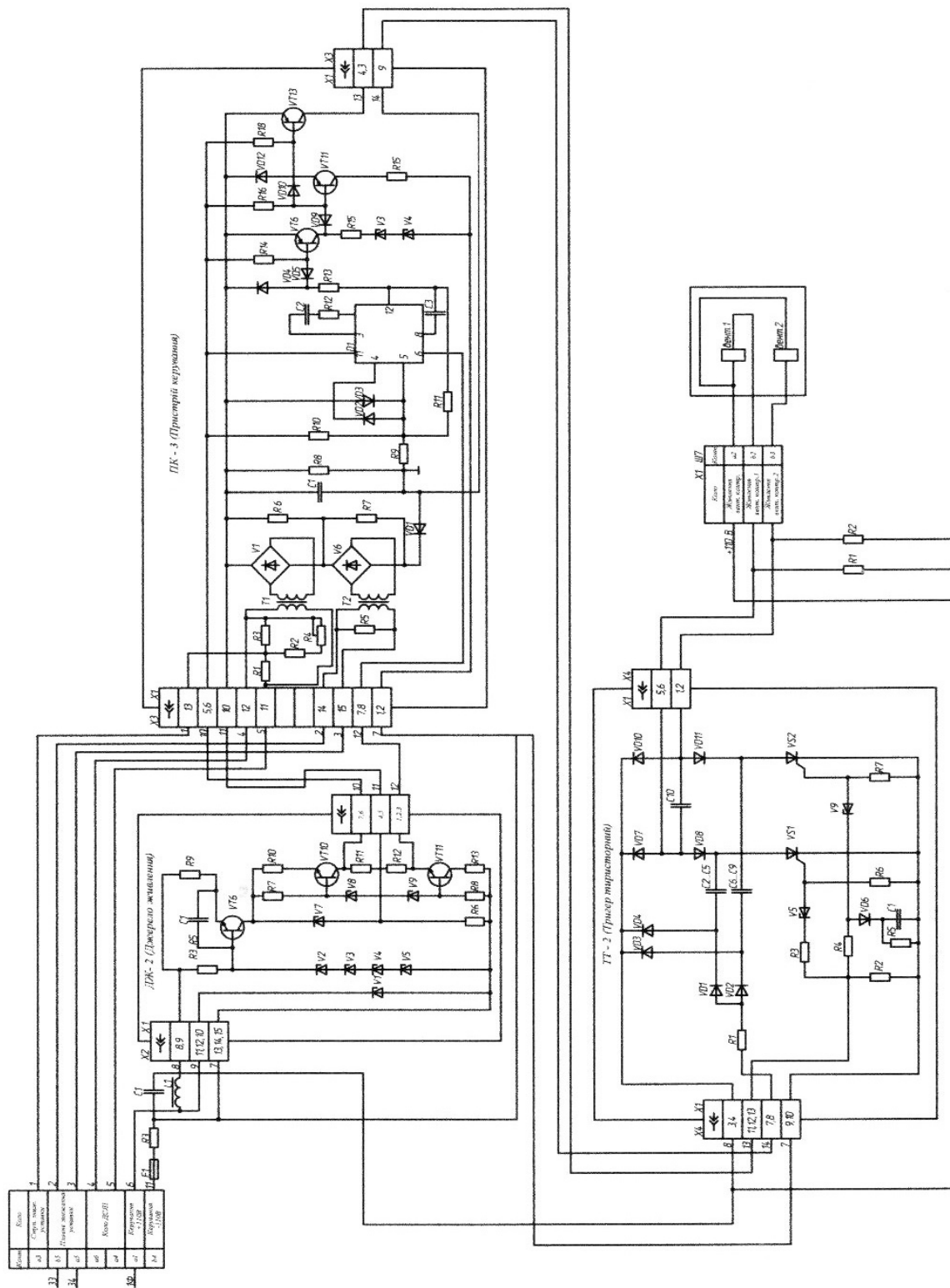


Рис. 1. Схема реле ускорення

$$i_{C2-5}(t) = i_{C1}(t) + i_{R8}(t); \quad (1.1)$$

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt}; \quad (1.2)$$

$$i_{C2-5}(t) = C_{C2-5} \frac{dU_{C2-5}}{dt}; \quad (1.3)$$

$$i_{R8}(t) = \frac{U_{C1}(t)}{R8}. \quad (1.4)$$

Подставляя значения токов в уравнение (1.1), получим

$$\frac{U_{C1}}{R8} + C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} = C_{C2-5} \frac{dU_{C2-5}}{dt}; \quad (1.5)$$

$$U_{C2-5}(t) = 24 - U_{C1}(t); \quad (1.6)$$

$$\frac{dU_{C2-5}}{dt} = - \frac{dU_{C1}}{dt}. \quad (1.7)$$

Подставляя значение  $\frac{dU_{C2-5}}{dt}$ , получим

$$\frac{U_{C1}}{R8} + C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} = -C_{C2-5} \frac{dU_{C1}}{dt}. \quad (1.8)$$

Или подставляя данные

$$\frac{U_{C1}}{R8} + 10^{-6} \frac{dU_{C1}}{dt} = -4 \cdot 10^{-6} \frac{dU_{C1}}{dt}; \quad (1.9)$$

$$\frac{U_{C1}}{R8} + 5 \cdot 10^{-6} \frac{dU_{C1}}{dt} = 0; \quad (1.10)$$

$$\frac{dU_{C1}}{dt} + P \cdot U_{C1} = 0, \quad (1.11)$$

где

$$P = \frac{1}{5 \cdot R8 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{5 \cdot 620 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 0,32 \frac{1}{c} \quad (1.12)$$

при  $R8 = 620 \text{ кОм}$  в существующем БРУ.

Решение уравнения (1.11)

$$\begin{aligned} \ln U_{C1}(t) &= \ln U_{C1}(t) - \ln U_{C1}(0) = \\ &= \ln \frac{U_{C1}(t)}{U_{C1}(0)} = -P \cdot t; \end{aligned} \quad (1.13)$$

$$U_{C1}(t) = U_{C1}(0) e^{-Pt} = U_{C1}(0) e^{-0,32t} = 19,2. \quad (1.14)$$

Переходной процесс разряда конденсатора  $C1$  будет происходить по зависимости

$$U_{C1}(t) = 19,2 \cdot e^{-0,32t}; \quad (1.15)$$

Необходимо определить время разряда  $C1$  с напряжения  $19,2 \text{ В}$ , до напряжения переключения  $16 \text{ В}$ , т.е. найти соотношение

$$16 = 19,2 \cdot e^{-0,32t} \quad \text{при } t = 0,5 \text{ с.}$$

Т.к. величина напряжения переключения силового контроллера не зависит от тока уставки БРУ и всегда равно  $16 \text{ В}$ , то время разряда конденсатора  $C1$  зависит от величины напряжения источника питания  $U_{\text{ип}}$  и согласно допускам завода-изготовителя он может изменяться в пределах  $\pm 10 \%$ . При уменьшении напряжения на  $5 \%$  будем иметь следующие соотношения:

$$0,95 \cdot 19,2 e^{-0,32t} = 16 \quad \text{при } t = 0,4 \text{ с,}$$

что недопустимо, т.к. может вызвать проскакивание позиций КСП.

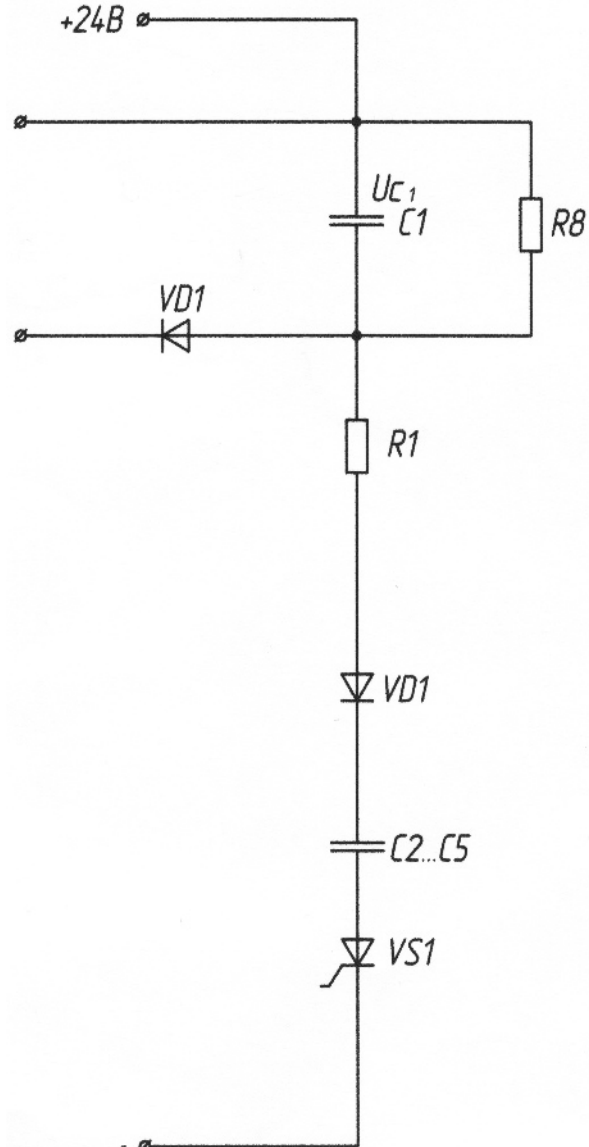


Рис. 2. Переходные процессы в БРУ

Поэтому необходимо изменить сопротивление резистора  $R8$  с 620 кОм до 800 кОм, тогда

$$P = \frac{1}{5 \cdot R8 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{5 \cdot 800 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 0,25 \frac{1}{\text{с}}.$$

Переходной процесс разряда конденсатора  $C1$  будет происходить по зависимости

$$u_c(t) = 0,95 \cdot 19,2 \cdot e^{-0,25t} = 16 \quad \text{при } t = 0,5 \text{ с.}$$

При уменьшении напряжения источника на 10 %, т.е.  $U_{\text{ип}} = 0,9 \cdot 24 = 21,6$  В, будет иметь место соотношение

$$e^{-0,25t} = \frac{16}{0,9 \cdot 19,2} = 0,92 \quad \text{при } t = 0,3 \text{ с,}$$

что нежелательно, т.к. может произойти «проскок» позиций КСП.

Поэтому необходимо установить допуск на изменение напряжения источника питания конденсатора  $C1 \pm 5$  %.

При  $U_{\text{ип}} = 24$  В,  $t_{\text{разр}} = 0,7$  с.

При  $U_{\text{ип}} = 0,95 \cdot 24 \text{ В} = 22 \text{ В}$ ,  $t_{\text{разр}} = 0,5$  с, что вытекает из уравнения

$$u_c(t) = 0,95 \cdot 19,2 \cdot e^{-0,25t} = 16.$$

Из расчета следует, что время разряда конденсатора  $C1$  с напряжения 20 В до напряжения 16 В происходит за  $t > 0,45$  с при  $R8=800$  кОм, т.е. равно времени полного поворота КСП на очередную позицию.

При таком соотношении времени всегда будет обеспечена надежная фиксация всех позиций КСП под контролем БРУ и, следовательно, надежная работа системы ступенчатого автоматического пуска на электропоездах переменного тока, если ток в силовой цепи тяговых двигателей возрастет больше тока уставки БРУ.

Следует заметить, что к моменту действия обратной связи конденсаторы  $C_{2-5}$  должны быть разряжены.

Определим время разряда конденсатора  $C10$  при подаче импульса напряжения на общий вход, когда  $VS1$  был открыт, и  $VS2$  начнет открываться.

Конденсатор  $C10$  был заряжен до напряжения  $U_{C10(0)} = 110$  В, а его разряд произойдет по зависимости

$$U_{C10}(t) = U_{C10(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T}} = 110 \cdot e^{-\frac{t}{T}} = 0,$$

$T$  – постоянная времени разряда конденсатора  $C10$ ;

$$T = R1 \cdot C10 = 33 \cdot 10^{-6} = 0,033 \cdot 10^{-3} \text{ с,}$$

где  $C10 = 1$  мкФ,  $R1 = 33$  Ом.

Время разряда произойдет за время

$$t_{\text{разр}} = 5T = 5 \cdot 0,033 \cdot 10^{-3} = 0,16 \cdot 10^{-3} = 160 \text{ мкс,}$$

т.е. больше 100 мкс, и поэтому тиристор  $VS1$  будет надежно закрыт и двойное питание катушек РК1 и РК2 электропневматического привода Решетова будет исключено.

Определим время задержки на включение тиристора  $VS2$  по сравнению с включением тиристора  $VS1$  при подаче импульса напряжения на общий вход тиристорного триггера ТТ  $C1 = 22$  мкФ,  $R4 = 100$  Ом,  $U = 27$  В. Заряд конденсатора  $C1$  происходит по зависимости:

$$U_{C1} = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (1.16)$$

где  $T = R4 \cdot C1 = 100 \cdot 22 \cdot 10^{-6} = 0,002$  с.

$$U_{C1} = 27 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,002}}\right) = 27 \cdot (1 - e^{-500t}). \quad (1.17)$$

Заряд конденсатора  $U_{C1}$  должен произойти до момента включения  $VS2$  при  $U_{C1} = 13,5$  В.

$$\text{Тогда } U_{C1} = 27 \cdot (1 - e^{-500t}) = 13,5 \text{ В.}$$

Отсюда  $t = 0,0014$  с = 1400 мкс = 1,4 мс.

Поэтому конденсатор  $C1$  в плате ИП блока БРУ должен зарядиться при включении тиристора  $VS1$  за время меньше 1 мс, что допускается.

## 2. Принятые допущения и расчет переходных процессов в однофазной схеме выпрямления электропоезда переменного тока ЭР9Т

Регулирование напряжения на электропоездах переменного тока осуществляется на вторичной стороне трансформатора, при этом используется несимметричное изменение выпрямленного напряжения по полупериодах с применением вентильного перехода (рис. 3) [2].

Рассмотрение такой схемы ставит очень сложную аналитическую задачу, решение которой связано с большим объемом расчетной работы. Для уменьшения расчетов принимаем ряд допущений, которые в связи с коротким периодом работы схем, рассматриваемых на позициях регулирования, мало влияют на определенные тяговые и энергетические характеристики подвижного состава, но значительно упрощают расчеты переходных процессов.

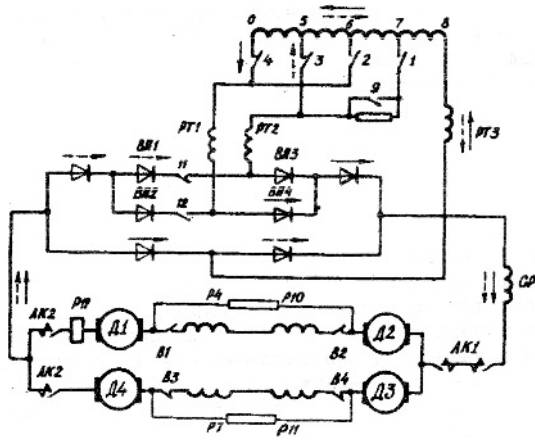


Рис. 3. Несимметричное изменение выпрямленного напряжения по полупериодам с применением вентильного перехода

Принимаем такие допущения:

1.1. Ток намагничивания трансформатора равен нулю.

1.2. В секциях вторичной обмотки тягового трансформатора индуцируются синусоидальные ЭДС.

1.3. Обратный ток полупроводниковых элементов равен нулю и прямое падение напряжения не зависит от величины выпрямленного тока.

1.4. Прямое падение напряжения для всех выпрямляющих элементов одинаковое.

1.5. Во время протекания электромагнитных переходных процессов скорость подвижного состава является постоянной величиной.

1.6. Сглаживающий реактор имеет достаточную индуктивность для обеспечения непрерывного выпрямленного тока в цепи нагрузок.

1.7. Кривые намагничивания тяговых двигателей и сглаживающего реактора, в рассматриваемых пределах пульсации и изменений мгновенных значений выпрямленного тока, в общем случае могут быть линеаризованы.

Расчетная схема однофазного выпрямления при регулировании скорости путем последовательного соединения вторичной обмотки трансформатора изображена на рис. 4.

Согласно принятым предположениям цепь выпрямленного тока в расчетной схеме можно представить составлением из следующих элементов:

1.8. ПротивоЭДС постоянной величины.

1.9. Эквивалентного сопротивления, составленного из активного сопротивления цепи выпрямленного тока и составляющей, учитывающей зависимость против ЭДС тяговых двигателей от выпрямленного тока.

1.10. Эквивалентного сопротивления, составленного из индуктивного сопротивления тяговых двигателей и сглаживающего реактора.

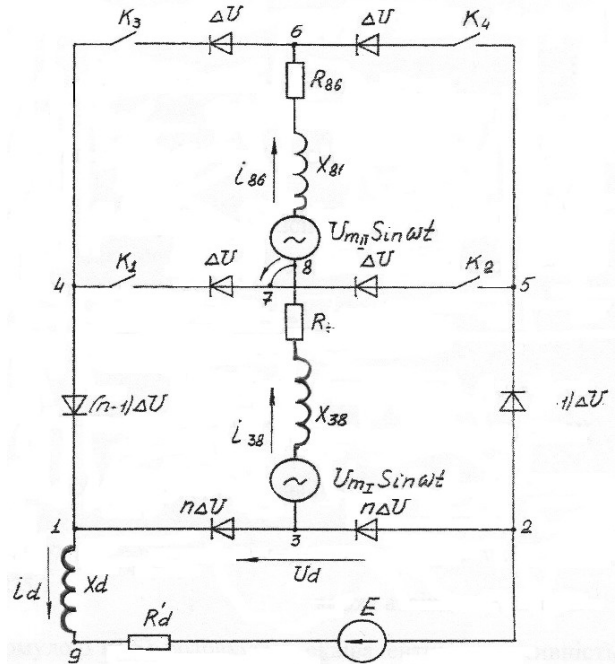


Рис. 4. Схема однофазного выпрямления при регулировании скорости путем последовательного соединения вторичной обмотки трансформатора

Каждую секцию вторичной обмотки трансформатора при упомянутых допущениях в расчетной схеме можно представить как сложенную из следующего:

- эквивалентного источника синусоидальной ЭДС;
- активного сопротивления данной секции;
- эквивалентного индуктивного сопротивления, обусловленного собственными взаимными потоками рассеяния обмоток трансформатора.

Согласно работе [3], уравнение выпрямленного тока равно

$$i_{\alpha\alpha} = \frac{U_m}{z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{E'}{R} + \left[ 2I_\alpha - \frac{U_m}{z} \sin(\omega t - \varphi) + \frac{E'}{R} \right] \cdot e^{-\frac{R(\omega t - \alpha)}{X}} \quad (2.1)$$

В режиме коммутации K1 выпрямленный ток равен

$$i_\alpha = \left[ 2I_\alpha + \frac{E'}{R} \right] \cdot e^{-\frac{R_\alpha(\omega t - \pi)}{X_\alpha}} - \frac{E'}{R_\alpha}$$

В режиме выпрямления, B1

$$i_\alpha = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{E'}{R} + \left[ 2I_\alpha - \frac{U_m}{z} \sin(\alpha - \varphi) + \frac{E'}{R} \right] \cdot e^{-\frac{R(\omega t - \alpha)}{X}} \quad (2.2)$$

где  $U_m$  – амплитуда синусоидального напряжения, В;

$Z$  – полное сопротивление цепи, Ом;

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (2.3)$$

$$R = R_\alpha + cVK; \quad (2.4)$$

$R_\alpha = R_{тр} + R_{тд} + R_{ср} + R_{тор}$  – суммарное активное сопротивление цепи;

$R_{тр}$  – активное сопротивление регулируемой секции вторичной обмотки трансформатора;

$R_{тд} = 0,27$  Ом – активное сопротивление тягового двигателя;

$R_{ср} = 0,0347$  Ом – активное сопротивление сглаживающего реактора;

$R_{тор} = 0,0038$  Ом – активное сопротивление токоограничивающего реактора;

$V$  – скорость движения, км/ч;

$X$  – суммарное индуктивное сопротивление цепи;

$$X = X_{тор} + X_{тд} - X_{ср} + (X_{тр} + X'_{кс}), \quad (2.5)$$

$X'_{кс}$  – индуктивное сопротивление контактной сети;

Остальные обозначения при  $X$  аналогичны обозначениям при  $R$ .

$$E' = c\Phi_0 V + 2n \cdot \Delta U, \quad (2.6)$$

$E'$  – постоянная составляющая противо-ЭДС тягового двигателя;

$n$  – число последовательно включенных вентилялей в плече;

$\Delta U$  – прямое падение напряжения на вентиле;

$\alpha$  – угол до начала переходного режима;

$I_2 = I_d$  – ток цепи в момент включения очередной секции трансформатора [1].

Основная задача при анализе переходных процессов в данной схеме является определения средних значений тока в цепи выпрямленного тока за время совместного действия напряжения конденсатора  $u_{C1}(t)$  и напряжения от датчика тока при переходе силового контроллера на очередные позиции. При этом переход может происходить как при симметричной схеме выпрямления напряжения, так и при несимметричной схеме выпрямления напряжения рис. 5. Время это пропорционально  $\pi$  или  $1,5\pi$ , т.е. 0,01 или 0,015 с. Переходные процессы нарастания тока рассмотрены на всех 16 позициях и установлено, что за указанное время переходного процесса ток в силовой цепи тяговых двигателей на позициях 5, 6, 7, 9, 11, 13 не достигнет величины уставки блока реле ускорения и поэтому главный контроллер 1КС-006 безостановочно «проскакивает» эти позиции, что приводит к буксованию колесных пар, срабатыванию защитных реле перегрузок, а иногда и к круговым огням на коллекторах тяговых двигателей.

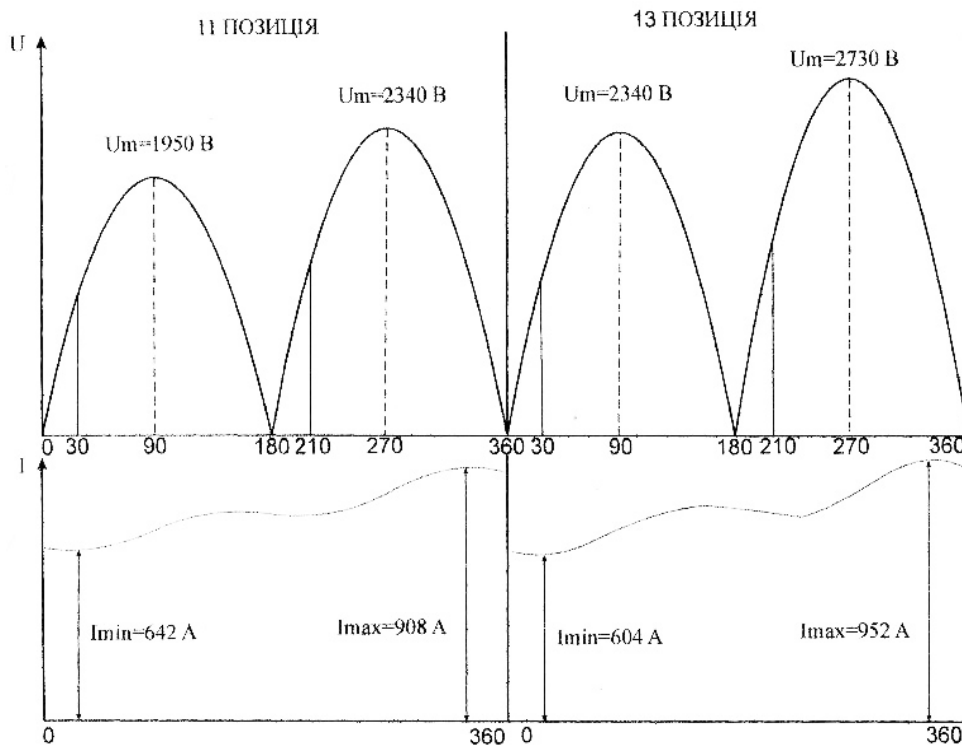


Рис. 5. Несимметричная схема выпрямления напряжения

### Выводы

В устройстве узла управления БРУ предлагается изменить величину сопротивления  $R8$  с 620 кОм на 800 кОм, а время свободного вращения силового контроллера 1КС-006 регулировать на 10 с.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Висин, Н. Г. Повышение надежности работы системы ступенчатого автоматического пуска на электропоездах ЭР2Р, ЭР2Т и ЭПЛ2Т [Текст] / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, А. А. Соколов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2005. – С. 41-46.

2. Цукало, П. В. Эксплуатация электропоездов [Текст] : справ. / П. В. Цукало, Б. К. Просвирин. – М.: Транспорт, 1994. – 383 с.
3. Бирзниец, Л. В. Переходные и установившиеся электромагнитные процессы при ступенчатом регулировании выпрямленного напряжения в режимах пуска электроподвижного состава с полупроводниковыми выпрямителями [Текст] / Л. В. Бирзниец // В сб. «Полупроводники и их применение в электротехнике». – Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1962.

Поступила в редколлегию 09.06.2010.

Принята к печати 17.06.2010.