

УДК 681.5.023+681.5.015+62-83:629.433

Б. І. Мокін, д. т. н., проф.;

О. Б. Мокін

МОДИФІКАЦІЯ КВАЗІОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНУ ЗМІНИ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ВАЛА РОТОРА ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ В РЕЖИМІ СТАЛОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Запропоновано ітераційний підхід до розв'язання проблеми недовиконання електроприводом трамвая програми роботи, спричиненої обмеженням кутової швидкості за номінальним значенням. Побудовано відповідний уточнений квазіоптимальний закон зміни кутової швидкості обертання вала ротора електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням системи електропривода трамвая.

1. Постановка задачі та вихідні передумови

В роботі [1] побудовано квазіоптимальний закон зміни кутової швидкості обертання вала ротора електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням системи електропривода трамвая (у відносних одиницях згідно робіт [2, 3])

$$v_{\text{кв}}(\tau) = \begin{cases} \frac{a_1^2}{4\lambda_0^{\text{ПП}} b_1} \left(\frac{1}{b_1(1 - b_1(C^{\text{ПП}} + \lambda_0^{\text{ПП}}\tau))} - \frac{1}{b_1} - (C^{\text{ПП}} + \lambda_0^{\text{ПП}}\tau) \right) - \mu_0\tau + C_1, & \text{для } \tau \in [0, \tau_1]; \\ 1, & \text{для } \tau \in (\tau_1, \tau_2); \\ \frac{4}{27a_2^2\lambda_0^{\text{УГ}}} \left(b_2^3(C^{\text{УГ}} + \lambda_0^{\text{УГ}}\tau) + \frac{3b_2}{C^{\text{УГ}} + \lambda_0^{\text{УГ}}\tau} - \frac{1}{(C^{\text{УГ}} + \lambda_0^{\text{УГ}}\tau)^2} \right) - \mu_0\tau + C_2, & \text{для } \tau \in [\tau_2, \tau_k], \end{cases} \quad (1)$$

який враховує обмеження кутової швидкості за номінальним значенням

$$v \leq 1, \quad (2)$$

а також базується на математичній моделі кривої намагнічування [4]

$$\phi(i) = \begin{cases} -a_2 i^2 + b_2 i, & i \in [0, i_{\text{сп}}]; \\ a_1 + b_1 i, & i \in [i_{\text{сп}}, \infty), \end{cases} \quad (3)$$

$$i_{\text{сп}} = \frac{b_2 - b_1}{2a_2} \quad (4)$$

та побудованих на цій моделі (3) оптимальних законах зміни кутової швидкості [2, 3]:

— при роботі на лінійній частині моделі характеристики намагнічування (3)

$$v^{\text{ПП}}(\tau) = \frac{a_1^2}{4\lambda_0^{\text{ПП}} b_1} \left(\frac{1}{b_1(1 - b_1(C^{\text{ПП}} + \lambda_0^{\text{ПП}}\tau))} - \frac{1}{b_1} - (C^{\text{ПП}} + \lambda_0^{\text{ПП}}\tau) \right) - \mu_0\tau + C_1; \quad (5)$$

— при роботі на параболічній частині моделі характеристики намагнічування (3)

$$v^{УГ}(\tau) = \frac{4}{27a_2^2\lambda_0^{УГ}} \left(b_2^3 (C^{УГ} + \lambda_0^{УГ}\tau) + \frac{3b_2}{C^{УГ} + \lambda_0^{УГ}\tau} - \frac{1}{(C^{УГ} + \lambda_0^{УГ}\tau)^2} \right) - \mu_0\tau + C_2, \quad (6)$$

де верхніми індексами «ПР» та «УГ» позначені режими роботи електропривода трамвая відповідно на умовних проміжках «пуск—розгін» та «усталений рух—гальмування».

В роботі [1] також зроблено наголос на проблемі недовиконання програми роботи електропривода

$$\beta = \int_0^{\tau_k} v d\tau, \quad (7)$$

спричиненого накладеним на оптимальні закони (5) та (6) обмеженням (2), і запропоновано спосіб вирішення цієї проблеми, який базується на збільшенні часу проходження трамваем відстані між зупинками. Але цей спосіб може бути застосований лише для побудови оптимального закону зміни кутової швидкості обертання якорів електродвигунів електропривода трамвая без корекції графіка руху під час його руху між трамвайними зупинками, які знаходяться на близькій відстані. У випадку ж жорсткого графіка руху трамваїв, який змінювати не дозволено, запропонований у роботі [1] підхід не може бути застосовано.

Отже, в умовах заборони корекції графіка руху трамваїв проблема недовиконання електроприводом трамвая програми роботи (7) залишається актуальною і потребує подальшого дослідження. Саме тому в статті розглядається ще один спосіб вирішення зазначеної вище проблеми.

2. Ітераційний підхід до вирішення проблеми недовиконання електроприводом трамвая програми роботи (7) при дотриманні під час руху трамвая квазіоптимального закону (1)

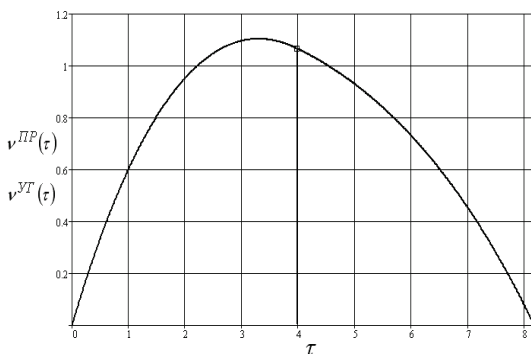


Рис. 1

зані на рисунку 1, а квазіоптимальний закон (1) буде мати вигляд, показаний на рисунку 2.

Як і в роботі [1], спочатку визначимо β для руху трамвая за оптимальними законами (5), (6) та $\beta_{\text{кваз}}$ для квазіоптимального закону зміни кутової швидкості (1). Користуючись методикою, викладеною в роботі [1], знайдемо, що

$$\beta = \frac{k_p I_k}{R \omega_H T_M} = 5,956, \quad (8)$$

де k_p — коефіцієнт передачі редуктора від осі ро-

тора електродвигуна до осі колеса, I_k — відстань між сусідніми трамвайними зупинками в метрах,

R — радіус обода колеса трамвая в метрах, ω_H — номінальна кутова швидкість обертання вала

ротора електродвигуна в $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$, T_M — механічна стала часу в секундах, а

Для наочності підходу, що пропонується, змінимо параметри прикладу, наведеного в роботі [1], а саме: побудуємо квазіоптимальний закон зміни кутової швидкості обертання вала ротора (1) для електричного двигуна постійного струму послідовного збудження ТЕ022 електропривода трамвая КТ4SU під час його руху між двома трамвайними зупинками, які знаходяться на відстані 300 метрів одна від одної і яку потрібно проїхати за 48 секунд.

Для наведеного вище прикладу оптимальні закони зміни кутової швидкості (5) та (6) пока-

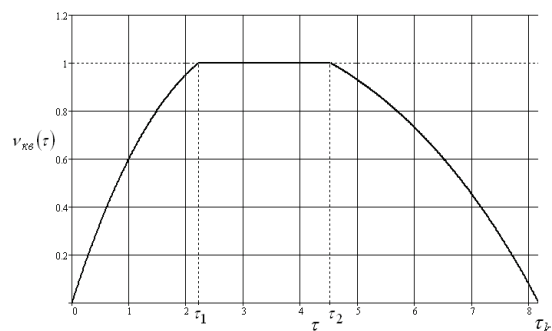


Рис. 2

$$\beta_{\text{кввз}} = \int_0^{\tau_1} v^{\text{ПП}}(\tau) d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_2} 1(\tau) d\tau + \int_{\tau_2}^{\tau_k} v^{\text{УГ}}(\tau) d\tau = 0,055. \quad (9)$$

З урахуванням виразів (8) та (9), будемо мати

$$\Delta\beta = \beta - \beta_{\text{кввз}} = 0,901, \quad (10)$$

де $\Delta\beta$ — величина недовиконання програми роботи (7) для нашого прикладу.

Для виконання програми роботи (7) пропонується зменшити час розгону трамвая до номінальної швидкості та час його гальмування до повної зупинки і, відповідно, збільшити час руху трамвая в номінальному режимі роботи його електродвигунів, причому зробити це так, щоб повністю виконати програму роботи (7), тобто досягти рівності

$$\beta_{\text{кввз}} = \beta. \quad (11)$$

Для цього складемо ітераційний алгоритм:

1. Зафіксуємо час, за який за планом потрібно проїхати відстань між зупинками, та позначимо його $\tau_k^{\text{базове}}$ (в нашому випадку $\tau_k^{\text{базове}} = 8,162$).

2. Перепишемо вираз (9) для знаходження $\beta_{\text{кввз}}$ таким чином:

$$\beta_{\text{кввз}}^* = \int_0^{\tau_1} v^{\text{ПП}}(\tau) d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_2} 1(\tau) d\tau + \int_{\tau_2}^{\tau_k} v^{\text{УГ}}(\tau) d\tau + \int_{\tau_k}^{\tau_k^{\text{базове}}} 1(\tau) d\tau, \quad (12)$$

тобто для $\tau_k^{\text{базове}} = \tau_k$ буде мати місце рівність $\beta_{\text{кввз}}^* = \beta_{\text{кввз}}$.

3. Зменшимо значення τ_k (наприклад, на 25 %).

4. Перерахуємо параметри квазіоптимального закону (1), як це показано у роботах [1, 3], в тому числі τ_1 і τ_2 , з урахуванням нового значення τ_k та з виразу (12) визначимо нове значення $\beta_{\text{кввз}}^*$.

5. Продовжуємо зменшувати (збільшувати) значення τ_k до тих пір, поки не досягнемо рівності $\beta_{\text{кввз}}^* = \beta$ з заданою точністю (для нашого прикладу в ППП Mathcad ми виконували округлення значень $\beta_{\text{кввз}}^*$ та β до третього знаку після коми).

6. Знаходимо різницю

$$\Delta\tau = \tau_k^{\text{базове}} - \tau_k. \quad (13)$$

7. Записуємо уточнений квазіоптимальний закон зміни кутової швидкості обертання валів роторів електродвигунів електропривода трамвая

$$v_{\text{кв}}^*(\tau) = \begin{cases} \frac{a_1^2}{4\lambda_0^{\text{ПП}} b_1} \left(\frac{1}{b_1 (1 - b_1 (C^{\text{ПП}} + \lambda_0^{\text{ПП}} \tau))} - \frac{1}{b_1} - (C^{\text{ПП}} + \lambda_0^{\text{ПП}} \tau) \right) - \mu_0 \tau + C_1, & \text{для } \tau \in [0, \tau_1]; \\ 1, & \text{для } \tau \in (\tau_1, \tau_2 + \Delta\tau); \\ \frac{4}{27a_2^2 \lambda_0^{\text{УГ}}} \left(b_2^3 (C^{\text{УГ}} + \lambda_0^{\text{УГ}} (\tau - \Delta\tau)) + \frac{3b_2}{C^{\text{УГ}} + \lambda_0^{\text{УГ}} (\tau - \Delta\tau)} - \right. \\ \left. - \frac{1}{(C^{\text{УГ}} + \lambda_0^{\text{УГ}} (\tau - \Delta\tau))^2} \right) - \mu_0 (\tau - \Delta\tau) + C_2, & \text{для } \tau \in [\tau_2 + \Delta\tau, \tau_k^{\text{базове}}]. \end{cases} \quad (14)$$

Квазіоптимальний закон (1) (зі штриховими ділянками) та уточнений квазіоптимальний закон (14) зміни кутової швидкості обертання якоря електродвигуна постійного струму ТЕ022 електропривода трамвая КТ4SU під час його руху між двома трамвайними зупинками, які знаходяться на відстані 300 метрів одна від одної і яку потрібно проїхати за 48 секунд показаний на рисунку 3.

Рухаючись за уточненим квазіоптимальним законом зміни кутової швидкості (14) електропривод трамвая дійсно виконає програму роботи (2) в повному обсязі, причому зробить це за передбачений планом час.

Висновки

Запропоновано спосіб корекції квазіоптимального закону зміни кутової швидкості обертання якорів електродвигунів електропривода трамвая та побудовано уточнений квазіоптимальний закон (14) зміни кутової швидкості обертання валів роторів електродвигунів електропривода трамвая, за допомогою якого електропривод трамвая виконає програму роботи (2) в повному обсязі, і за наявності обмежень, і за передбачений графіком роботи час.

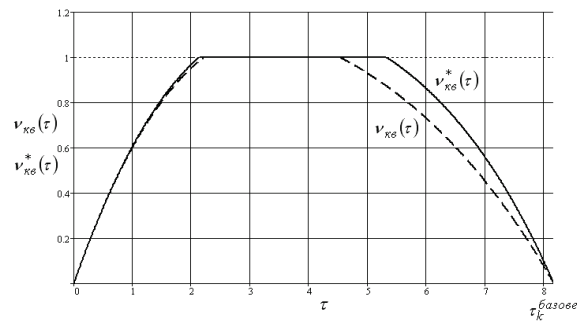


Рис. 3

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Квазіоптимальний закон зміни кутової швидкості обертання вала ротора електродвигуна постійного струму послідовного збудження системи електропривода трамвая в режимі сталого навантаження // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 29—33.
2. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Математичні моделі в задачі оптимізації електропривода трамвая при його сталому навантаженні // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 2. — С. 57—61.
3. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Друга ітерація алгоритму побудови математичних моделей в задачі оптимізації електропривода трамвая при його сталому навантаженні // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 5. — С. 43—49.
4. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Математична модель кривої намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням для задач оптимізації // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 1. — С. 45—47.

Рекомендована кафедрою моделювання та моніторингу складних систем

Надійшла до редакції 2.04.07
Рекомендована до друку 6.04.07

Мокін Борис Іванович — професор кафедри моделювання та моніторингу складних систем,
Мокін Олександр Борисович — старший науковий співробітник НДЛ АСУЕТ.

Вінницький національний технічний університет