

АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЛОКОМОТИВА З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМАЛЬНИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ

Вещиков Г.В., магістр, Шаповал І.А., д.т.н., доц.

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

Спінул Л.Ю., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. На сьогодні, у період стрімкого розвитку технологій, що пов'язані з електроенергетикою, електричний транспорт є основним способом переміщення людей як всередині міста, так і за його межами. Значний ріст кількості жителів мегаполісів та поступове впровадження в різні сфери керованого електроприводу [1] змінного струму ставить перед нами завдання вдосконалення транспорту внаслідок підвищення енергетичної ефективності за допомогою збільшення коефіцієнту корисної дії та збільшення пасажиромісткості рухомого складу. У нашому випадку буде розглянуто локомотив як екологічно чистий транспортний засіб громадського користування з високою перевізною здатністю.

Найпоширенішим та найнадійнішим пристроєм для приведення в рух різних механізмів є асинхронний двигун, але в некерованому електроприводі він не має змоги реалізації всіх своїх можливостей. Для цього використовуються перетворювачі частоти, побудовані на основі керуючого мікроконтролера та керованого інвертора. Він дає змогу значно підвищити ефективність електропривода та дає змогу керувати швидкістю за певним законом, якого потребує технологічний процес, а також забезпечує плавний пуск зі зменшенням пускових струмів. Тому керований електропривод змінного струму набуває все більшої популярності.

Перетворювач частоти разом з асинхронним двигуном дає змогу відмовитися від уже застарілого приводу постійного струму з аналоговими колами керування. У випадку рейкового транспорту це дає можливість значно зменшити масогабаритні показники силового обладнання.

Актуальність роботи. Вектор розвитку рухомого складу високошвидкісного і швидкісного пасажирського залізничного транспорту спрямований на концепцію розподіленої тяги з електроприводом [2] на базі електродвигунів змінного струму (асинхронних, синхронних), незмінність складу потягу та максимальне пристосовування його до конкретних умов певної дороги.

На сьогодні в Україні найважливішим завданням є створення перспективного енергоефективного рухомого складу [3], який би був придатний для експлуатації в умовах наявної колії та системи електропостачання.

Мета роботи. Проектування та дослідження енергоефективного тягового асинхронного електроприводу локомотива з використанням стратегій оптимального керування зі зменшенням електричних втрат.

Методика та результати досліджень. *Опис оптимальних стратегій керування АД.* Одним із простих та досить ефективних методів зменшення

електричних втрат є стратегія «Максимальний момент на ампер» [4] (ММА, англ. МТРА – Maximum Torque pro Ampere), яка полягає в забезпеченні максимально можливого відношення електромагнітного моменту двигуна до струму статора. Така стратегія приводить до мінімізації втрат у міді статора і сприяє підвищенню ККД в усталеному режимі.

Ця стратегія базується на тому, що величину електромагнітного моменту двигуна можна змінювати регулюванням як моментоутворюючої складової струму статора, так і потокозчеплення ротора, яке зі свого боку залежить від потокоутворюючої складової струму статора. Отже, завдання полягає у пошуку такого співвідношення між складовими струму статора i_{sd} та i_{sq} , які утворюють заданий момент за мінімально можливою амплітудою струму.

Для знаходження цього співвідношення потокоутворююча складова виражається через потокозчеплення ротора ψ_r , а моментоутворююча – через електромагнітний момент T та потокозчеплення ψ_r :

$$i_{sd} = \psi_r / L_m, \quad i_{sq} = T / (k_T \psi_r), \quad (1)$$

де L_m – індуктивність намагнічування, $k_T = 1,5 z_p k_r$ – коефіцієнт моменту; z_p – кількість пар полюсів, $k_r = L_m / L_r$ – коефіцієнт магнітного зв'язку, L_r – індуктивність обмотки ротора, амплітуда струму статора матиме таке значення:

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} = \sqrt{(\psi_r / L_m)^2 + (T / (k_T \psi_r))^2}, \quad (2)$$

маємо функцію, що треба мінімізувати:

$$f(\psi_r) = i_s / T = \sqrt{(\psi_r / TL_m)^2 + (1 / (k_T \psi_r))^2} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Залежності d - і q -складових струму статора від моменту:

$$i_{sdMTPA}(T) = i_{sqMTPA}(T) = \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}}, \quad (4)$$

що приводить також до мінімізації втрат електричної енергії в обмотках статора:

$$\Delta P_{sCu} = 3R_s I_s^2 = \frac{3}{2} R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) = \frac{3}{2} R_s i_s^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

де I_s , i_s – діюче (root mean square) та амплітудне (peak) значення фазного струму статора відповідно, R_s – активний опір обмотки статора.

Залежність струму від моменту буде:

$$i_{smin}(T) = \sqrt{\frac{2T}{k_T L_m}}. \quad (6)$$

У результаті дістаємо співвідношення i_{sq} до i_{sd} із заданим значенням моменту:

$$i_{sq} = \frac{T}{k_T L_m i_{sd}}. \quad (7)$$

Для збільшення ККД потрібно врахувати втрати в міді. З цією метою потрібно мінімізувати рівняння:

$$\Delta P_{\Sigma Cu} = \frac{3}{2} (R_s i_s^2 + R_r i_r^2) = \frac{3}{2} \left[R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \right] \rightarrow \min, \quad (8)$$

де R_r – активний опір обмотки ротора.

Дістаємо такі співвідношення:

$$\begin{aligned} \psi_{ropt} &= \sqrt{\frac{2TL_r}{3z_p}} \lambda, \quad \lambda = \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}} = \sqrt{1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s}} > 1, \\ i_{sdopt} &= \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \lambda, \quad i_{sqopt} = \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \frac{1}{\lambda}, \quad R_{sr} = R_s + k_r^2 R_r, \end{aligned} \quad (9)$$

де ψ_{ropt} – оптимальне значення потокозчеплення ротора.

Визначимо мінімізовані втрати та ККД, що досягаються за їхньої мінімізації та в разі нехтування іншими видами втрат:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma Cu \min} &= \frac{3}{2} \left[R_s i_{sdopt}^2 + (R_s + k_r^2 R_r) i_{sqopt}^2 \right] = \\ &= \frac{3}{2} \left[R_s \frac{T}{k_T L_m} \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}} + R_{sr} \frac{T}{k_T L_m} \sqrt{\frac{R_s}{R_{sr}}} \right] = \sqrt{R_s R_{sr}} \frac{T}{k_r L_m z_p}, \\ \eta_{uopt} &= \frac{P_m}{P_m + \Delta P_{\Sigma Cu \min}} = \frac{T\omega}{T\omega + \sqrt{R_s R_{sr}} \frac{T}{k_r L_m z_p}} = \frac{\omega p k_r L_m}{\omega z_p k_r L_m + \sqrt{R_s R_{sr}}}. \end{aligned} \quad (10)$$

З останньої формули видно, що за мінімізації втрат у міді з нехтуванням інших видів втрат усталене значення ККД не залежить від величини моменту. У разі нерегульованого потокозчеплення ротора (типова система векторного керування):

$$\Delta P_{\Sigma Cu} = \frac{3}{2} \left[R_s i_{sdopt}^2 + (R_s + k_r^2 R_r) i_{sqopt}^2 \right] = \frac{3}{2} \left[R_s \frac{T}{k_T \psi_{r0}} + R_{sr} \frac{\psi_{r0}}{L_m} \right], \quad (11)$$

$$\eta_u = \frac{P_m}{P_m + \Delta P_{\Sigma Cu \min}} = \frac{\omega}{\omega + \frac{3}{2} \left[R_s \frac{1}{k_T \Psi_{r0}} + R_{sr} \frac{\Psi_{r0}}{TL_m} \right]},$$

звідки видно, що в разі зменшення моменту знижується і ККД.

Для запобігання режиму насичення магнітної системи АД необхідно обмежувати потокозчеплення ротора на рівні номінальної величини. Гранична величина електромагнітного моменту наведена нижче:

$$T_{\lim \text{МТРА}} = \frac{3z_p}{2L_r} \Psi_{rn}^2 = T_n \left(\frac{\Psi_{rn}}{\Psi_{r\text{МТРА}}(T_n)} \right)^2, \quad (12)$$

де T_n – номінальне значення моменту двигуна, Ψ_{rn} – номінальне значення потокозчеплення ротора.

Відповідно в разі мінімізації сумарних втрат у міді:

$$T_{\lim \text{opt}} = \frac{3z_p}{2L_r \lambda} \Psi_{rn}^2 = T_n \left(\frac{\Psi_{rn}}{\Psi_{r\text{opt}}(T_n)} \right)^2. \quad (13)$$

Алгоритм системи з мінімізацією втрат у міді включає в себе (9) і (13).

У статті досліджується система на базі тягового асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором СТА1200 [5], що має такі параметри:

- Номінальна потужність: $P_N = 1200$ кВт,
- Кількість фаз статора: $m=3$,
- Число пар полюсів: $p=3$,
- Умовно номінальна частота мережі: 56,9 Гц,
- Номінальна фазна напруга: $U_N = 1080$ В,
- Синхронна частота обертання: 1138 об/хв,
- Номінальний момент на валу: 10070 Нм,
- Фазний струм статора в номінальному режимі (діюче значення): 465 А,
- Коефіцієнт потужності: 0,833,
- Коефіцієнт корисної дії: 0,955.

Розрахунок навантаження було здійснено відповідно до [6, 7].

Першим дослідом було моделювання розгону локомотива. Керування швидкістю проводиться за допомогою змінювання завдання на момент. У разі використання стратегії ММА було отримано такі графіки перехідних процесів (рис. 1 – 3):

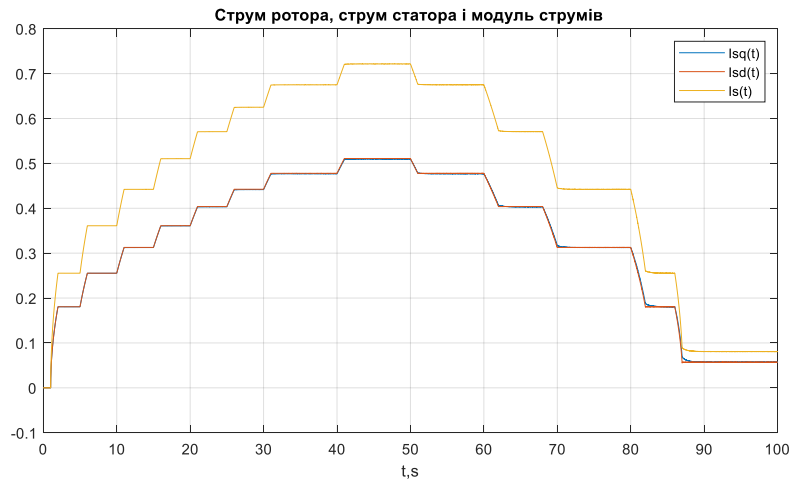


Рисунок 1 – Перехідні процеси струмів статора в разі використання стратегії «максимальний ампер на момент»

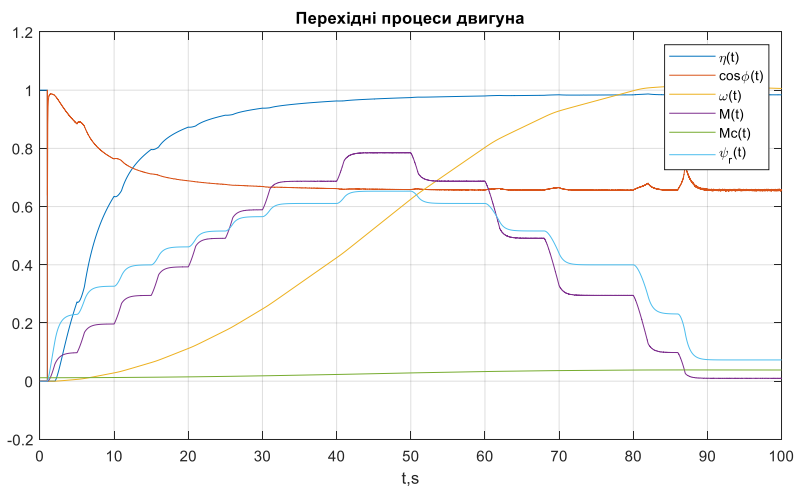


Рисунок 2 – Характеристики зміни ККД, cosφ, кутової швидкості, моменту двигуна, моменту навантаження та потокозчеплення

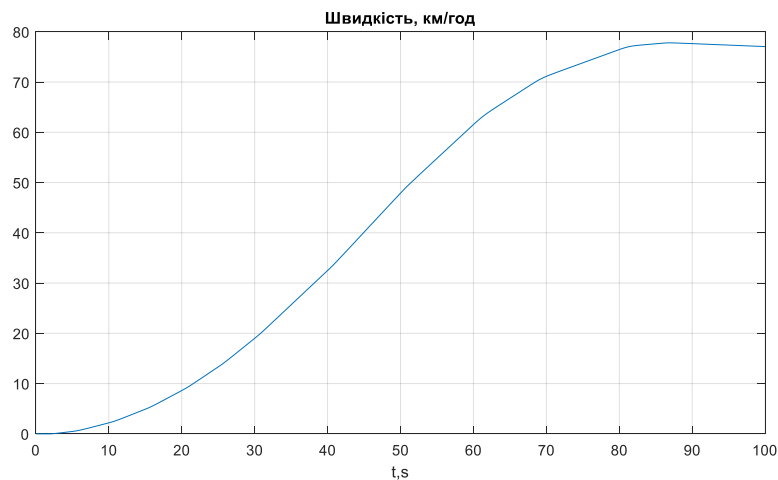


Рисунок 3 – Графік розгону локомотива
У разі мінімізації втрат у міді матимемо такі графіки (рис. 4 – 6):

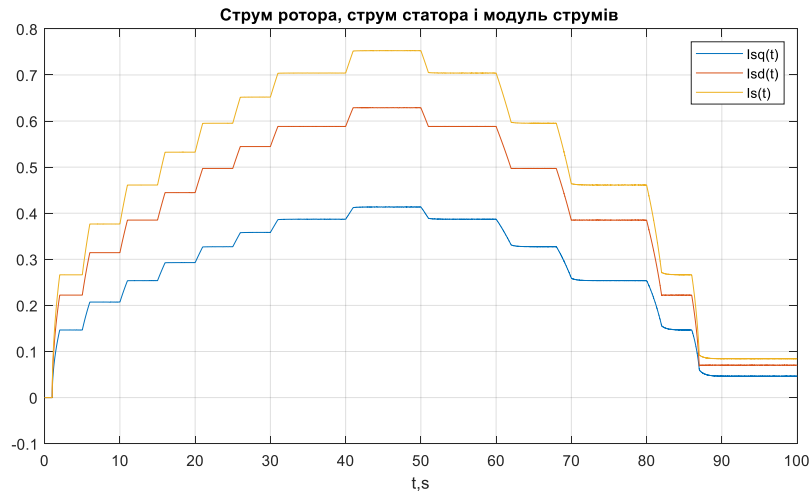


Рисунок 4 – Перехідні процеси струмів статора зі зменшенням втрат у міді

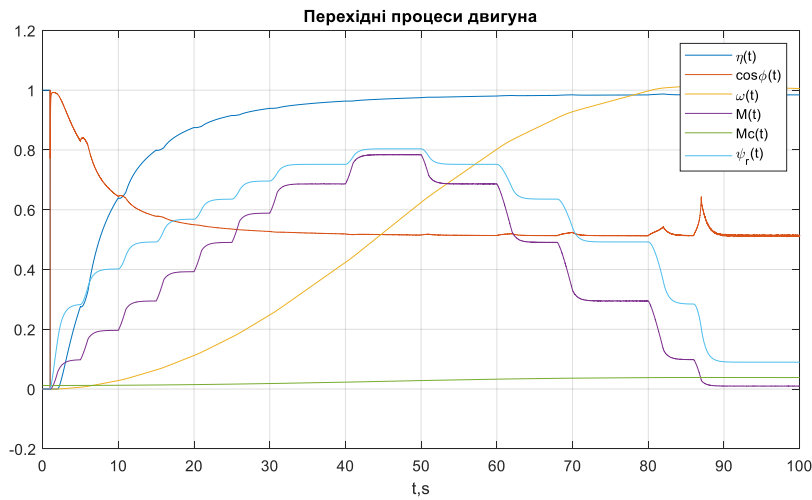


Рисунок 5 – Характеристики зміни ККД, $\cos\phi$, кутової швидкості, моменту двигуна, моменту навантаження та потокозчеплення

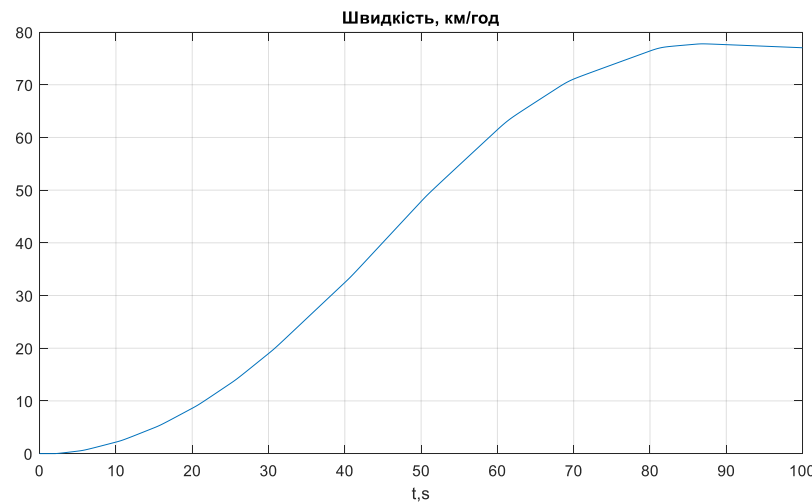


Рисунок 6 – Графік розгону локомотива зі зменшенням втрат у міді

У другому досліді було додано навантаження у вигляді 10 вагонів сумарною масою 600 тонн. Порядок моделювання такий самий, як і в першому досліді – «максимальний момент на ампер» (рис. 7 – 9) та зменшення втрат у міді (рис. 10 – 12) відповідно.

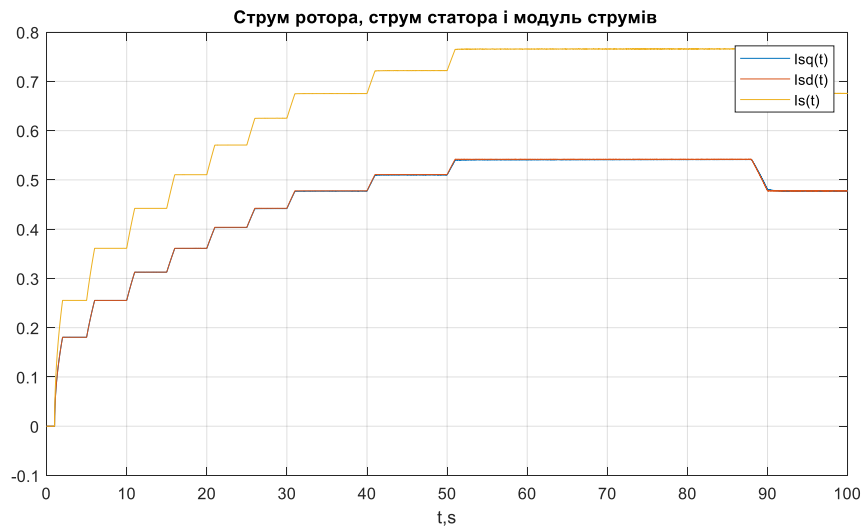


Рисунок 7 – Перехідні процеси струмів статора в разі використання стратегії «максимальний ампер на момент»

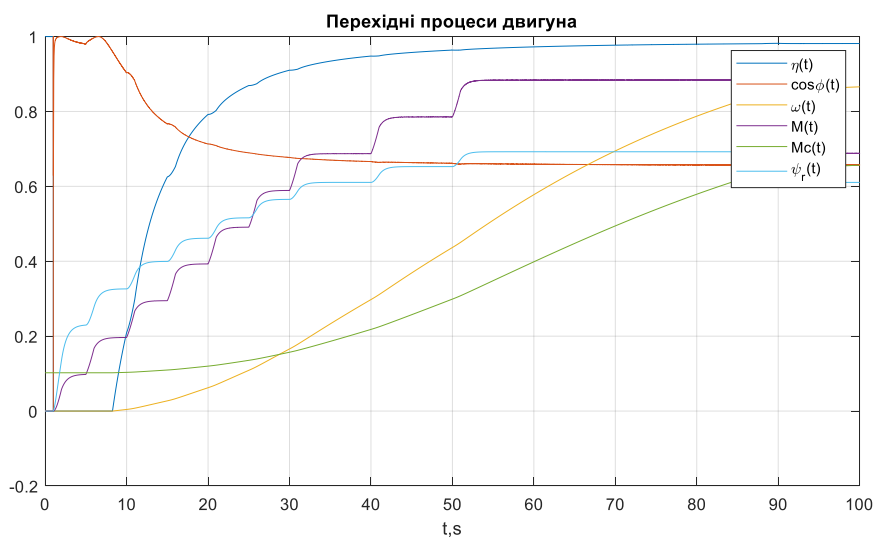


Рисунок 8 – Характеристики зміни ККД, $\cos\phi$, кутової швидкості, моменту двигуна, моменту навантаження та потокозчеплення

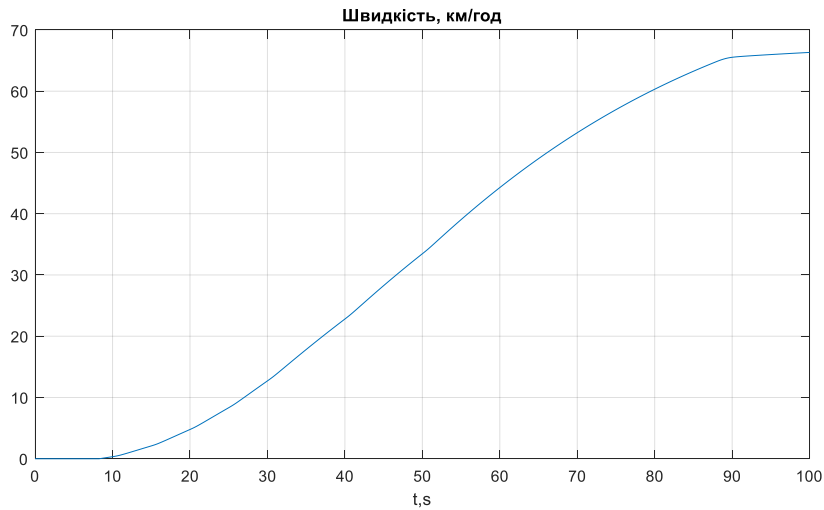


Рисунок 9 – Графік набору швидкості рухомого складу

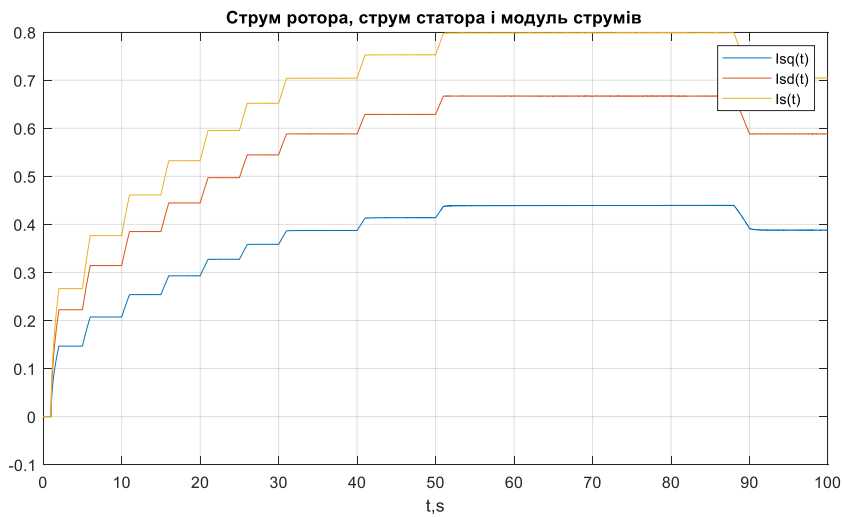


Рисунок 10 – Перехідні процеси струмів статора зі зменшенням втрат у міді

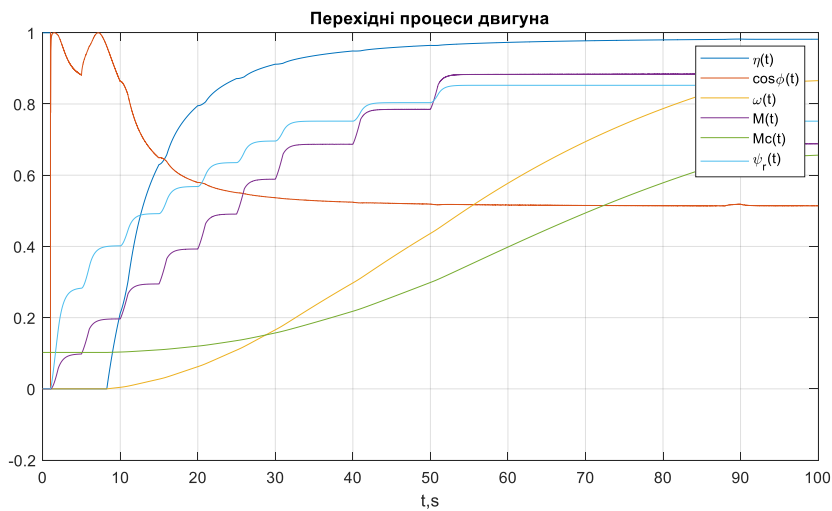


Рисунок 11 – Характеристики зміни ККД, $\cos\phi$, кутової швидкості, моменту двигуна, моменту навантаження та потокозчеплення

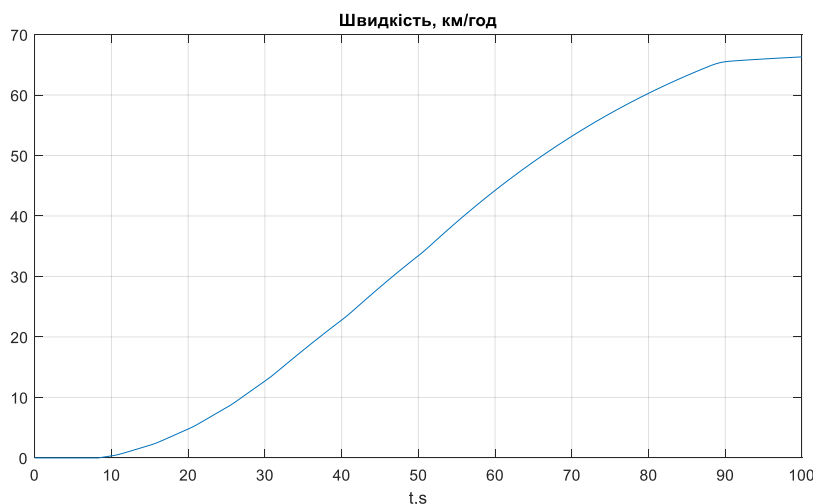


Рисунок 12 – Графік набору швидкості рухомого складу

Висновки: Розглянута система з використанням оптимальних стратегій керування має кращі енергетичні показники ніж звичайні системи векторного керування внаслідок зменшення електричних втрат в АД. Така система керування дає змогу зменшити струми не погіршуючи тягові характеристики електроприводу, що також зменшить нагрів двигунів та продовжить термін їхньої експлуатації.

Перелік посилань

1. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.
2. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины. Учебник для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1991.- 343 с.
3. Тархов С., Козлов К., Оландер А. Электротранспорт Украины. Энциклопедический путеводитель. — К.: Варто, 2011.- 864 с.
4. Калугін Д.В., Толочко О.І. Огляд сучасних методів мінімізації електричних втрат в асинхронному двигуні // «Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики», 2017. – С. 456-460.
5. ТЯГОВИЙ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН СТА-1200 //[Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://em.fea.kpi.ua/index.php/nauka/rozrobky-kafedry/338-tyagovij-asinkhronnij-dvigun-sta-1200>
6. Сидяков В.А., Андреева Л.А., Колчанов А.Г. Актуализация правил тяговых расчетов на промышленном железнодорожном транспорте / Методическое пособие. М.: 2016. – 95 с.
7. Пушков П.М., Андрейченко В.П., Кульбашный А.В. Методические указания к практическим и самостоятельным занятиям по тяговым расчетам по дисциплине «Основы электрической тяги», Харьков, ХНАГХ, 2008. 86с.