

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТУПЕНЧАТОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДАХ ЭР2Р, ЭР2Т И ЕПЛ2Т

Розглянуто перехідні процеси в силовому колі тягових двигунів і їх вплив на роботу ступеневого автоматичного пуску електропоїздів ER2R, ER2T і EPL2T. Даються рекомендації щодо підвищення надійності роботи мотор-вагонного рухомого складу.

Рассмотрены переходные процессы в силовой цепи тяговых двигателей и их влияние на работу ступенчатого автоматического пуска электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т и ЕПЛ2Т. Даются рекомендации по повышению надежности работы мотор-вагонного подвижного состава.

The article examines transitional processes in the power circuit of tractive motors and their influence on the work of grading automatic starting of EMU trains ER2R, ER2T and EPL2T. Recommendations have been developed for increasing reliability of operations of multiple-unit rolling stock.

Расчет переходных процессов в силовой цепи тягового двигателя и их влияние на автоматический пуск ЭР2Т.

На электропоездах постоянного тока ЭР1, ЭР2, ЭР2Т, ЭР2Р, ЕПЛ2Т применяется ступенчатый автоматический реостатный пуск посредством силового контроллера КСП и под контролем контактного реле ускорения (РУ) или бесконтактного реле ускорения (БРУ) совместно с бесконтактным переключателем вентилей. В работах [1] установлено, что при замыкании контакта РУ (БРУ) при токе уставки  $I = I_{p,y}$  в силовой цепи тяговых двигателей получает питание вентиль КСП и при повороте его на  $14^\circ$  за время  $0,3 \dots 0,4$  с, замыкается силовой контактор. При этом происходит вывод ступени пускового реостата и возрастание тока в силовой цепи тяговых двигателей. За время поворота КСП, из-за значительного ускорения  $0,6 \dots 0,72$  м/с<sup>2</sup>, происходит приращение скорости  $\Delta V$ , а следовательно, и противо ЭДС в тяговых двигателях, что и приведет к уменьшению тока в их цепи. Величина тока  $I_2$  согласно [1] определяется по следующей формуле:

$$I_2 = \frac{I_{p,y} + K_3}{e^{\left(\frac{t_\pi m K_1}{\sigma K_2}\right)}} - K_3, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент, характеризующий линеаризацию силы тяги на данном интервале изменения тока

$$K_1 = \frac{F_{I_{p,y}} - F_{I_2}}{I_{p,y} - I_2}, \frac{H}{A}, \quad (2)$$

где  $F_{I_{p,y}}$  – сила тяги одного тягового двигателя при  $I = I_{p,y}$ ;  $F_{I_2}$  – сила тяги одного тягового двигателя при  $I = I_2$ ;  $K_2$  – коэффициент, характеризующий линеаризацию скорости  $V_{I_{p,y}} \dots V_{I_2}$

$$K_2 = \frac{V_{I_{p,y}} - V_{I_2}}{I_{p,y} - I_2}, \frac{M}{C \cdot A}, \quad (3)$$

где  $V_2 = V_{I_2}$  – скорость при токе  $I_2$  на данной реостатной позиции  $\frac{M}{C}$ ;  $V_{I_{p,y}}$  – скорость при токе  $I_{p,y}$  на данной реостатной позиции  $\frac{M}{C}$ .

$$\sigma = m_{пр} = 10^3 Q(1 + \gamma), \quad (4)$$

где  $m_{пр}$  – приведенная масса электропоезда(кг);  $\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся масс 0,06;  $t_{поз}$  – время поворота вала КСП на угол, при котором замкнется очередной силовой контактор и выведет часть пускового резистора (0,3...0,4 с).

$$K_3 = \frac{F_H - \frac{W}{n_{дв}}}{K_1} A, \quad (5)$$

где  $n_{дв}$  – количество двигателей в электропоезде;  $W$  – общее сопротивление движения поезда при данной скорости (Н)

$$W = \omega_0 Qg, \quad (6)$$

где  $\omega_0$  – основное удельное сопротивление движения поезда (кг/Т)

$$\omega_0 = 1,1 \cdot 0,012 - V_{I_2} + 0,000267V_{I_2}^2; \quad (7)$$

$Q$  – вес десяти вагонов поезда, равный 575 т.

Как показали расчеты при времени поворота КСП на очередную позицию на электропоездах ЭР2Т  $t_{\text{поз}} = 0,4$  с, ток в силовой цепи тяговых двигателей уменьшается по сравнению с током установки реле ускорения при движении на площадке на 10...8 %. Поэтому можно принять для расчета

$$I_2 = I_0 = 0,92I_{\text{p.y}}, \quad (8)$$

где  $I_0$  – ток начала переходного процесса.

При повороте КСП на очередную позицию и замыкании очередного контактора уменьшается сопротивление в цепи тяговых двигателей и ток в их цепи возрастает по зависимости

$$I(t) = I_{\text{y.ct}} - (I_{\text{y.ct}} - I_2)e^{-\frac{t}{T_{\text{дв}}}}, \quad (9)$$

где

$$I_{\text{y.ct}} = \frac{\left(\frac{U_{\text{kc}}}{4} - C\phi_{\text{H44}}V_2\right)}{\left(\frac{R_{\text{p}}}{4} + R_{\text{дв}} + K_{\phi} \cdot V_2\right)}, \quad (10)$$

где  $U_{\text{kc}}$  – напряжение в контактной сети 3000 В;

$$T_{\text{дв}} = \frac{L_{\text{дв}}}{\left(\frac{R_{\text{p}}}{4} + R_{\text{дв}} + K_{\phi}V_2\right)}, \quad (11)$$

где  $L_{\text{дв}}$  – индуктивность тягового двигателя в Гн.,  $R_{\text{p}(n+1)}$  – сопротивление реостата при переходе КСП с позиции « $n$ » на позицию « $n+1$ », Ом;  $V_2$  – скорость при токе  $I_2 + I_0$ , м/с;  $R_{\text{дв}}$  – сопротивление тягового двигателя, Ом;  $K_{\phi}$  – коэффициент, характеризующий линеаризацию кривой намагничивания при изменении тока с  $I_{\text{p.y}}$  до тока  $I_2$

$$K_{\phi} = \frac{C\phi_{I_{\text{p.y}}} - C\phi_{I_2}}{I_{\text{p.y}} - I_2}, \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{М} \cdot \text{А}}. \quad (12)$$

Величина магнитного потока, в результате его линеаризации и при токе  $I = 0$  определяется по формуле

$$C\phi_{\text{нач}} = C\phi_{I_{\text{p.y}}} - K_{\phi}I_{\text{p.y}}. \quad (13)$$

Для устранения проскакивания позиций силовым контроллером во время пуска необходимо, чтобы ток в силовой цепи тяговых двигателей за время совместного действия силовой

и подъемной катушек  $t_{\text{сов}}$  на электропоездах ЭР1, ЭР2Т превышал ток уставки РУ на 2 %, т. е. равен  $I = 1,02I_{\text{p.y}}$ .

На электропоездах ЭР2Р и ЭР2Т для фиксации позиций КСП необходимо, чтобы в БРУ импульс напряжения, поступающий на общий вход тиристорного триггера поступал позже, чем разрядится конденсатор  $C_i$  на время, пока ток в силовой цепи тяговых двигателей не превысит тока уставки БРУ. В противном случае произойдет проскакивание позиций КСП, что может вызвать буксование колесных пар, а иногда и к круговому огню на коллекторах тяговых двигателей.

Произведем расчет переходных процессов в силовой цепи тяговых двигателей на электропоезде ЭР2Т при ступенчатом реостатном автоматическом пуске.

Рассмотрим переходные процессы в цепи тяговых двигателей при самых ненадежных переходах КСП с 12-й на 13-ю позицию.

Рассмотрим расчет переходных процессов в силовой цепи тяговых двигателей при переходе КСП с 12-й на 13-ю позицию.

Для тока РУ равного  $I_{\text{p.y}} = 350$  А, зададимся начальным уменьшением тока  $I_2$  (А)

$$I_2 = 0,92I_{\text{p.y}} = 0,92 \cdot 350 = 322.$$

Определим коэффициент, характеризующий линеаризацию силы тяги на данном интервале изменения тока [2]

$$K_2 = \frac{F_{I_{\text{p.y}}} - V_{I_2}}{I_{\text{p.y}} - I_2} = \frac{27132 - 24355}{350 - 322} = 99,2 \frac{\text{Н}}{\text{А}},$$

где сила тяги при полученных токах и магнитный поток равны:

$$F_{I_{\text{p.y}}} = 3,42C\phi_{I_{\text{p.y}}} I_{\text{p.y}} = 3,42 \cdot 22,7 \cdot 350 = 27132 \text{ Н},$$

$$F_{I_2} = 3,42C\phi_{I_2} I_2 = 3,42 \cdot 22,1 \cdot 322 = 24355 \text{ Н},$$

$$C\phi_{I_{\text{p.y}}} = \frac{\frac{U_{\text{kc}}}{4} - I_{\text{p.y}}R_{\text{дв}}}{V_{I_{\text{p.y}}}} = \frac{\frac{3000}{4} - 350 \cdot 0,2}{30} = 22,7 \text{ В} \cdot \text{ч/км},$$

$$C\phi_{I_2} = \frac{\frac{U_{\text{kc}}}{4} - I_2R_{\text{дв}}}{V_{I_2}} = \frac{\frac{3000}{4} - 322 \cdot 0,2}{31} = 22,1 \text{ В} \cdot \text{ч/км}.$$

Определим коэффициент, характеризующий линеаризацию от скорости равной  $V_{I_{\text{p.y}}} \dots V_{I_2}$ :

$$K_2 = \frac{V_{I_{\text{p.y}}} - V_{I_2}}{I_{\text{p.y}} - I_2} = \frac{8,2 - 7,9}{350 - 322} = 0,011 \frac{\text{М}}{\text{А} \cdot \text{с}},$$

где

$$V_{I_{p.y}} = \frac{\frac{U_{kc}}{4} - \left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв}\right) I_{PV}}{3,6 C \phi_{I_{p.y}}} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{4} - \left(\frac{0,45}{4} + 0,2\right) 350}{3,6 \cdot 22,7} = 7,9 \frac{\text{М}}{\text{С}},$$

$$V_{I_2} = \frac{\frac{U_{kc}}{4} - \left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв}\right) I_2}{3,6 \cdot C \phi_{I_2}} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{4} - \left(\frac{0,45}{4} + 0,2\right) 322}{3,6 \cdot 22,1} = 8,2 \frac{\text{М}}{\text{С}}.$$

Определим коэффициент  $K_3$ :

$$K_3 = \frac{F_H - \frac{W}{n_{дв}}}{K_1} = \frac{-7578 - \frac{9751}{20}}{99,2} = -61,3 \text{ А},$$

где

$$F_H = F_{I_{p.y}} - K_I I_{p.y} = 27132 - 99,2 \cdot 350 = -7578 \text{ Н},$$

$$W = \omega_0 Q g = 1,673 \cdot 575 \cdot 9,81 = 9751 \text{ Н}.$$

Расчет уменьшения тока от  $I = I_{p.y}$  до значения тока  $I_2$  за время поворота силового контроллера до момента замыкания контакторного элемента.

При переходе силового контроллера с одной позиции на другую, когда замыкается следующий контакторный элемент, выводится ступень  $\Delta R$  пускового реостата, ток в силовой цепи возрастает не при токе  $I_{\min}$ , а при токе  $I_2$  до установившегося значения.

Числовое значение  $I_2$  находим по формуле

$$I_2 = \frac{I_{p.y} + K_3}{e^{\left(\frac{t_n m K_1}{\sigma K_2}\right)}} - K_3 =$$

$$= \frac{350 + (-81,3)}{e^{\left(\frac{0,4 \cdot 20 \cdot 99,2}{6,1 \cdot 10^5 \cdot 0,011}\right)}} - (-81,3) = 319,8 \text{ А}.$$

Расчет углового коэффициента линеаризованной функции производим по формуле

$$K_\phi = \frac{C \phi_{I_{p.y}} - C \phi_{I_2}}{I_{p.y} - I_2} = \frac{22,7 - 22,1}{350 - 322} = 0,02.$$

Произведем расчет переходного процесса при переходе силового контроллера с 11-й на 12-ю позицию. Определим постоянную времени по формуле:

$$T_{дв} = \frac{L_{дв}}{\left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв} + K_\phi V_2\right)} =$$

$$= \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{0,45}{4} + 0,2 + 0,02 \cdot 31\right)} = 0,022 \text{ с}.$$

Произведем расчет установившегося значения тока  $I_{уст}$

$$I_{уст} = \frac{\frac{U_{kc}}{4} - C \phi_{H44} V_{I_2}}{\left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв} + K_\phi V_{I_2}\right)} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{4} - 13,41 \cdot 31}{\left(\frac{0,45}{4} + 0,2 + 0,02 \cdot 31\right)} = 362,3 \text{ А}.$$

Расчет переходного процесса рассчитываем за время  $t = 3\tau$  по формуле

$$I(t) = I_{уст} - (I_{уст} - I_2) e^{-\frac{t}{T}}.$$

Расчет произведем для времени равного

$$t = 0,01 \text{ с}, \quad t = 0,02 \text{ с}, \quad t = 0,05 \text{ с}:$$

$$I(0,01) = 362,3 - (362,3 - 322) e^{-\frac{0,01}{0,022}} = 345,4 \text{ А},$$

$$< 1,02 I_{p.y} = 375 \text{ А},$$

$$I(0,04) = 362,3 - (362,3 - 322) e^{-\frac{0,04}{0,022}} = 355,6 \text{ А},$$

$$I(0,05) = 362,3 - (362,3 - 322) e^{-\frac{0,05}{0,022}} = 358 \text{ А}.$$

По результатам проведенных расчетов видим, что на электропоездах серии ЭР2Т при ступенчатом автоматическом реостатном пуске наблюдается проскакивание позиций при переходе силового контроллера с 12-й на 13-ю позицию.

Рассмотрим работу бесконтактного реле ускорения (БРУ) и переходные процессы в силовой цепи тяговых двигателей для электропоезда ЭР2Т (рис.).

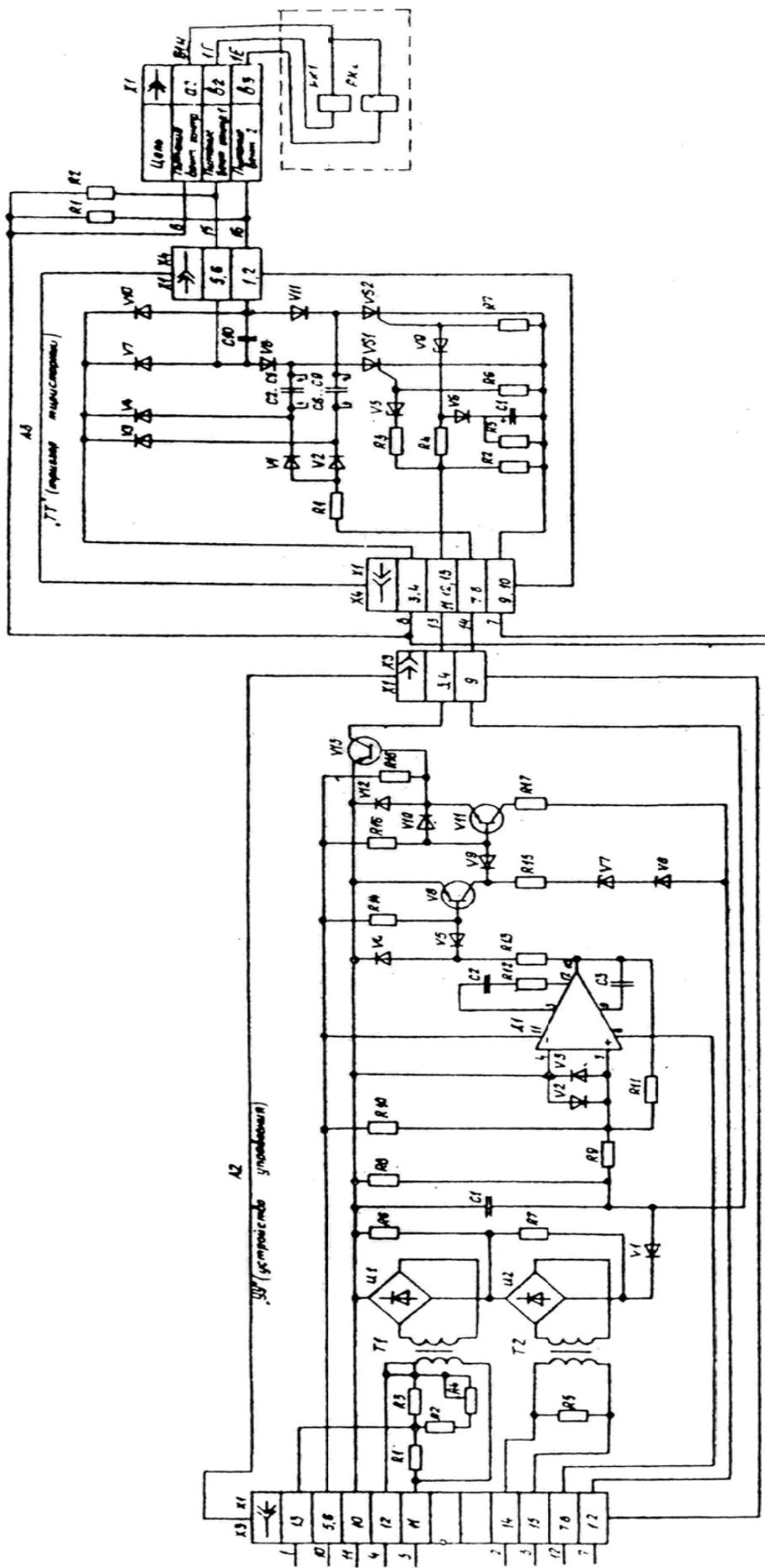


Рис. Схема бесконтактного ряда ускорения и переключения вентилялей

При применении БРУ, при значении тока в силовой цепи тяговых двигателей равный току уставки, например,  $I_{p.y} = 350$  А поступает импульс напряжения на общий вход тиристорного триггера и выключается тиристор  $VS_1$  или  $VS_2$  в зависимости от позиций перехода РССП. При включении, например,  $VS_1$  создается цепь обратной связи

$$\left[ +20B - C_1 - R_1 - V_1 - C_2 \dots C_5 - VS_1 - (-) \right]$$

и происходит зарядка конденсатора  $C_1$  с напряжения 16 В до напряжения 20 В.

Определим время зарядки конденсатора  $C_1$ . Уравнение переходного процесса:

$$u_{C1}(t) = u_{C1}(t)_{yct} + u_{C1}(t)_{CBob}, \quad (14)$$

$$u_{C1}(t)_{yct} = 20 \text{ В}$$

$$u_{C1}(t)_{CBob} = Ae^{-pt}, \quad (15)$$

где

$$p = \frac{1}{T}, \quad (16)$$

$$u_c(t) = 20 + Ae^{-pt} \quad (17)$$

при  $t = 0$ ,  $u_c(t) = 16$  В, подставляя в формулу (4) получим  $16 = 20 + A$ , тогда  $A = -4$ . Тогда функция  $u_c(t)$ , формула, примет вид

$$u_c(t) = 20 - 4e^{-pt}. \quad (18)$$

Найдем время зарядки конденсатора по формуле:

$$T = R_1 C_{\text{экв}}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{C_{\text{экв}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 \dots C_5} = \frac{1}{1} + \frac{1}{5,5} = \frac{6,5}{5,5} \text{ мкФ} \quad (20)$$

$$\frac{1}{C_{\text{экв}}} = 0,846 \text{ мкФ},$$

где  $C_1 = 1$ ,  $C_2 \dots C_5 = 5,5$  мкФ,  $R = 330$  Ом.

Время зарядки конденсатора и оператор «р» будут равны:

$$T = 33 \cdot 0,846 \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$p = \frac{1}{28 \cdot 10^{-6}} = 35714.$$

Тогда функция  $u_c(t)$ , формула (16), примет вид:

$$u_c(t) = 20 - 4e^{-35714t},$$

а это значит что заряд конденсатора происходит практически мгновенно и его учитывать не следует.

При этом произойдет, из-за действия обратной связи (см. рис.), снятие импульса напряжения с общего входа, и тиристор  $VS_2$ , из-за предусмотренной задержки на его включение, не включится. При заряде конденсатора  $C_2 \dots C_5$  почти мгновенно, и при наличии в его цепи диода  $V_1$ , начнется разряд конденсатора  $C_1$ , по следующей цепи  $\left[ +u_{C1} - R_8 - (-u_{C1}) \right]$  по зависимости:

$$u_c(t) = 20 - e^{-\frac{t}{T_{\text{разр}}}}, \quad (21)$$

где  $T_{\text{разр}}$  – постоянная времени разряда конденсатора  $C_1$ ;

$$T_{\text{разр}} = R_8 C_1 = 620 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,62 \text{ с}. \quad (22)$$

Время разряда конденсатора до напряжения 16 В определяется из соотношения (24):

$$u_{C1}(t) = 20e^{-1,6t} = 16 \text{ при } t = 0,14 \text{ с}. \quad (23)$$

При этом, из-за уменьшения тока в силовой цепи тяговых двигателей, напряжение с датчика тока уменьшится и напряжение на  $C_1$  будет меньше чем 20 В.

Определим превысит ли ток в цепи тяговых двигателей ток уставки БРУ к моменту, когда конденсатор  $C_1$  зарядится до 16 В, с тем, чтобы не поступал импульс напряжения вновь на общий вход тиристорного триггера и не получил питание тиристор  $VS_2$ , что привело бы к проскакиванию позиций КСП.

Как показали вышеприведенные расчеты ток в силовой цепи тяговых двигателей возрастает до тока уставки БРУ от значения  $I_2$  за время  $t_{\text{перех}} \geq 0,03$  с.

Таким образом, общее время от момента начала разрешения перехода КСП, до момента времени, когда ток в силовой цепи со значения  $I_2$  превысит ток установки БРУ  $I_{yct}$  составляет:

$$t = t_{\text{пов}} + t_{\text{перех}} = 0,4 + 0,03 = 0,45 \text{ с},$$

где  $t_{\text{пов}}$  – время, за которое вал КСП повернется на угол  $14^\circ$  и замкнет очередной контактор,

равное 0,4 с;  $t_{\text{перех}}$  – время за которое возрастет ток со значения  $I_2$  до значения  $1,02I_{\text{р.у}}$ .

Так как время разряда конденсатора  $C_1$  значительно меньше необходимого, то есть  $t_{C_1\text{раз}} = 0,14 < t = 0,45$  с, то при  $t = 0,14$  с, появится импульс напряжения на общий вход тиристорного триггера и произойдет проскакивание позиций КСП, что может вызвать боксование колесных пар, срабатывание защиты, а в некоторых случаях приведет к круговому огню на коллекторах тяговых двигателей.

Для того, чтобы конденсатор  $C_1$  разрядился за время  $t = 0,45$  с необходимо заменить сопротивление  $R_8 = 620$  кОм на сопротивление  $R_8 = 2000$  кОм.

Тогда разряд конденсатора  $C_1$  будет происходить по следующей зависимости:

$$u_{C_1}(t) = 20e^{-\frac{t}{T}} = 20e^{-\frac{t}{25}} = 16 \text{ В}, \quad (24)$$

где

$$T = R_8 \cdot C_1 = 2000 \cdot 103 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 2,5 \text{ с}. \quad (25)$$

Из расчета следует, что время разряда конденсатора  $C_1$  с напряжения 20 В до напряжения 16 В происходит за 0,45 с, то есть 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 постоянного тока.

Следует заметить, что к моменту действия обратной связи конденсаторы  $C_2 \dots C_5$  или  $C_6 \dots C_9$  должны быть обязательно разряжены.

Определим время разряда конденсатора  $C_2 \dots C_5$ . Постоянная времени разряда равна:

$$T_{C_2 \dots C_5} = R_1 \cdot C_{2 \dots 5} = 750 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,004 \text{ с},$$

$$T_{C_6 \dots C_9} = R_4 \cdot C_{6 \dots 9} = 750 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,004 \text{ с}.$$

Разряд конденсатора происходит на предыдущей позиции КСП, через сопротивление  $R_1$ .

Время разряда конденсаторов равно:

$$t = t_{C_2 \dots C_5} = t_{C_6 \dots C_9} = 5 \cdot 0,004 = 0,02 \text{ с}.$$

То есть всегда разряжены конденсаторы  $C_2 \dots C_5$  и  $C_6 \dots C_9$  к моменту действия обратной связи. Определим время разряда конденсатора  $C_{10}$  при подаче импульса напряжения на общий вход, когда  $VS_1$  был открыт, а  $VS_2$  начнет открываться.

Конденсатор  $C_{10}$  был заряжен до напряжения  $U_{C_{10(0)}} = 110$ , а его разряд до 0 произойдет по зависимости

$$u_{C_{10}}(t) = u_{C_{10(0)}} e^{-\frac{t}{T}} = 110e^{-\frac{t}{T}} = 0,$$

где  $T$  – постоянная времени разряда конденсатора  $C_{10}$

$$T - R_1 C_{10} = 33 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,033 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где  $C_{10} = 1$  мкФ;  $R_1 = 33$  Ом.

Время разряда конденсатора

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

$$= 0,16 \cdot 10^{-3} = 160 \text{ мкс},$$

т. е. больше 100 мкс и поэтому тиристор  $VS_1$  будет надежно закрыт и двойное питание катушек  $PK_1$  и  $PK_2$  электропневматического привода Решетова будет исключено.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Висин Н. Г. Некоторые вопросы улучшения системы автоматического управления на электропоездах // Труды ДИИТа. – М.: Транспорт, 1965. – Вып. 54. – С. 72–76.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985.

Поступила в редколлегию 01.06.2005.