

УДК 623.41

ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЯК СКЛАДОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОТРАКТОРА

*В. Чумакевич, к.т.н., К. Прокопенко, інж., І. Загуста, магістр.
Львівський національний аграрний університет*

Ключові слова: асинхронний двигун, схема заміщення, структурна схема, електротрактор.

На основі проведених досліджень в статті зроблено висновок про можливість використання асинхронного двигуна А225М2 для приводу електротрактора.

Постановка проблеми. Ера використання електроприводів на транспорті розпочалась 13 вересня 1938 року, коли на Неві випробували перший водний електрохід який вмщував до 12 осіб. У 1979 році французи Кретека та Фелікс запропонували використовувати електроорні машини, що знаменує собою початок ери використання електричної енергії для приводу тягових засобів у сільському господарстві. Використання електричної енергії є одним з альтернативних напрямів підвищення економічності та екологічності транспортних засобів. Тому дослідження можливості застосування її в сільськогосподарських машинах є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження можливості використання електротракторів проводились у СРСР з кінця 20-х років ХХ сторліття професорами Дідебулідзе та Аміраджибі. На колісному тракторному шасі був встановлений електродвигун змінного струму напругою 220 В, потужністю 14,5 кВт з подачею напруги від мережі до електродвигуна через гнучкий кабель завдовжки 200-250 м, який намотувався на барабан. Ця конструкція виявилася непрацездатною внаслідок технічної недосконалості. Інженер В. А. Пічак на базі теплового трактора ЧТЗ-60 спробував спроектувати гусеничний трактор з двигуном потужністю 35 кВт/год на напругу 1000 В, але й ця конструкція не була доведена до виробництва. Перший працездатний електротрактор під маркою ВІМЭ-2 (конструкції П. Н. Листова, В. Г. Стеценка та ін.) з'явився в 1937 р. (рис. 1,а). Ця конструкція була створена також на базі трактора ЧТЗ-60, у якого двигун внутрішнього згорання був замінений електричним двигуном трифазного струму потужністю 48 кВт на робочу напругу 500 В. Подальші дослідження проводили у Москві, Челябінську та Харкові (рис. 1, б, в, г).

Перші робочі конструкції (рис. 2, б, в) передбачали наявність спеціальних станцій живлення, з якими електротрактори з'єднувались проводами. Подальші дослідження (див. рис. 1, г) показали можливість створити автономні засоби.

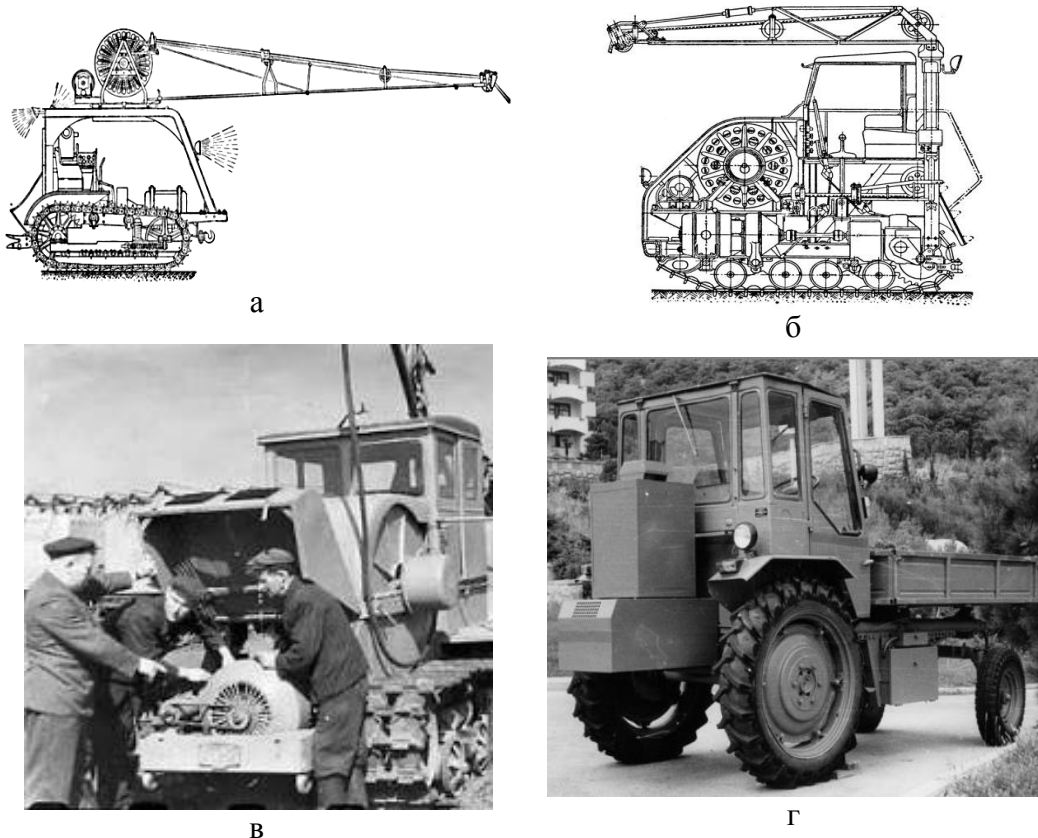


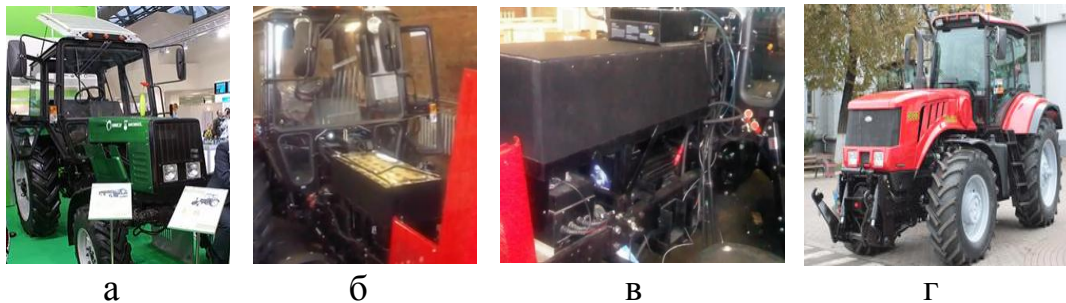
Рис. 1. Електротрактори:
а – ВИМЭ-2, 1937 р.; б – ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ, 1949 р.; в – ХТЗ-12, 1952 р.; г – електротрактор на випробуваннях в Криму в 70-ті роки ХХ ст..

Необхідно зазначити, що одним із перших сучасних серійних зразків може стати електротрактор, створений в компанії MOBEL (див. рис. 2), на базі серійного трактора Білорусь 920 в який було встановлено двигун потужністю 61 кВт, що живиться від літєвих акумуляторів Ліотех ємністю 200 А/год з робочою напругою двигуна 300 В. Тривалість роботи трактора після зарядки батарей - 4 години, час швидкої зарядки - 30 хвилин. У конструкції трактора збережена синхронізована коробка передач.

13 лютого 2012 року в м. Казані в рамках наради з впровадження електротранспорту на території Татарстану компанія «МОБЕЛ» передала

Міністерству транспорту та дорожнього господарства Республіки Татарстан діючий зразок електротрактора на платформі моделі "Беларусь - 920" для випробувань у реальних умовах. Проведені випробування показали, що загальні витрати з експлуатації електротрактора на одну мотогодину склали 23 рублі, у той час як витрати на аналогічний трактор з двигуном внутрішнього згоряння складами 292 рублі.

Також на Мінському тракторному заводі підготовлений до серійного виробництва електротрактор «Беларус-3023» (див. рис. 2, г), який комплектується двигунами Detroit Diesel або Deutz потужністю 300 к.с., які приводять у дію асинхронний генератор потужністю 20 кВт, що живить тяговий електродвигун. Результати випробувань показали, що трактор с електромеханічною трансмісією витрачає на 15-20 % менше палива порівняно з машиною, яка має класичну механічну трансмісію.



а

б

в

г

Рис. 2. Сучасні електротрактори:

а – загальний вигляд трактора, який створений у компанії «MOBEL»; б – літєві акумулятори «Ліотех»; в – силовий електропривід трактора; г – сучасний електротрактор Мінського заводу «Беларус-3023»

У національному університеті «Львівська політехніка» є низка фахівців, (професори Я.Ю. Марущак, І.З. Щур та інші), які займаються проблемою використання електричної енергії на транспортних засобах, починаючи з розробки електроприводу силової передачі першого «місячного трактора», як місяцехід називали в СРСР, до досліджень по створенню сучасного електромобіля. Співкування та співпраця з ними стали передумовою наших досліджень.

Постановка завдання. Мета дослідження - вивчити можливості використання асинхронного двигуна в електротракторі як силового агрегату.

Виклад основного матеріалу. Останнім часом найпоширенішими електродвигунами стають асинхронні, що спонукає перевірити можливість використання їх як приводні механізми. Тож постає завдання перевірити, чи

задовольняють характеристики конкретного типу асинхронного двигуна умови роботи.

Сьогодні існує безліч моделей, які описують процеси в асинхронних двигунах та дають змогу проводити їх дослідження. Наприклад, проста модель лінеаризованої моделі асинхронного двигуна (рис. 3) побудована на основі формули Клосса.

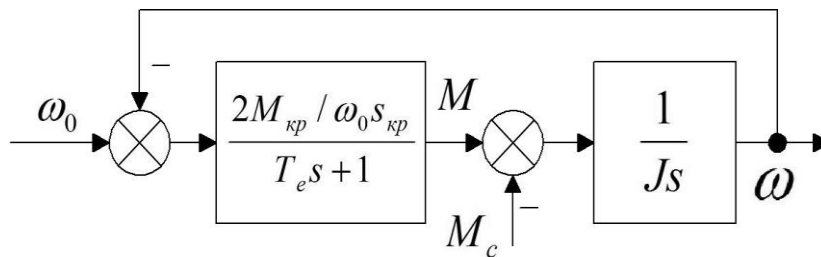


Рис 3. Структурна схема лінеаризованої моделі асинхронного двигуна.

Статична модель є більш уточненою і будується на використанні заступних схем асинхронних двигунів (АД).

Відомі три заступні схеми АД: Т-подібна, Г-подібна і Г-подібна уточнена, які забезпечують різну точність або різну наближеність до реальних процесів у двигуні, оскільки також є наближеними моделями оригіналу.

У Т-подібній заступній схемі (рис. 4) контур намагнічування r_μ , x_μ під'єднаний послідовно після первинного (статорного) кола. Тому струм намагнічування i_μ , який створює основний магнітний потік Φ_m , зумовлює разом з $\cos \varphi_2$ непропорційність між моментом і струмом статора двигуна.

Обчислити значення параметрів схеми нескладно за відомостями, які подаються у звичайних каталогах чи довідкових матеріалах.

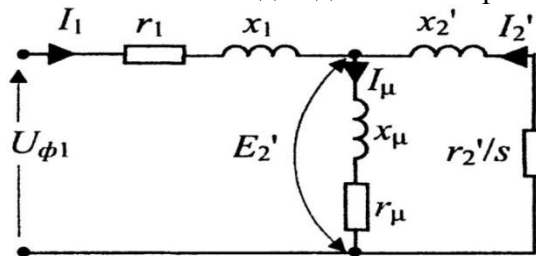


Рис. 4. Т- подібна заступна схема фази двигуна.

Попередні дослідження дозволили обрати асинхронний двигун А225М2. Технічні параметри А225М2: $P_n = 55$ кВт, $n_n = 2955$ об/хв, $I_{c0} = 42$ А,

$r_1 = 0,125$ Ом, $x_1 = 0,23$ Ом, $r_2 = 0,055$ Ом, $x_2 = 0,225$ Ом, $k_e = 1,4$, $U = 380$ В, $\cos \varphi_0 = 0,06$. Проведемо його дослідження.

Повний опір неробочого ходу:

$$z_0 = \frac{U_{\phi 1}}{I_{c0}} = \frac{220}{42} = 2,2 \text{ Ом.} \quad (1)$$

Індуктивний та активний опори неробочого ходу:

$$x_0 = x_{\mu} + x_1 = x_0 \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 5,238 \sqrt{1 - 0,06^2} = 2,196 \text{ Ом;} \quad (2)$$

$$r_0 = r_{\mu} + r_1 = z_0 \cdot \cos \varphi = 5,238 \cdot 0,06 = 0,132 \text{ Ом.} \quad (3)$$

Індуктивний та активний опори контуру намагнічування:

$$x_{\mu} = x_0 - x_1 = 5,23 - 0,23 = 1,966 \text{ Ом;} \quad (4)$$

$$r_{\mu} = r_0 - r_1 = 7 \times 10^{-3} \text{ Ом.} \quad (5)$$

Індуктивність головного потоку (контуру намагнічування):

$$L_m = \frac{x_{\mu}}{\omega_{0e}} = \frac{1,966}{2\pi \cdot 50} = 4,9734 \times 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Зведені до статора опори нерухомого ротора:

$$r_2' = r_2 \cdot k_e' = 0,055 \cdot 1,4^2 = 0,108 \text{ Ом;} \quad (6)$$

$$x_2' = x_2 \cdot k_e' = 0,225 \cdot 1,4^2 = 0,441 \text{ Ом.} \quad (7)$$

Індуктивність полів розсіювання;

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_{0e}} = \frac{0,23}{314,16} = 7,321 \cdot 10^{-3} \text{ Гн;}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_{0e}} = \frac{0,441}{314,16} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Повні еквівалентні індуктивності фаз статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,0166 \text{ Гн;}$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0,0173 \text{ Гн.}$$

Повні опори:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{0,125^2 + 0,23^2} = 0,262 \text{ Ом;} \quad (8)$$

$$z_2' = \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2} = \sqrt{0,108^2 + 0,441^2} = 0,453 \text{ Ом;} \quad (9)$$

$$z_{\mu} = \sqrt{r_{\mu}^2 + x_{\mu}^2} = 1,782 \text{ Ом.} \quad (10)$$

За цими отриманими даними статичну механічну характеристику $M(s)$ можна побудувати, послідовно обчисливши:

$$z_2' = \sqrt{(r_2'/s) + x_2'^2}; \quad E_1 = U_{\phi 1} - I_1 \cdot z_1; \quad I_2' = \frac{E_1}{z_2'}; \quad I_1 = \frac{U_{\phi 1}}{z_1 + \frac{z_2' \cdot z_{\mu}}{z_2' + z_{\mu}}};$$

$$M = \frac{3I_2'^2 \cdot r_2'}{\omega_{0e} \cdot s} \quad (11)$$

Таку саму залежність $M(s)$ можна отримати з виразів:

$$M = \frac{3E_1 I_2'^2 \cdot \cos \varphi_2}{\omega_{0e}}, \quad (12)$$

де $\cos \varphi_2 = r_2/z_2$.

Широко використовується для побудови механічної характеристики асинхронного двигуна вже згадувана раніше відома формула Клоса:

$$M = \frac{M_{кр}(2 + q)}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}} + q}, \quad (13)$$

$$M_{кр} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right)}; \quad s_{кр} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}};$$

$$q = 2r_1 \cdot s_{кр}/r_2'.$$

Отримання виразів (14) ґрунтується на Г-подібній заступній схемі (рис. 5) і не враховує залежність струму намагнічування I_{μ} , а, отже, і магнітного потоку Φ_m від струму статора, тому що контур намагнічування винесений на затискачі первинного контуру, що зрозуміло з таких виразів:

$$I_2' = \frac{U_{\phi 1}}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}; \quad (14)$$

$$M = \frac{3I_2'^2 \cdot r_2'/s}{\omega_0} = \frac{3U_{\phi 1}^2 \cdot r_2'}{\omega_0 s ((r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2)}, \quad (15)$$

що далі приводить до виразу (15).

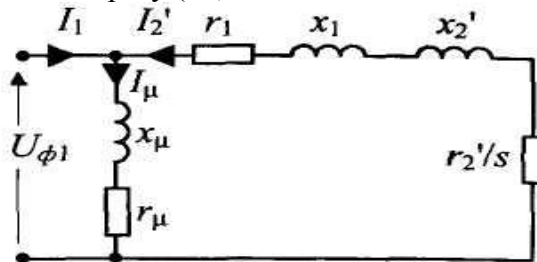


Рис. 5. Г-подібна заступна схема фази асинхронного двигуна.

На рис. 6. зображені характеристики $M(s)$ асинхронного двигуна для різних заступних схем. Характеристика 1 побудована за розрахунками виразів (4) і (5), а характеристика 2 - виразів (6) і (8).

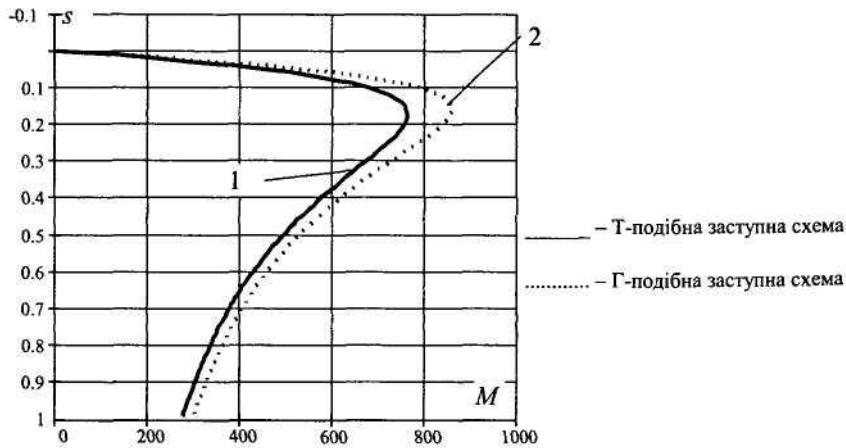


Рис. 6. Механічні характеристики моделей асинхронного двигуна, побудованих за Т-подібною (1) та Г-подібною (2) заступними схемами.

Замість Г-подібної можна користуватись Г-подібною уточненою схемою (рис. 6). Така схема завдяки застосуванню коефіцієнта поправки $\sigma_1 = z_1/z_m$ наближає її до Т-подібної та забезпечує достовірніше моделювання, ніж Г-подібна.

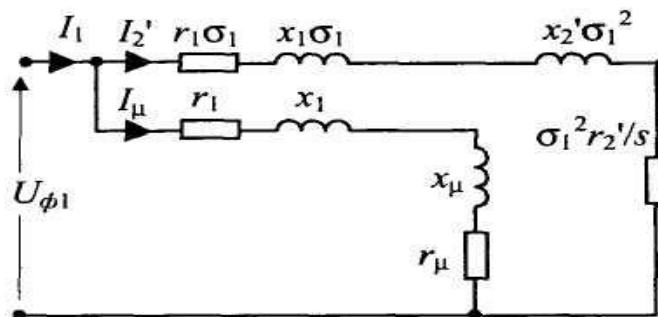


Рис. 7. Уточнена Г-подібна заступна схема фази асинхронного двигуна

Таким чином використання уточненої заступної схеми асинхронного двигуна дає змогу більш точно враховувати особливості двигунів.

Динамічні моделі асинхронного двигуна, побудовані на основі однофазних заступних схем. У разі під'єднання кола R, L до джерела синусоїдної напруги $U_m \sin \omega t$ у колі буде протікати перехідний струм, який складається з вимушеної та вільної складових. Амплітуда вимушеної складової струму:

$$i_{\text{вим}} = \frac{U_m}{Z}, \quad (16)$$

де $z = \sqrt{R^2 + (\varpi \cdot L)^2}$, а вільна складова: $i_{ec} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$,

де $\tau = \frac{L}{R}$, $A = -\frac{U_m}{z}$ для $t = 0$.

На підставі цього однофазну заступну схему R-L кола змінного струму будемо розглядати як еквівалентне коло постійного струму, в якому $U = U_{\phi 1}$, $z=R$, а $T=\tau=L/R$ - електромагнітна стала часу. Це дає змогу доволі просто, застосувавши закон Кірхгофа для кола постійного струму, створювати динамічні моделі асинхронних і синхронних двигунів.

Математична та структурна моделі асинхронного двигуна, побудовані за Г-подібною заступною схемою. Значення моменту будемо обчислювати за виразом

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_0}, \quad (17)$$

де $\omega_0 = 2\pi f_1/p_n$ - синхронна частота поля статора для f_1 частоти струму статора;

$P_{em} = 3i_2'^2 r_2' / s$ - електромагнітна потужність, яка передається в роторне коло двигуна.

$s = (\omega_0 - \omega \varpi) / \omega_0$ - ковзання.

$$M = \frac{3i_2'^2 r_2'}{\omega_0 s} = \frac{3i_2'^2 r_2'}{\omega_0 - \omega \varpi}. \quad (18)$$

Зведене значення струму ротора i_2' визначимо з такого диференціального рівняння, складеного для кола постійного струму, еквівалентного колові змінного струму за рис. 6:

$$U_{\phi 1} = i_2'(z_1 + z_1') + (L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}) \frac{di_2'}{dt};$$

де

$$(L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}) = \frac{x_1 + x_2'}{\varpi_1} = \frac{x_k}{\varpi_1}; \quad \varpi_1 = 2\pi f_1; \quad z_2' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2};$$

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}.$$

Разом з відомим рівнянням механічної частини математичну модель асинхронного двигуна складають такі рівняння

$$\frac{di_2'}{dt} = \frac{\varpi_1}{x_k} (U_{\phi 1} - i_2'(z_1 + z_1'));$$

$$M = \frac{3 \cdot i_2'^2 \cdot r_2'}{\omega_0 - \omega \varpi}; \quad (19)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{M - M_c}{J_\Sigma}$$

Структурна модель згідно з рівняннями (19) зображена на рис. 8.

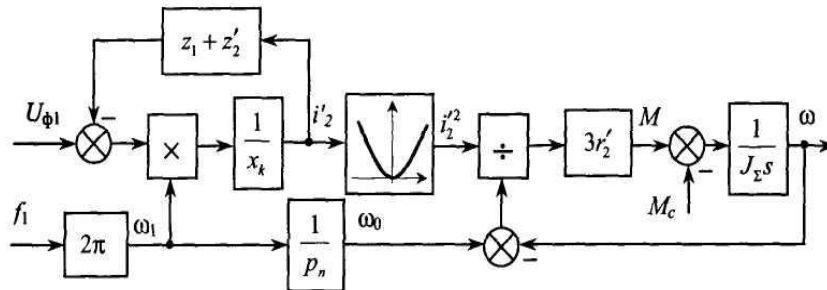


Рис. 8. Структурна модель асинхронного двигуна, яка побудована на основі Г-подібної заступної схеми фази двигуна.

Така модель дає змогу моделювати динамічні режими, наприклад, запуск на природній характеристиці двигуна з фазним чи короткозамкненим ротором.

На рис. 9. показано графіки $\omega(t)$, $M(i)$ та $i'_2(t)$ для режимів запуску та зміни навантаження $0,1M_{\text{НОМ}} \rightarrow M_{\text{НОМ}} \rightarrow 0,1M_{\text{НОМ}}$ для моделі асинхронного двигуна, побудованої за моделлю (10) за параметрами, які ми раніше розраховували.

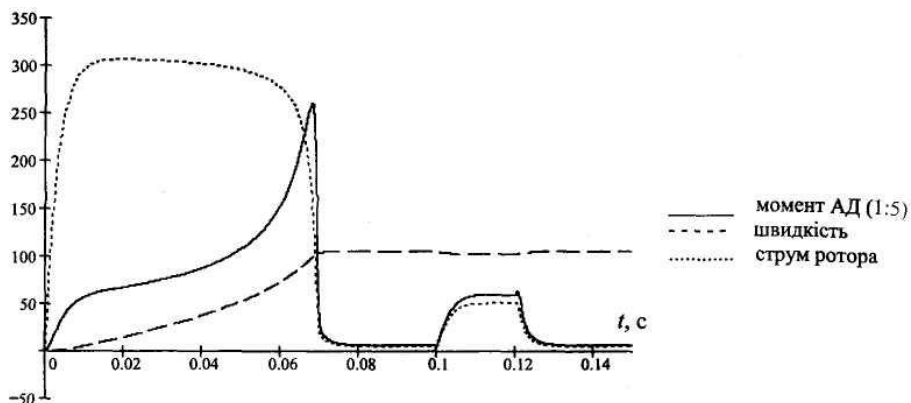


Рис. 9. Графіки динамічних режимів моделі АД на основі Г-подібної заступної схеми.

Для відтворення моделі двигуна, який працює в системі регулювання з використанням зворотного зв'язку за струмом статора, до рівнянь (10) треба додати такі рівняння:

$$\begin{cases} \frac{di_{\mu}}{dt} = \frac{\mathbb{I}_1}{x_{\mu}} (U_{\phi 1} - i_{\mu} z_{\mu}); \\ i_1 = i_2' + i_{\mu}, \end{cases} \quad (20)$$

де $z_{\mu} = \sqrt{r_{\mu}^2 + x_{\mu}^2}$.

Структурна схема математичної моделі АД, яка побудована за виразами (10) і (11), зображена на рис. 9.

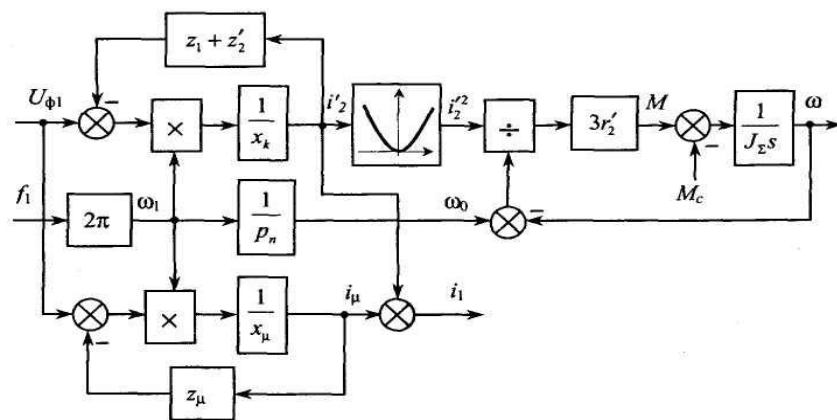


Рис. 9. Структурна схема математичної моделі асинхронного двигуна з виділенням струму статора, яка побудована на основі Г-подібної заступної схеми фази двигуна.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили можливість використання запропонованої схеми (рис. 9) для дослідження асинхронного двигуна А225М2 як привідного для силового обладнання трактора МТЗ-82.

Бібліографічний список

1. Башарин А. В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. - Л. : Энергоиздат, 1982. — 392 с.
2. Гончар В. Ф. Электрообладнання і автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок/ В. Ф. Гончар. – К. : Вища шк., 1985. – 207 с.
3. Завалій І. Ю. Водень – паливо майбутнього / І. Ю. Завалій // Бюлетень Західного наукового центру. 2009 / Національна академія наук України та Міністерство освіти і науки України. Західний науковий центр. – Львів : Паїс, 2009. – С. 119-128.
4. Костинюк Л. Д. Моделирование электроприводів / Л. Д. Костинюк , В. І. Мороз , Я. С. Паранчук – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2004. – 404 с.

5. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним корегуванням: Навч. посіб. / Я. Ю. Марущак. – Львів, Видавництво НУ „Львівська політехніка”, 2004. – 312 с.

6. Попович М. Г. Теорія електропривода : Підручник / М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін. ; за ред. М. Г. Поповича. - К.: Вища шк., 1993. – 494 с.

7. Сельскохозяйственная энциклопедия. Т. 5 (Т - Я) / Ред. коллегия: П. П. Лобанов (глав. ред.) [и др.]. Издание 3-е, переработ. – М. : Гос. изд. с.-х. лит., 1956. – 663 с.

8. Справочник по автоматизированному электроприводу / под. ред. В. А. Елисева, А. В. Шинянского. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 615 с.

Chumakevich V., Prokopenko K., Zagusta I. Research induction motor as an integral part of the electromechanical system elektrotraktora.

On the basis of the research in the article concluded the possibility of using an induction motor to drive the A225M2 elektrotraktora.

Key words: induction motor equivalent circuit block diagram elektrotraktor

Чумакевич В., Прокопенко К., Загуста И. Исследования асинхронного двигателя как составной части электромеханической системы электротрактора.

На основе проведенных исследований в статье сделан вывод о возможности использования асинхронного двигателя A225M2 для привода электротрактора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, схема замещения, структурная схема, электротрактор.