

УДК 612.335.43

Карплюк Л.Ф., Лозинський О.Ю., Мороз В.І., Панченко Б.Я.
ДУ "Львівська політехніка", кафедра ЕАП

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОЗГОНУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРОЛЕЙБУСА

© Карплюк Л.Ф., Лозинський О.Ю., Мороз В.І., Панченко Б.Я., 2000

На розробленій моделі електромеханічної системи тягового електропривода досліджені процеси пробуксовування під час розгону тролейбуса. Для забезпечення розгону без пробуксовування запропоновано ввести контур регулювання прискорення.

Надійне функціонування електротранспортного засобу в робочих і аномальних режимах повинна забезпечувати система керування тяговим електроприводом. Проте відомі системи керування електроприводами міського транспорту в основному забезпечують лише робочі режими, а для роботи транспортного засобу характерні також і аномальні режими: буксування, юз, заноси, які виникають за перевищення тяговими або гальмівними зусиллями допустимих значень за умовами зчеплення коліс з дорожнім покриттям. Вихід зі складних ситуацій, які створюють аномальні режими, як правило і не завжди максимально ефективно, здійснює сам оператор. Наявність таких режимів у роботі призводить до створення аварійних ситуацій, прискореного спрацювання коліс.

Відомо, що необхідною вимогою до роботи тягового електропривода в режимах пуску та гальмування є ефективне обмеження струму та моменту двигуна допустимими значеннями. Автоматичне підтримання постійності моменту та струму в електроприводах з двигунами постійного та змінного струму за системою "керований перетворювач-двигун" (КП-Д) забезпечується введенням у систему керування електроприводом контуру регулювання з від'ємним зворотним зв'язком за однією з цих координат [1–3]. Під час роботи контуру регулювання струму чи моменту в режимі струмообмеження виникає максимальне значення тягових зусиль, що спричиняють можливість пробуксовування. Тому є актуальним дослідити здатність системи регулювання електропривода з контуром регулювання струму обмежувати пробуксовування тягового механізму.

Дослідження доцільно проводити за допомогою математичного моделювання, що дозволить без проведення натурних експериментів перевірити прийняті рішення, вибрати раціональні параметри системи регулювання.

Дослідження пробуксовування під час розгону проведено на прикладі електропривода з привідним двигуном постійного струму послідовного збудження і тиристорно-імпульсною системою керування ТІСК, який проектується для встановлення на тролейбусах типу ЛАЗ. Розроблена математична модель електромеханічної системи електропривода цього тролейбуса складається з моделей окремих ланок: привідного двигуна, тиристорного перетворювача, системи регулювання, механічної частини тролейбуса.

Модель двигуна постійного струму послідовного збудження значно складніша за модель двигуна з незалежним збудженням, що пояснюється зміною магнітного потоку залежно від якорного струму і нелінійністю характеристики намагнічування [4]. Точність опису кола збудження машини постійного струму в розробленій моделі визначається ступенем деталізації процесів:

- врахування вихрових струмів у масивному магнітопроводі;
- врахування впливу реакції якоря;
- врахування нелінійності магнітопроводу.

Під час розробки моделі двигуна послідовного збудження (рис.1) прийняті допущення:

- індуктивності розсіювання та обмотки якоря не залежать від магнітного потоку;
- реакція якоря пропорційна струму якоря,
- ефект витіснення струму в магнітопроводі (поверхневий ефект) з достатньою точністю апроксимується RL-ланкою заступної схеми.

На рис.1 використано такі позначення: i_a – струм якорного кола; i_μ – струм намагнічування; i_k – вихровий струм; U_a – напруга живлення двигуна; R_a, L_a – індуктивність та активний опір обмотки якоря; L_s – індуктивність розсіювання; L_μ – індуктивність намагнічування; R_d – активний опір обмотки збудження; R_k – активний опір фіктивного контуру вихрових струмів; K_{ra} – коефіцієнт реакції якоря; E, J_d, K_e – ЕРС, момент інерції та конструктивний коефіцієнт двигуна.

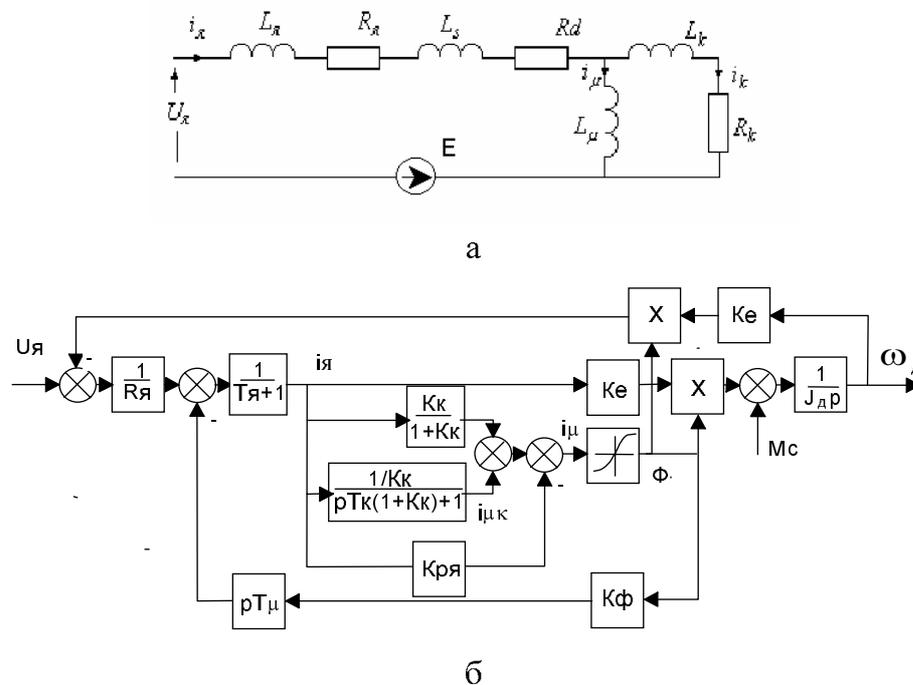


Рис.1. Модель двигуна постійного струму послідовного збудження:
а – електрична схема; б – структурна схема.

Позначивши $T_a = (L_a + L_s) / (R_a + R_d)$; $T_k = L_\mu / R_k$; $T_\mu = L_\mu / R_d$, $K_k = L_k / L_\mu$, а також A_ϕ, B_ϕ – коефіцієнти апроксимації характеристики намагнічування, отримаємо відповідну структурну схему (рис.1,б).

Така структурна схема описується рівняннями

$$\frac{di_{я}}{dt} = \frac{(U_{я} - K_e \Phi \omega_{д}) / R_{я} - i_{я} - K_{\Phi} T_{\mu} \frac{d\Phi}{dt}}{T_{я}}; \quad (1)$$

$$\frac{di_{\mu k}}{dt} = \frac{i_{я} / K_k - i_{\mu k}}{T_k (1 + K_k) + 1}; \quad (2)$$

$$i_{\mu} = i_{\mu k} + \left(\frac{K_k}{1 + K_k} - K_{р\text{я}} \right) i_{я}; \quad (3)$$

$$\Phi = A_{\Phi} \cdot \arctg(B_{\Phi} I_{\mu}); \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_{д}}{dt} = \frac{K_e \Phi i_{я} - M_c}{J_{д}}. \quad (5)$$

Робота ТІСК моделюється ввімкненням-вимкненням з частотою генератора опорної задаючої напруги привідного двигуна до мережі живлення. Моменти відкриття та закривання тиристора у ТІСК встановлюються на підставі розв'язування логічних рівнянь, що описують систему керування. Керування перетворювачем відбувається в дискретні моменти відкриття вентилів, між цими моментами напруга керування не впливає на вихідну напругу.

Рівняння роботи ТІСК

$$t_{\text{відкр}_i} = t_{\text{відкр}_{i-1}} + T_{\text{ТІСК}}; \quad (7)$$

$$t_{\text{закр}_i} = \frac{U_{\text{вх}} T_{\text{ТІСК}}}{U_{\text{вх}_{\text{max}}}}; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Якщо } t - t_{\text{відкр}_i} \leq t_{\text{закр}_i} \quad \text{то} \quad E_d = U_M \\ \text{інакше} \quad E_d = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де $t_{\text{відкр}}$, $t_{\text{закр}}$ – моменти відкриття і закривання вентилів; $T_{\text{ТІСК}}$ – період коливань опорної напруги; $U_{\text{вх}}$ – напруга керування ТІСК; U_M – напруга мережі живлення.

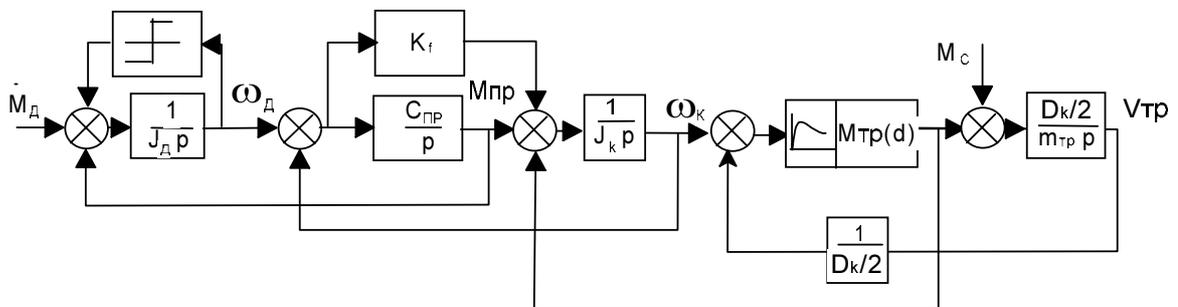


Рис.2. Модель механічної частини тролейбуса.

Механічна частина тролейбуса, описана в моделі (рис.2), є еквівалентною багатомасовій системі з пружним кінематичним зв'язком з такими вузлами зосередження мас:

- момент інерції двигуна і трансмісії;
- момент інерції колеса ;
- маса тролейбуса, що зведена до колеса.

Тут введено такі позначення: M_d , J_d , ω_d – момент, момент інерції та кутова швидкість двигуна; $M_{тр}$, $C_{тр}$, J_k , ω_k , D_k – пружний момент на обводі, пружність, момент інерції, кутова швидкість та діаметр колеса; $M_{тр}$, M_c , $m_{тр}$, $v_{тр}$ – крутний момент, момент статичного опору рухові, маса та лінійна швидкість тролейбуса, K_f – коефіцієнт дисипативних сил.

Зосереджені маси в моделі пов'язані між собою механічною жорсткістю колеса $C_{тр}$ [6, 7]. Зовнішні навантаження прикладені до колеса (рис.3), де крутильний момент $M_{тр}$ та притискуюча сила $G_{тр}$ спричиняють його складну деформацію, яку можна розкласти на радіальну $\Delta\rho$ і тангенціальну $\Delta\tau$ складові. Визначає зведену жорсткість $C_{тр}$ тангенціальна складова деформації $\Delta\tau$. Для коліс типу 280R – 508 БЦІ-А185 або БЦІ-309 при робочому тиску 0,78 мПа та повній масі тролейбуса вона становить 250 кг·м/град [7].

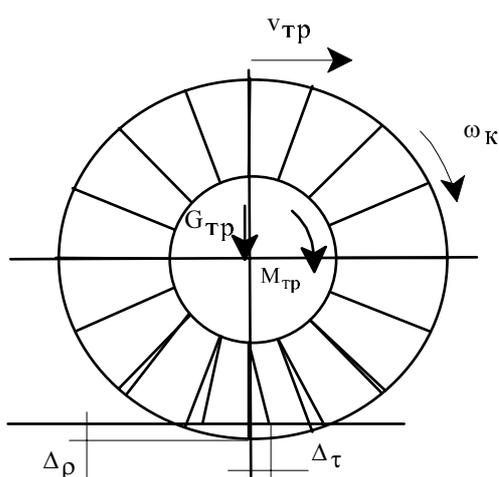


Рис.3. Навантаження та деформації автомобільного колеса.

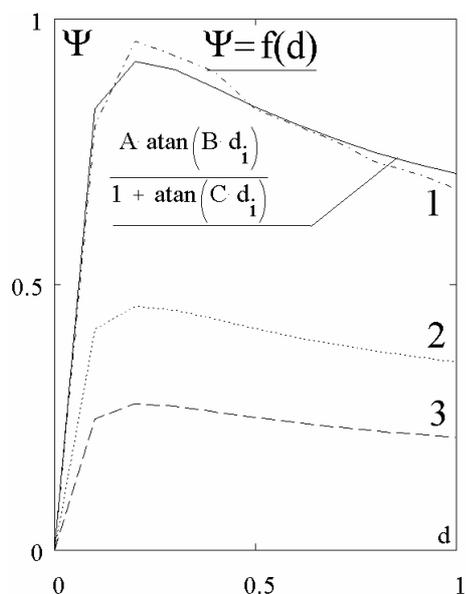


Рис.4. Характеристики пробуксовування колісного рушія.

Навантаженням тягового електропривода тролейбуса в робочих та аномальних режимах (буксування та юзу) є пара тертя [5] з проковзуванням колеса відносно дорожнього покриття. Залежність рушійного моменту $M_{тр}$ від пробуксовування визначається відомою кривою [6] пробуксовування $\Psi = f(d)$, яка є залежністю відносного значення крутної сили або моменту $\psi = M_{тр} / G_{тр}$ від пробуксовування d рис.4 (криві 1, 2, 3). Ця крива з достатньою точністю апроксимується залежністю (14), де A , B , C – коефіцієнти апроксимації. Отже, рівняння моделі механічної частини тролейбуса виглядатимуть так:

$$\frac{d\omega_d}{dt} = \frac{M_d - M_{пр} - M_c \text{sign}(\omega_d)}{J_{дв}}; \quad (10)$$

$$M_{\text{пр}} = c_{\text{пр}} \int_0^t (\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{к}}) dt; \quad (11)$$

$$\frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} = \frac{M_{\text{пр}} - M_{\text{тр}} - k_f(\omega_{\text{д}} - \omega_{\text{к}})}{J_{\text{к}}}; \quad (12)$$

$$d = \frac{\omega_{\text{к}} - \frac{2v_{\text{тр}}}{D_{\text{к}}}}{\omega_{\text{к}}}; \quad (13)$$

$$M_{\text{тр}} = f(d) = \frac{A \cdot \arctg(B \cdot d)}{1 + \arctg(C \cdot d)}; \quad (14)$$

$$\frac{dv_{\text{тр}}}{dt} = \frac{m_{\text{тр}} D_{\text{к}}}{2} (M_{\text{тр}} - M_{\text{с}}). \quad (15)$$

Адекватність розробленої моделі доведена натурним експериментом на фізичній моделі електропривода [4] та механічної [5] частини.

На розробленій моделі досліджено перехідні процеси розгону проектованого електропривода тролейбуса ЛАЗ (рис.5) з системою керування з пропорційним регулятором Р, з постійно діючим зворотним зв'язком за струмом з давача струму ДС.

Така система дозволяє ефективно обмежувати та здійснювати регулювання обмеження струму і моменту двигуна на заданому оператором рівні. Перехідні процеси в електроприводі з такою системою керування для кривої буксування, характерної

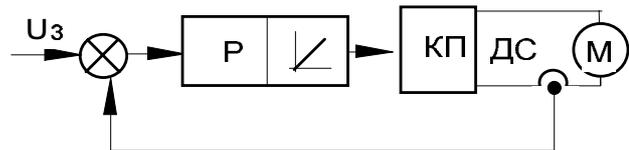


Рис.5. Структурна схема електропривода.

для роботи в несприятливих умовах (рис.4, крива 2), показана на рис.6,а. З діаграми видно, що перший період часу (≈ 5 с) під дією моменту двигуна $M_{\text{д}}$ проходить його інтенсивний розгін. Темп розгону визначає лише значення моменту інерції двигуна $J_{\text{д}}$. Через пробуксовування до тролейбуса прикладається лише незначна частина $M_{\text{д}}$ і тому швидкість тролейбуса значно відстає від швидкості двигуна, має місце значне пробуксовування, яке сягає 40 %. Двигун досягає усталеного значення швидкості, виходить на природну характеристику, і момент двигуна зменшується до рівня руйнівного моменту тролейбуса $M_{\text{тр}}$. Протягом розгону тролейбуса пробуксовування зменшується і різниця швидкостей двигуна і тролейбуса сягне значень, які відповідають робочій прямолінійній ділянці кривої пробуксовування (рис.4). Тобто аналіз показує, що розгін проходить з великими пробуксовуваннями, яким система керування запобігти не може.

Розгін без пробуксовування може забезпечити введення в структуру контуру регулювання прискорення. Регулятор прискорення повинен працювати одночасно з існуючою системою регулювання, вступаючи в дію лише за перевищення прискоренням допустимого значення. Таку роботу регулятора прискорення може забезпечити система з паралельним з'єднанням регуляторів [3]. На рис.7 показана функціональна схема системи електропривода з паралельним з'єднанням регуляторів струму Р та прискорення РП.

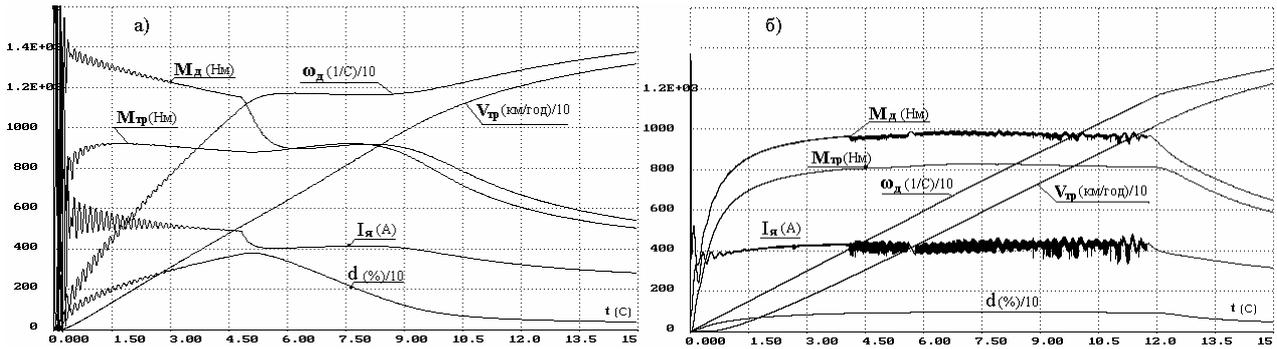


Рис.6. Перехідні процеси розгону тролейбуса.

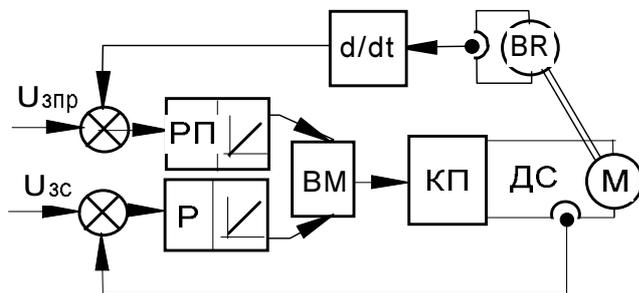


Рис.7. Структурна схема електропривода.

На регулятор прискорення РП заведено сигнал завдання максимально допустимого прискорення $U_{зпр}$ та зворотного зв'язку за прискоренням. Контроль прискорення здійснюється за допомогою тахогенератора BR та диференціюючої ланки. Вибір керуючого впливу здійснює вузол вибору меншого ВМ з сигналів регулювання.

На рис.6,б зображено результати моделювання розгону тролейбуса з електроприводом з такою системою керування.

Видно, що розгін тролейбуса проходить без буксування. Система керування, регулюючи момент двигуна M_d на необхідному рівні, дозволяє стабілізувати пробуксовування на рівні 10 %.

Висновки

1. Існуючі системи регулювання з контуром регулювання струму в режимах струмообмеження не забезпечують запобігання режимів буксування, оскільки не обмежують зміну прискорення за зменшення моменту навантаження та моменту інерції під час пробуксування.

2. Введення регулятора прискорення дає змогу обмежити пробуксовування допустимими значеннями.

3. Застосована схема паралельного з'єднання регуляторів дозволяє вмикати в роботу контур регулювання прискорення лише в режимах перевищення прискоренням значення, що допустиме за умовами зчеплення. У робочих режимах цей контур не працює.

1. Шульц В., Новак З. *Электрическая часть троллейбуса 15Тр. Торгово-техническая служба отдел пропаганды Шкода Остров. 1989.*
2. Lawson Louis J., Karha Keijo. *AC propulsion for electric trolley coaches // Proc. Conf. IAS (IEEE Ind.Appl.Soc.) 15th Annu. Meet., Cincinnati. New York, N. Y. 1980. Vol.1-2. P.296–300.*
3. Карлюк Л. *Вибір системи керування для електроприводів транспортних механізмів // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1997. № 334. С.41–44.*
4. Мороз В., Карлюк Л. *Уточнення моделі двигуна постійного струму послідовного збудження // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998. № 347. С.118–123.*
5. Клетиков В.Б. *О фрикционных автоколебаниях в электроприводе // Электричество. 1986. № 4. С.59–62.*
6. Ульянов Н.А. *Колесные движители строительных и дорожных машин: Теория и расчет. М., 1982.*
7. *Работа автомобильной шины / Под ред. В.И.Кнороза. М., 1976.*