

## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОБУСА

**Мельник О.О., магістрант, Пересада С.М., д.т.н., проф.**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** Використання в громадському транспорті двигунів внутрішнього згорання не є оптимальним за багатьма критеріями, оскільки вони мають значні недоліки, такі як: низький ККД, наявність шкідливих викидів, складність конструкції та висока вартість обслуговування. Використання транспортних засобів (ТЗ) з електричним приводом дозволяє суттєво підвищити ефективність перетворення енергії, значно спростити конструкцію транспортних засобів, підвищити комфортність перевезень та зменшити викиди шкідливих речовин в оточуюче середовище.

Визначення потужності тягового електродвигуна є важливим питанням конструювання електротранспорту. Некоректний вибір потужності може призвести до погіршення ефективності перетворення енергії, збільшення маси транспортного засобу чи до перевантаження двигуна і зменшення терміну його експлуатації.

**Мета роботи.** Визначення потужності асинхронного двигуна АД для електроавтобуса на базі міського автобуса Богдан А-092.

**Матеріали і результати досліджень.** Вихідними даними для розрахунку є параметри електробуса та основні характеристики руху транспортного засобу [1]. В розрахунках використовувалися наступні величини: повна маса електробуса  $m = 8230$  кг; радіус коліс  $R_k = 0.385$  м; маса колеса  $m_k = 55$  кг; передатне відношення диференціала (коробка передач відсутня)  $i = 5.85$ ; момент інерції тягового АД потужності, що співрозмірна до потужності двигуна внутрішнього згорання  $J_\delta = 1.5$  кгм<sup>2</sup>, довжина ділянки руху  $S = 600$  м; час паузи  $t_o = 45$  с; максимальне прискорення/сповільнення  $a_m = b_m = 1.5$  м/с<sup>2</sup>, максимальна усталена швидкість  $V_m = 75$  км/год (20.83 м/с), номінальна усталена швидкість  $V_n = 40$  км/год (11.11 м/с).

Рівняння руху механічної частини електропривода транспортного засобу, яка представлена одномасовою розрахунковою схемою має вигляд

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_\delta, \quad (1)$$

де  $J$  – сумарний приведений момент інерції,  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{a_m \cdot i}{R_k}$  – кутове прискорення,  $M_\delta$  – динамічний момент.

Приведений момент інерції розраховується у відповідності до виразу

$$J = J_m + J_\partial + J_k = m \cdot \frac{R_k^2}{i^2} + J_\partial + \frac{4 \cdot m_k \cdot R_k^2}{2 \cdot i^2},$$

де  $J_m$  – приведений момент інерції ТЗ;  $J_\partial$  – момент інерції тягового АД  $J_k$  – сумарний момент коліс ТЗ.

У відповідності до вихідних даних сумарний момент інерції  $J$  дорівнює  $37.6 \text{ кгм}^2$ .

Максимальні швидкості обертання колеса  $\omega_{km}$  та вала двигуна  $\omega_m$  дорівнюють:  $\omega_{km} = \frac{V_m}{R_k} = 51.1 \text{ рад/с}$  та  $\omega_m = \frac{V_m \cdot i}{R_k} = 316.5 \text{ рад/с}$ . Відповідно

номінальна швидкість обертання колеса  $\omega_{kn}$  та вала двигуна  $\omega_n$  дорівнюють:

$$\omega_{kn} = \frac{V_n}{R_k} = 28.9 \text{ рад/с} \text{ та } \omega_n = \frac{V_n \cdot i}{R_k} = 168.8 \text{ рад/с}.$$

Розрахована номінальна кутова швидкість  $\omega_n$  має найближче стандартне значення, яке відповідає дво полюсному АД, тому в подальших розрахунках використовується значення  $\omega_n = 157 \text{ рад/с}$ .

В умовах розгону до номінальної швидкості з максимальним прискоренням  $1.5 \text{ м/с}^2$  передбачається використовувати перевантажувальну здатність двигуна по моменту, яка для тягового АД дорівнює  $2 \div 2.5$ . Забезпечення швидкості обертання більше номінальної відбувається при ослабленні потоку, що вимагає зниження моменту для роботи АД з постійною потужністю. При цьому, розрахований коефіцієнт ослаблення потоку дорівнює

$$D = \frac{\omega_m}{\omega_n} = \frac{316.5}{157} \approx 2.$$

За експертними оцінками [2] сила опору, що діє на транспортний засіб в усталених режимах при русі по горизонтальній поверхні складає незначну частину від динамічного моменту двигуна. Для подальшого розрахунку, прийmemo значення суми сил опору складає  $F_c = 370 \text{ Н}$ , якому відповідає статичний момент  $M_c \approx 24 \text{ Нм}$ .

Динамічний момент двигуна визначається з виразу (1) та складає

$$M_\partial = J \cdot \frac{a_m \cdot i}{R_k} = 857 \text{ Нм. Максимальний пусковий } M_n \text{ та максимальний}$$

гальмівний момент  $M_z$  відповідно дорівнюють:  $M_n = M_\partial + M_c = 881 \text{ Нм}$  та

$$M_z = M_c - M_\partial = -833 \text{ Нм.}$$

Час розгону  $\Delta t_{p1}$  та гальмування  $\Delta t_{z1}$  при роботі двигуна в першій зоні

$$\text{дорівнюють: } \Delta t_{p1} = \Delta t_{z1} = J \cdot \frac{\omega_n}{M_\partial} = 6.9 \text{ с}.$$

Рівняння руху механічної частини електропривода ТЗ при ослабленні потоку АД має вигляд

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m \frac{\omega_n}{\omega}, \quad (2)$$

де  $M_m$  – максимальний момент двигуна,  $M_m = M_n$  або  $M_m = M_z$  (в залежності від режиму руху – розгону чи гальмування).

Розв'язуючи диференціальне рівняння (2) для початкових умов  $\omega(0) = \omega_n = 157$  рад/с отримаємо аналітичний вираз для кутової швидкості обертання валу двигуна при роботі АД з ослабленням потоку

$$\omega(t) = \sqrt{2 \cdot \frac{M_m \cdot \omega_n}{J} \cdot t + 157^2}, \text{ для } \omega_n < \omega < \omega_m. \quad (3)$$

Розв'язуючи вираз (3) відносно часу визначимо час розгону  $\Delta t_{p2}$  та гальмування  $\Delta t_{z2}$  двигуна при роботі з ослабленням потоку. Відповідно  $\Delta t_{p2}$  та

$$\Delta t_{z2} \text{ складають: } \Delta t_{p2} = \frac{J(\omega_n^2 - 157^2)}{2 \cdot M_n \cdot \omega_n} = 10.3 \text{ с та } \Delta t_{z2} = \frac{J(\omega_n^2 - 157^2)}{2 \cdot M_z \cdot \omega_n} = 10.9 \text{ с.}$$

Сумарний час розгону  $\Delta t_p$  та гальмування  $\Delta t_{z2}$  складає:  $\Delta t_p = \Delta t_{p1} + \Delta t_{p2} = 17.2$  с та  $\Delta t_z = \Delta t_{z1} + \Delta t_{z2} = 17.8$  с.

Пройдений шлях на ділянках розгону/гальмування визначається з виразу:

$$S_p = \frac{R_k}{i} \left( \int_0^{\Delta t_{p1}} \omega_1(\tau) d\tau + \int_0^{\Delta t_{p2}} \omega_2(\tau) d\tau \right) = \frac{R_k}{i} \left( \frac{M_n \cdot \Delta t_{p1}^2}{2 \cdot J} + \frac{(2 \cdot k_1 \cdot \Delta t_{p2} + 157^2)^{3/2}}{3 \cdot k_1} \right) = 226.5 \text{ м,}$$

$$S_z = \frac{R_k}{i} \left( \int_0^{\Delta t_{z1}} \omega_1(\tau) d\tau + \int_0^{\Delta t_{z2}} \omega_2(\tau) d\tau \right) = \frac{R_k}{i} \left( \frac{|M_z| \cdot \Delta t_{z1}^2}{2 \cdot J} + \frac{(2 \cdot k_2 \cdot \Delta t_{z2} + 157^2)^{3/2}}{3 \cdot k_2} \right) = 235.6 \text{ м.}$$

де  $\omega_1(\tau)$  та  $\omega_2(\tau)$  – швидкості обертання валу двигуна при роботі в першій та другій зоні,  $k_1 = \frac{M_n \cdot \omega_n}{J}$ ,  $k_2 = \frac{|M_z| \cdot \omega_n}{J}$ .

Приймаючи до уваги отримані значення та інформацію про відому довжину ділянки руху ТЗ, його швидкість та час паузи  $t_o$ , значення часу руху з усталеною швидкістю  $\Delta t_1$  складає 6.6 с, час роботи  $T_p = 41.6$  с, час циклу  $T_u = 86.6$  с, ПВ% = 48%.

Залежність моменту та кутової швидкості в умовах розглянутого циклу мають вигляд показаний на рис. 1

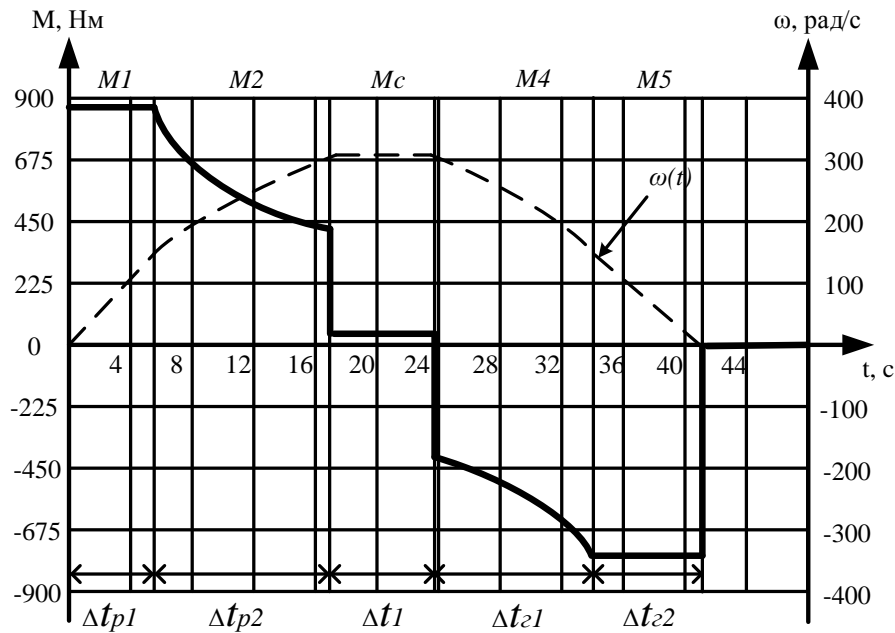


Рисунок 1 – Цикл руху електробуса

Визначимо значення еквівалентного моменту двигуна шляхом чисельного інтегрування навантажувальної діаграми. Отримаємо:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_y} \int_0^{T_y} M^2(t) dt} = 449 \text{ Нм.}$$

Перерахуємо отриманий момент на стандартну ТВ:

$$M_{en} = M_e \sqrt{\frac{TB\%}{100\%}} = 449 \cdot \sqrt{\frac{48}{100}} = 310 \text{ Нм.}$$

Отримане значення моменту визначене для найбільш важкого режиму роботи. Проведемо уточнення отриманого результату з використанням експериментального циклу руху ТЗ великої вантажопідйомності «ORANGE COUNTY BUS CYCLE» [3]. Траєкторія зміни лінійної швидкості та прискорення представлена на рис. 2.

Використовуючи масив даних, що описує траєкторію лінійної швидкості, розрахуємо прискорення та значення моменту, що представлені на рис. 2.

Визначимо значення еквівалентного моменту двигуна шляхом чисельного інтегрування навантажувальної діаграми. Отримаємо:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_y} \int_0^{T_y} M^2(t) dt} = 372 \text{ Нм.}$$

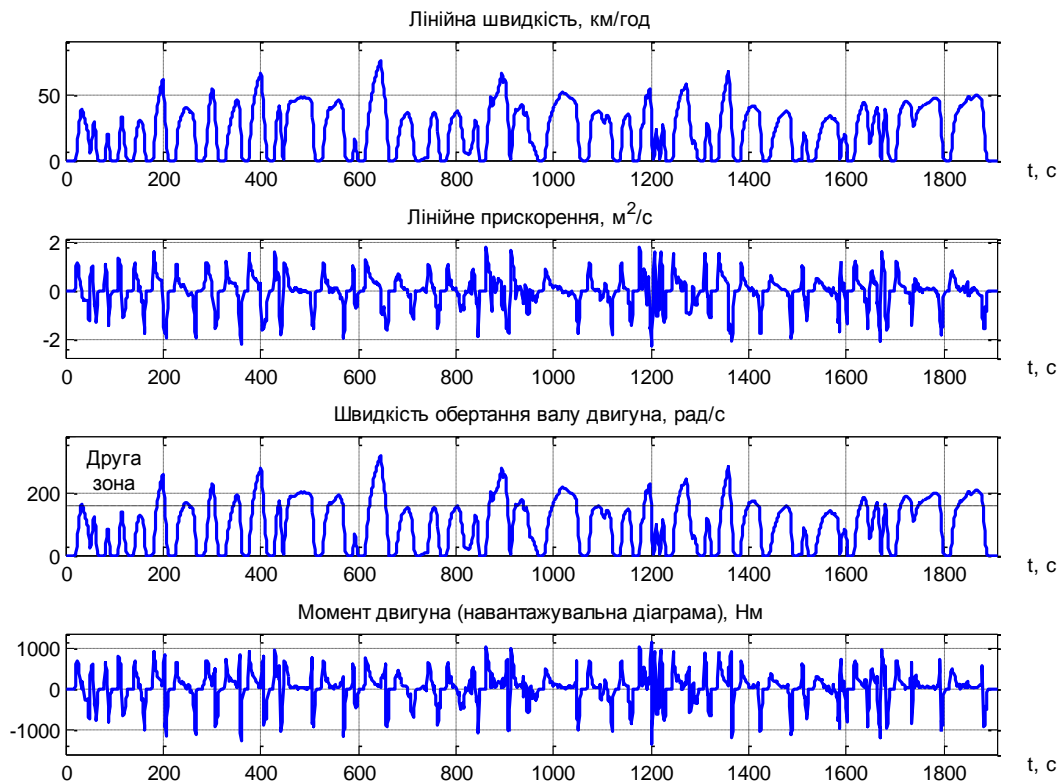


Рисунок 2 – Траєкторія зміни швидкості / прискорення ТЗ в міському циклі та навантажувальна діаграма

Потужність двигуна, необхідна для здійснення даного циклу руху визначається як:

$$P_{ов} = k_3 \cdot M_e \cdot \omega_n = 1.1 \cdot 372 \cdot 157 = 64.2 \text{ кВт},$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу, який прийнято рівним  $k_3=1.1$ .

З каталогу тягових електродвигунів оберемо асинхронний тяговий двигун моделі АТД-4 попередньо перерахувавши його потужність за умови живлення від мережі 50 Гц. Перераховані значення:  $P_{овн} = 67$  кВт,  $\omega_{но} = 156.3$  рад/с,  $M_{овн} = 428.7$  Нм,  $U_{но} = 298$  В. Оскільки, значення моменту інерції двигуна відповідає заданому значенню у вихідних даних, то перерахунок динамічного моменту не потрібен.

**Висновки.** Представлено методику розрахунку, що дозволяє визначати величину потужності тягового електродвигуна та проводити уточнення розрахунку з використанням експериментальних даних. Для електробусу обрано тяговий асинхронний двигун моделі АТД-4 з перерахованою потужністю 67 кВт.

#### Перелік посилань

1. Богдан А-092, Дизельные двигатели. Руководство по ремонту и эксплуатации. Каталог деталей и сборочных единиц. Цветные электросхемы. - Д.: Издательство Монолит, 2009. - 370 е.: ил.
2. Larminie J. Electric Vehicle Technology Explained / J. Larminie, J. Lowry. – West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 296 с.
3. Appendix C - Orange County Bus Cycle [Електронний ресурс] // ARB. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arb.ca.gov/regact/bus02/appc.pdf>.