

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РУХОМОГО СКЛАДУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ З ВРАХУВАННЯМ ЗМІНИ УМОВ ЗЧЕПЛЕННЯ

Вступ. При експлуатації одиниць рухомого складу міського електротранспорту (РСМЕТ) (трамваїв та тролейбусів), можуть виникати буксування приводних коліс відносно дорожнього покриття або рейок. Це явище негативно впливає на технічний стан, безпеку руху та керованість рухомого складу. Як відомо [1], причиною виникнення буксування є зниження коефіцієнта зчеплення внаслідок несприятливих погодних умов, незадовільного стану дорожнього покриття, погіршення технічного стану рухомого складу.

Принцип роботи відомих пристроїв захисту від буксування [2], полягає в зниженні, на певний час, тягового зусилля при виникненні проковзування коліс відносно опорної поверхні, за рахунок введення додаткових елементів в силове коло. Недоліком таких систем захисту є те, що вони працюють в умовах буксування і не попереджують його. Отже, в процесі керування тяговим електроприводом необхідно враховувати зміну умов зчеплення для запобігання виникнення буксування, водночас потрібно реалізувати максимальну силу тяги по умовам зчеплення.

Тому метою роботи є синтез структури пристрою, який дозволяє здійснювати захист від виникнення буксування, попереджуючи його появу.

Постановка завдань дослідження. Для досягнення поставленої мети, пристрій для захисту від буксування повинен обмежувати струм тягового двигуна на рівні, що відповідає умовам зчеплення. Керування струмом при розгоні РСМЕТ здійснює обмежувальне реле. Математична модель [3] системи визначення уставки максимального струму обмежувального реле за умовами зчеплення, описується системою рівнянь (1).

$$\begin{cases} I_{op\ max} = I_{op\ усг}, & \text{якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_S^2} \leq \sigma; \\ I_{op\ max} = I_a|_{t_0}, & \text{якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_S^2} > \sigma. \end{cases} \quad (1)$$

де F_T – тягове зусилля двигуна; V_S – швидкість проковзування коліс відносно опорної поверхні; $I_{op\ усг}$ – заводський струм уставки обмежувального реле; $I_{op\ max}$ – максимальний струм уставки обмежувального реле; $I_{op\ min}$ – струм відпускання обмежувального реле; $I_a|_{t_0}$ – струм якоря тягового

двигуна в зафіксований в перший момент виконання умови початку буксування; σ – коригувальний коефіцієнт.

Використовуючи дану математичну модель, синтезуємо структуру пристрою керування тяговим електроприводом РСМЕТ з врахуванням зміни умов зчеплення, замінивши електромеханічне обмежувальне реле цифровими елементами.

Матеріали дослідження. Для синтезу пристрою використаємо математичний апарат секвенцій [4]. Для синхронізації роботи пристрою потрібно ввести генератор тактових імпульсів (ГТІ) побудований на тригері T_1 з тривалістю імпульсу τ_1 та тривалістю паузи τ_2 . Введемо тригер T_2 , який встановлюється при виконанні умови початку буксування згідно другого рівняння системи (1), та тригер T_4 , який встановлюється при виконанні першого рівняння системи (1). Використаємо тригер T_3 для формування короткого імпульсу тривалістю τ_5 для запам'ятовування струму $I_a|_{t_0}$, при виявленні початку буксування. Також введемо тригери T_5 , T_6 , які відповідають положенню педалі керування, тригери T_7 , T_8 , що відповідають струму тягового двигуна та тригери T_9 , T_{10} , для запам'ятовування струму двигуна при появі буксування. Тригери T_{11} , T_{12} , T_{13} відповідають вихідним змінним пристрою – Y_1, Y_2, Y_3 , а це відповідно: підвищення тягового зусилля, обмеження тягового зусилля, ввімкнення протибуксовочного пристрою.

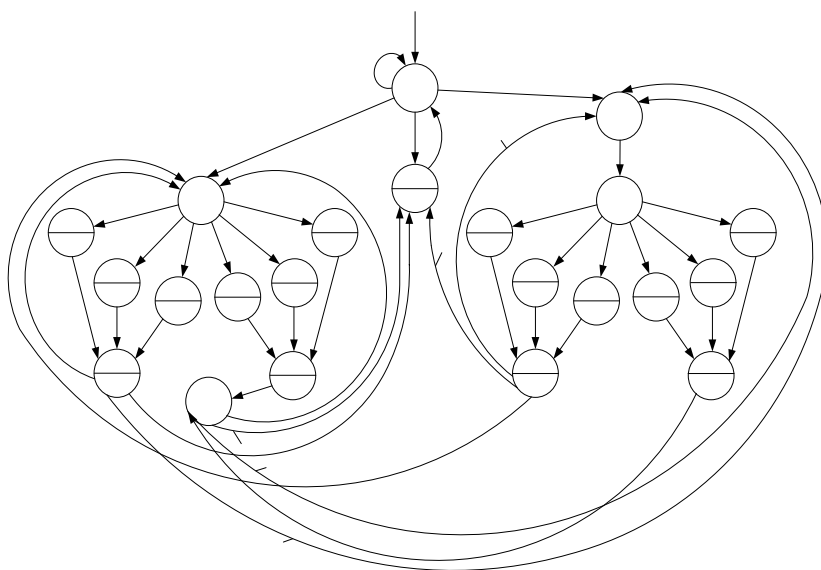


Рис. 1. Граф функціонування пристрою керування тяговим електроприводом РСМЕТ з врахуванням зміни умов зчеплення

Наприклад, для реостатно-контакторної системи електропривода вихідними змінними будуть Y_1 – пуск сервопривода групового реостата, Y_2 – зупинка сервопривода в фіксованому положенні, Y_3 – ввімкнення шунтового опору якоря. Вхідними змінними пристрою будуть: R – сигнал скиду, SB – початок буксування ($d^2F_T/dV_S^2 > \sigma$), S – буксування ($dF_T/dV_S > 0$), I_1 I_2 – пороги струму якоря, I_{1T} I_{2T} – пороги струму якоря на початку буксування, P_1 P_2 – позиція ходового контролера. Враховуючи введені позначення, граф функціонування пристрою керування тяговим електроприводом РСМЕТ з врахуванням зміни умов зчеплення, має вигляд приведений на рис. 1. Аналітичний запис функціонування пристрою приведено в вигляді системи секвенцій (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} X_0 | -S_0; \quad X_7 \cdot S_1 | -S_6; \quad X_{14} \cdot S_8 | -S_{11}; \quad X_{21} \cdot S_{10} | -S_{12}; \quad X_{28} \cdot S_{13} | -S_{16}; \quad X_{35} \cdot S_{17} | -S_{21}; \\ X_1 \cdot S_0 | -S_0; \quad X_8 \cdot S_1 | -S_7; \quad X_{15} \cdot S_5 | -S_9; \quad X_{22} \cdot S_0 | -S_{11}; \quad X_{29} \cdot S_{13} | -S_{17}; \quad X_{36} \cdot S_{18} | -S_{21}; \\ X_2 \cdot S_0 | -S_1; \quad X_9 \cdot S_2 | -S_8; \quad X_{16} \cdot S_6 | -S_9; \quad X_{23} \cdot S_{11} | -S_0; \quad X_{30} \cdot S_{13} | -S_{18}; \quad X_{37} \cdot S_{19} | -S_{21}; \\ X_3 \cdot S_1 | -S_2; \quad X_{10} \cdot S_3 | -S_8; \quad X_{17} \cdot S_7 | -S_9; \quad X_{24} \cdot S_0 | -S_{12}; \quad X_{31} \cdot S_{13} | -S_{19}; \quad X_{38} \cdot S_{20} | -S_{12}; \\ X_4 \cdot S_1 | -S_3; \quad X_{11} \cdot S_4 | -S_8; \quad X_{18} \cdot S_9 | -S_{10}; \quad X_{25} \cdot S_{12} | -S_{13}; \quad X_{32} \cdot S_{14} | -S_{20}; \quad X_{39} \cdot S_{20} | -S_{11}; \\ X_5 \cdot S_1 | -S_4; \quad X_{12} \cdot S_8 | -S_1; \quad X_{19} \cdot S_{10} | -S_1; \quad X_{26} \cdot S_{13} | -S_{14}; \quad X_{33} \cdot S_{15} | -S_{20}; \quad X_{40} \cdot S_{20} | -S_1; \\ X_6 \cdot S_1 | -S_5; \quad X_{13} \cdot S_8 | -S_{12}; \quad X_{20} \cdot S_{10} | -S_{11}; \quad X_{27} \cdot S_{13} | -S_{15}; \quad X_{34} \cdot S_{16} | -S_{20}; \quad X_{41} \cdot S_{21} | -S_{10}; \\ S_5 \vee S_6 \vee S_7 \vee S_9 \vee S_{17} \vee S_{18} \vee S_{19} \vee S_{21} | -Y_1; \quad S_2 \vee S_3 \vee S_4 \vee S_8 \vee S_{14} \vee S_{15} \vee S_{16} \vee S_{20} | -Y_2; \\ S_{11} | -Y_3. \end{array} \right. \quad (2)$$

Проведемо аналітичний опис станів графу, яким відповідають різні комбінації введених тригерів та зведено отримані рівняння в систему (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{11} = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} T_{13}; \\ S_1 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \tilde{T}_{11} \tilde{T}_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{12} = T_1 T_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \bar{T}_{11} \tilde{T}_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_2 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{13} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \tilde{T}_{11} \tilde{T}_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_3 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 \tilde{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{14} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 T_9 T_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_4 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{15} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 T_9 \bar{T}_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_5 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{16} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 T_7 \bar{T}_8 T_9 T_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_6 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 \tilde{T}_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{17} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 T_7 T_8 T_9 T_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_7 = T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 T_5 \tilde{T}_6 T_7 T_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{18} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 T_7 \bar{T}_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_8 = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \quad S_{19} = T_1 T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 T_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_9 = \tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \tilde{T}_{13}; \quad S_{20} = \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 \bar{T}_9 \bar{T}_{10} T_{11} \bar{T}_{12} \bar{T}_{13}; \\ S_{10} = \tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \bar{T}_{11} \bar{T}_{12} \tilde{T}_{13}; \quad S_{21} = \tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \tilde{T}_3 \tilde{T}_4 \tilde{T}_5 \tilde{T}_6 \tilde{T}_7 \tilde{T}_8 \tilde{T}_9 \tilde{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12} \tilde{T}_{13}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Умови переходу між станами згідно графа приведені в системі (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} X_0 = \bar{R}; \quad X_{18} = \tau_3; \quad X_{26} = \bar{I}_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge I_{1T} \wedge I_{2T}; \\ X_1 = P_1 \wedge P_2; \quad X_{19} = X_2; \quad X_{27} = \bar{I}_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge I_{1T} \wedge \bar{I}_{2T}; \\ X_2 = (P_1 \wedge P_2) \wedge \overline{SB} \wedge \bar{S} \wedge \tau_1; \quad X_{20} = X_{14}; \quad X_{28} = I_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge I_{1T} \wedge I_{2T}; \\ X_3 = \bar{I}_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge P_1 \wedge P_2; \quad X_{21} = X_{13}; \quad X_{29} = I_1 \wedge I_2 \wedge I_{1T} \wedge I_{2T}; \\ X_4 = \bar{I}_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge P_1 \wedge \bar{P}_2; \quad X_{22} = X_{14}; \quad X_{30} = I_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge I_{1T} \wedge \bar{I}_{2T}; \\ X_5 = I_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge P_1 \wedge P_2; \quad X_{23} = \tau_4; \quad X_{31} = I_1 \wedge I_2 \wedge I_{1T} \wedge \bar{I}_{2T}; \\ X_6 = I_1 \wedge I_2 \wedge P_1 \wedge P_2; \quad X_{24} = X_{13}; \quad X_{32} = X_{33} = X_{34} = \tau_2; \\ X_7 = I_1 \wedge \bar{I}_2 \wedge P_1 \wedge \bar{P}_2; \quad X_{25} = \tau_5; \quad X_{35} = X_{36} = X_{37} = \tau_2; \\ X_8 = I_1 \wedge I_2 \wedge P_1 \wedge \bar{P}_2; \quad X_{38} = X_{13}; \\ X_9 = X_{10} = X_{11} = \tau_2; \quad X_{39} = X_{14}; \\ X_{12} = X_2; \quad X_{40} = X_{12}; \\ X_{13} = (P_1 \vee P_2) \wedge SB \wedge \bar{S} \wedge \tau_1; \quad X_{41} = X_{18}. \\ X_{14} = (P_1 \vee P_2) \wedge S \wedge \tau_1; \\ X_{15} = X_{16} = X_{17} = \tau_2; \end{array} \right. \quad (4)$$

В результаті підстановки (3) та (4) в (2) та мінімізації секвенціальних виразів, використовуючи деякі властивості секвенцій [4], отримаємо наступну мінімізовану систему (5):

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 P_1 \vee P_2 | -T_1; & X_3 \cdot T_4 \tau_3 | -T_5 T_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 T_{11}; & X_{28} \cdot T_2 \cdot \tau_3 | -T_7 \bar{T}_8 T_9 T_{10} T_{11}; \\
 (T_1 \tau_1 \vee R) \tau_2 | -T_1; & X_4 \cdot T_4 \cdot \tau_3 | -T_5 \bar{T}_6 \bar{T}_7 \bar{T}_8 T_{11}; & X_{29} \cdot T_2 | -T_7 T_8 T_9 T_{10} \bar{T}_{11} T_{12}; \\
 \overline{SB \cdot S \cdot T_1 \tau_1} | -T_2 T_4 \bar{T}_9 \bar{T}_{10}; & X_5 \cdot T_4 \cdot \tau_3 | -T_5 T_6 T_7 \bar{T}_8 T_{11}; & X_{30} \cdot T_2 | -T_7 \bar{T}_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12}; \\
 \overline{SB \cdot S \cdot T_1 \tau_1} | -T_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6; & X_6 \cdot T_4 | -T_5 T_6 T_7 T_8 \bar{T}_{11} T_{12}; & X_{31} \cdot T_2 | -T_7 T_8 T_9 \bar{T}_{10} \bar{T}_{11} T_{12}; \\
 T_3 \cdot T_3 \tau_5 | -T_3; & X_7 \cdot T_4 | -T_5 \bar{T}_6 T_7 \bar{T}_8 \bar{T}_{11} T_{12}; & T_{13} | -Y_3; \\
 S \cdot T_1 \tau_1 | -T_2 \bar{T}_4 \bar{T}_{11} T_{12} T_{13}; & X_8 \cdot T_4 | -T_7 \bar{T}_8 T_9 T_{10} T_{11}; & T_{11} \bar{T}_{12} | -Y_2; \\
 T_{13} \cdot T_{13} \tau_4 | -T_3 \bar{T}_{13}; & X_{26} \cdot T_2 \cdot \tau_3 | -T_7 \bar{T}_8 T_9 T_{10} T_{11}; & \bar{T}_{11} \bar{T}_{12} \vee T_{12} | -Y_1. \\
 & X_{27} \cdot T_2 \cdot \tau_3 | -T_7 \bar{T}_8 T_9 \bar{T}_{10} T_{11}; &
 \end{array} \right. \quad (5)$$

Відповідно до графа функціонування пристрою та мінімізованої системи секвенцій (5) побудуємо структурну схему, використовуючи серійні стандартні елементи, що випускаються промисловістю. На рис. 2: 1 – сенсор початку буксування; 2 – сенсор струму двигуна; 3 – джерело опорної напруги АЦП; 4, 5, 6 – сенсори позиції педалі керування; 7, 8, 9 – вихідні функціональні перетворювачі; 10 – сенсор буксування; 11 – ГТІ; 12, 18, 23, 29, 33, 37 – елементи І; 13 – елемент ІІ; 14 – АЦП; 15 – регістр; 16 – мультиплексор; 17 – компаратор; 19, 24, 26, 30, 31, 38 – елементи АБО; 20, 21, 25, 27, 34, 35, 36 – асинхронні RS-тригери; 22, 32, 39 – елементи затримки часу; 28 – енергонезалежна постійна пам'ять.

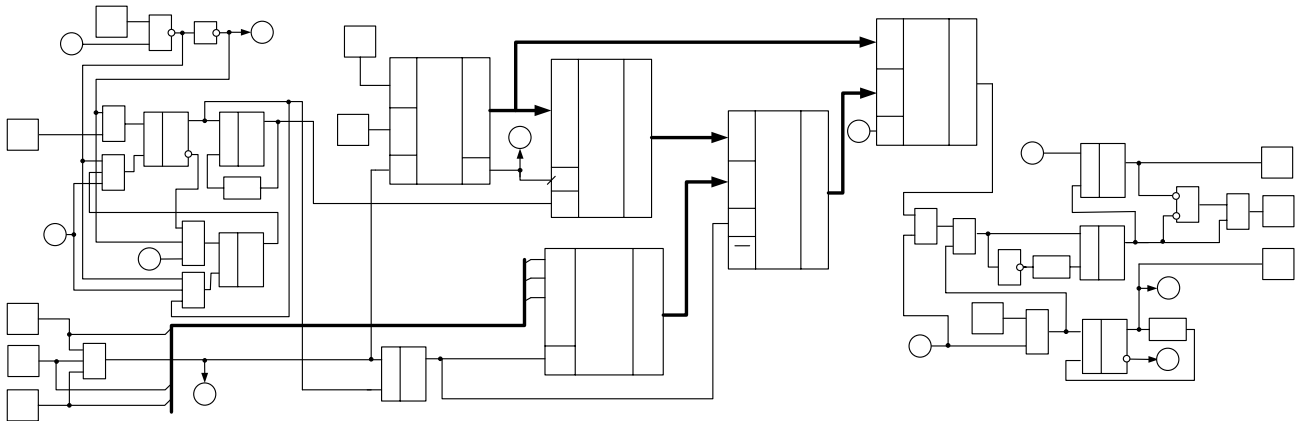


Рис. 2. Структурна схема пристрою керування тяговим електроприводом РСМЕТ з врахуванням зміни умов зчеплення

Запропонований пристрій працює так. При натисканні на педаль ходу вмикається ГТІ, який тактовим імпульсом через елементи І 18, 23, 29, 33, подає дозвіл встановлення тригерів T_1 , T_3 , T_6 , T_7 , при цьому, також встановлюється тригер T_4 та тригер T_5 , що відповідає збільшенню тягового зусилля. Якщо буксування не виникає встановлюється тригер T_3 , який обнуляє тригери T_1 та T_7 , при цьому в компараторі 17 проводиться порівняння струму двигуна та уставки закладеної в енергонезалежну пам'ять 28, значення якої змінюється в залежності від положення педалі керування. При досягненні струмом двигуна значення уставки, спрацьовує тригер T_6 , фіксує тягове зусилля на сталому рівні, при черговому зниженні струму двигуна нижче струму уставки встановлюється T_5 та обнуляється T_6 через час τ_3 , і починається подальше збільшення тягового зусилля. При наявності сигналу початку буксування встановлюється тригер T_1 , який обнуляє тригер T_3 , при цьому тригер T_2 формує короткий імпульс τ_5 протягом якого проводиться запис значення струму з виходу АЦП в регістр 15, та перемикає канал мультиплексора 16 обнуленням тригера T_4 . Таким чином струм двигуна обмежується на рівні визначеному початком буксування. При появі сигналу буксування встановлюється тригер T_7 і на час τ_4 в силе коло вмикається протибуксовочний пристрій.

Висновки. Отже синтезовано структуру пристрою для керування тяговим електроприводом РСМЕТ з врахуванням зміни умов зчеплення, який дозволяє попередити розвиток буксування.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичков Абрам Михайлович. Тяга поездов и тяговые расчеты / Бабичков А. М., Гурский П. А., Новиков А. П. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.
2. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, И. И. Озеров: под ред. И П Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
3. Проценко Д.П. Керування тяговим електроприводом трамвая при наявності обмежень по зчепленню / Д. П. Проценко // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського — 2010. — № 3, частина 2. — С. 42 — 44.
4. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью. – М.: «Энергия», 1975. – 136с.