

ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Розділ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

1.1 Основні відомості про технологічний механізм

Моталки є відповідальними механізмами у комплексі обладнання прокатного стану, розташовані на вхідній і вихідній сторонах стану. Основне їх призначення – стабілізація натягу полоси при змотуванні і намотуванні у рулон. Від натягу залежать товщина і якість поверхні полоси, що прокатується, якість намотування і кількість обривів, тому в процесі роботи доцільно знижувати час перехідних процесів двигуна робочої кліти і забезпечувати такий принцип керування швидкістю моталки, щоб у період намотування (або змотування) швидкість двигуна намотувальних пристроїв змінювалася в залежності від натягу. Зазвичай натяг досягає 70% межі текучості металу, що прокатується, що призводить до створення електроприводів намотувальних пристроїв, які мають потужність двигуна до 70-80% потужності головного приводу кліти [2].

У відповідності з технологічними умовами прокатки до електроприводу робочих намотувальних пристроїв як реверсивних, так і неперервних станів пред'являються на-ступні вимоги:

- 1) підтримання постійності натягу на усіх ділянках стану у перехідних та сталих режимах;
- 2) широкий діапазон регулювання швидкостей, рівний 10:1-30:1;
- 3) плавні пуск та гальмування за мінімальний час;

- 4) можливість сумісного і роздільного керування двигунами моталок;
- 5) можливість поштовхової роботи і створення натягу покою;
- 6) жорсткість механічних характеристик;
- 7) економічність регулювання, висока перевантажувальна здатність;
- 8) експлуатаційна надійність;
- 9) високі динамічні якості, зокрема мінімальний момент інерції, великий пусковий момент та ін.
- 10) автоматичне уповільнення стану при підході зварних швів при закінченні про-катки;
- 11) аварійне гальмування при обриві полоси.

До недавнього часу сформульованим вище вимогам у найбільшій мірі задовольняв електропривод постійного струму по системі тиристорний перетворювач – двигун з незалежним збудженням [1], [2], [4].

У зв'язку зі стрімким розвитком силової перетворювальної техніки та мініатюризації мікропроцесорних систем керування все більшої розповсюдженості набувають регульовані асинхронні електроприводи з перетворювачами частоти. Асинхронний двигун у порівнянні з двигуном постійного струму має наступні переваги:

- менша початкова вартість двигуна при тій же потужності;
- підвищена надійність двигуна, особливо при використанні двигунів з короткозамкнутим ротором;
- менший момент інерції двигуна, що надає потенційну можливість покращення якості динамічних режимів електроприводу;
- більш високий коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна.

Високоякісні алгоритми частотного керування асинхронним електродвигуном забезпечують високі регульовальні характеристики такого електроприводу, забезпечують необхідний діапазон регулювання кутової швидкості електроприводу, забезпечують можливість плавного запуску та зупинки електроприводу.

1.2 Обґрунтування і вибір системи електропривода

Для реалізації вимог, що висуваються до електроприводу моталки, розділ 1.1, використовуємо асинхронний електропривод з перетворювачем частоти.

Каскадні схеми регулювання частоти асинхронного двигуна вимагають використання двигуна ускладненої конструкції і не забезпечують необхідного діапазону регулювання швидкості.

Схеми з тиристорним регулятором напруги також не забезпечують необхідного діапазону регулювання швидкості, а також не забезпечують необхідної жорсткості механічних характеристик на нижній границі діапазону регулювання швидкості.

Вентильний електропривод володіє наступними перевагами:

1) більшою швидкістю і точністю регулювання завдяки відсутності інерції; ці властивості вентильного електроприводу часто забезпечують механізму більшу продуктивність та збільшену якість продукції;

2) меншими витратами електричної енергії на одиницю продукції не тільки за рахунок більш високого ККД при номінальному навантаженні, але й внаслідок менших втрат при малих навантаженнях і при холостому ході в проміжках між робочими циклами;

3) меншою чутливістю к впливу газів і забрудненого середовища та відсутністю необхідності у складних вентиляційних пристроях;

4) більшим коефіцієнтом потужності, аніж у двигун-генератора з асинхронним двигуном.

Таким чином, вентильний електропривод у порівнянні з обертовим перетворювачем не тільки дає економію в капітальних витратах, економію втрат, але й може поліпшити ряд якісних показників електроприводу.

Використання вентильного перетворювача має, проте, і деякі негативні сторони:

1) погіршення коефіцієнту потужності пропорційно косинусу кута керування і зменшення навантажувальної здатності випрямляча при цьому. Ці

недоліки стають особливо важливими у вентильних електроприводах великої потужності. У малопотужних приводах вони не грають великої ролі. В потужних електроприводах значення фактору погіршення коефіцієнту потужності при керуванні залежить від характеру зміни споживаною приводом потужності;

2) при глибокому керуванні збільшуються пульсації випрямленої напруги і випрямленого струму, що може несприятливо відобразитися на комутації приводного електродвигуна, викликати розриви струму і коливання швидкості електродвигуна;

3) передача у мережу поштовхів струму майже без згладжування. Такий поштовх при потужних приводах з великими моментами можуть виявитися неприпустимими для живлячої мережі;

4) неминучі при регулюванні великими вентильними приводами коливання реактивної потужності призводять к коливанням напруги в живлячій мережі. При живленні приводу від обертаючогося перетворювача ці небажані явища відсутні або легко усуваються, оскільки регулювання не супроводжується споживанням реактивної потужності.

Підбиваючи деякий підсумок перевагам і недолікам вентильного електроприводу, можна зробити висновок, що його недоліки становляться вагомими лише при великій потужності приводу, однак при цьому і переваги вентильного перетворювача виступають найбільш яскраво. Остаточний вибір роду приводу може бути зроблений лише на основі порівняння і з урахуванням конкретних умов. При середній і невеликій потужності приводу недоліки вентильного перетворювача мають менше значення, чим при потужному приводі [4].

1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна

При виборі потужності двигуна основними початковими даними є потрібні моменти, які повинні бути прикладені до валу механізму, потрібні швидкості і прискорення робочого органу механізму.

Задача вибору потужності двигуна дещо ускладнюється тим, що в динамічному режимі момент, який розвивається двигуном, не дорівнює моменту статичного навантаження, а різниця – динамічний момент $J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}$ – залежить від сумарного моменту інерції приводу, в який входить і момент інерції двигуна. У зв'язку з цим задача вирішується у два етапи: попередній вибір двигуна і його перевірка по перевантажувальній здатності і по нагріву.

1.3.1 Попередній вибір двигуна

Вихідні дані для вибору двигуна зазвичай представляються у вигляді навантажувальних діаграм механізму, тобто залежностей $M_c(t)$ та $\omega(t)$ і приведенного моменту інерції J_m' . Слід відмітити, що при побудові навантажувальних діаграм двигуна часто прибігають до ідеалізації, так як для цілей вибору двигуна деталі діаграми, обумовлені особливостями конкретної характеристики, як правило несуттєві. Ідеалізована динамічна механічна характеристика моталки (навантажувальна діаграма) приведена на рис. 1.1.

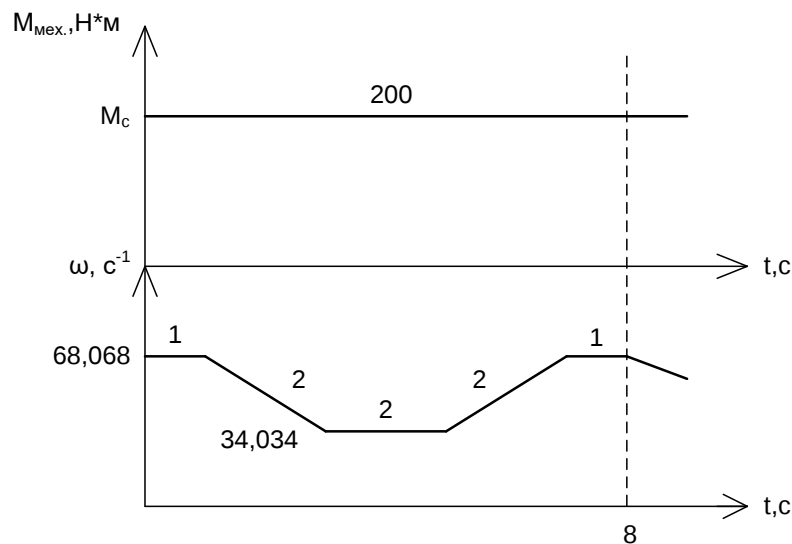


Рисунок 1.1 – Навантажувальна діаграма моталки

Цей рисунок являє собою випадок, коли механізм з $M_c = const$ працює в режимі швидкості, що змінюється.

Знаходимо середній момент статичного навантаження

$$M_{cсер.} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1.1)$$

де M_{ci} – момент статичного навантаження на i -ому інтервалі

t_i – тривалість i -го інтервалу

n – число інтервалів, де $M_c = const$

Вочевидь, $M_{cсер.} = M_c = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Номінальний момент шуканого двигуна з врахуванням динамічних навантажень може бути оцінений, як

$$M_H = (1,1-1,3)M_{cсc} = 1,2 \cdot 200 = 240 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.2)$$

Регулювання швидкості здійснюється вниз від основної, тому в якості номінальної швидкості (кутової) візьмемо $\omega_{макс.}$ моталки

$$\omega_H = \omega_{макс.} = \frac{\pi \cdot n_{макс.}}{30} = \frac{3,14 \cdot 700}{30} = 73,26 \text{ с}^{-1} \quad (1.3)$$

де $n_{макс.}$ – максимальна частота обертання моталки

Таким чином, по знайденим M_H та ω_H вибираємо по каталогу асинхронний двигун: тип – 5А200М8; $P_H=18,5$ кВт; $U_H=380\text{В}$; $I_H=41,1\text{А}$; $n_H=735$ об/хв.; $\eta_H=90\%$; $2p=8$; кратність пускового моменту $\lambda_H = 2$; кратність максимального моменту $\lambda_M = 2,7$; кратність пускового струму $I_H = 6,2$; момент інерції ротора – $0,41 \text{ кгм}^2$.

Після того, як двигун попередньо вибраний, можна перейти до побудови навантажувальної діаграми двигуна, тобто залежності $M(t)$. Ця побудова зводиться до вирішення рівняння руху

$$M = M_c + J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.4)$$

де M – момент двигуна

$J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt}$ – динамічний момент двигуна

J_{Σ} – сумарний момент інерції приводу

$$J_{\Sigma} = J_{\partial\theta.} + J_{\text{мех.}} = 0.41 + 6.6 = 7.61 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (1.5)$$

де $J_{\partial\theta.}$ – момент інерції двигуна

$J_{\text{мех.}}$ – момент інерції моталки

Робочий орган (барабан) моталки є суцільним циліндром, тому його момент інерції знайдемо по формулі

$$J_{\text{мех.}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 = \frac{1}{2} \cdot 65 \cdot 0.45^2 = 6.6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (1.6)$$

де m – маса барабану ($m = 65 \text{ кг}$)

R – радіус барабану ($R = 0.45 \text{ м}$)

1.3.2 Побудова навантажувальної діаграми двигуна

Перехідний процес для швидкості в електроприводі супроводжується змінною електромагнітного моменту приводного двигуна.

Згідно з рівнянням руху механічної частини електроприводу отримаємо

$$M_i = M_{\text{ст}} + J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1.7)$$

Згідно до 1.7 розрахуємо момент електроприводу на 2-му та 4-му інтервалах діаграми руху, рис. 1.1.

$$M_2 = 200 + 7.61 \frac{-36.63}{2} = 60.63 \text{ Нм}$$

$$M_4 = 200 + 7.61 \frac{36.63}{2} = 339.37 \text{ Нм}$$

Будуємо навантажувальну діаграму двигуна, рис.1.2.

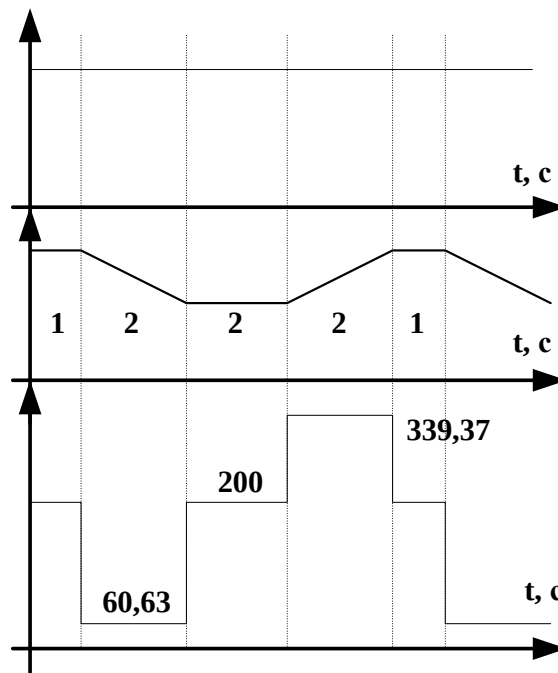


Рисунок 1.2 – Навантажувальна діаграма двигуна

Навантажувальна діаграма двигуна служить основою для перевірки попередньо вибраного двигуна по перевантажувальній здатності та по нагріву.

1.3.3 Перевірка по перевантажувальній здатності і по нагріву

Навантаження на двигун при короткотривалому впливі обмежується його перевантажувальною здатністю. Перевантажувальна здатність представляє собою відношення максимального моменту, який спроможний розвинути двигун хоча б короткочасно, до його номінального моменту $\lambda = \frac{M_{\text{макс.}}}{M_H}$, задана у паспортних даних двигуна.

Перевірка по перевантажувальній здатності зводиться до перевірки виконання умови

$$M_{\text{макс.}} \leq M_{\text{доп.}} \quad (1.8)$$

де $M_{\text{макс.}}$ – максимальний момент із навантажувальної діаграми двигуна ($M_{\text{макс.}} = 339.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

$M_{\text{доп.}}$ – допустимий по перевантаженню момент двигуна

Для асинхронного двигуна

$$M_{дон.} = 2,7 \cdot M_H = 2,7 \cdot 235,67 = 636,31 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.9)$$

$636 > 339,4$ — умова виконується.

Навантаження на двигун при тривалому впливі обмежується його нагрівом. Обмеження нагріву двигунів визначається теплостійкістю їх ізоляції.

Режим роботи моталки тривалий зі зміною швидкості. При перевірці двигуна на нагрів зручно буде скористатися методом еквівалентного моменту (оснований, як і подібні методи еквівалентного струму та середніх втрат, на припущенні близькості середнього за цикл і максимального перегрівань), який обчислюється по формулі

$$M_{екв.} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \quad (1.10)$$
$$\sqrt{\frac{200^2 \cdot 1 + 60,63^2 \cdot 2 + 200^2 \cdot 2 + 339,37^2 \cdot 2 + 200^2 \cdot 1}{1 + 2 + 2 + 2 + 1}} = 222,97 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Величина еквівалентного моменту порівнюється з номінальним моментом

$$M_{екв.} \leq M_H \quad (1.11)$$

$222,97 \leq 252,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Обраний двигун задовольняє вимогам нагріву.

1.4. Частотне регулювання асинхронних двигунів.

Регулювання частоти f_1 і амплітуди вихідної напруги U_1 здійснюється в АІН за рахунок використання алгоритмів високочастотного ШІМ - керування. Частота ШІМ звичайно становить від 2 до 12 кГц, тобто в багато раз перевищує вихідну частоту АІН.

Форма кривої вихідної напруги при цьому являє собою високочастотну двохполярну послідовність імпульсів.

Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалість імпульсів протягом періоду вихідної частоти АІН промодельована за синусоїдальним

законом. Форма кривої вихідного струму (струму АД), практично синусоїдальна.

До силових ключів АІН ШІМ пред'являються вимоги високої швидкості й малих динамічних втрат.

У гальмовому режимі ЕП АІН з режиму інвертування переходить у режим випрямлення (працює міст діодів зворотного струму, через керовані ключі подається енергія порушення АД). Полярність напруги на вході АІН зберігається, а струм змінює напрям. Тому реалізація гальмового режиму здійснюється додатковим введенням силових елементів, або зворотним керованим випрямлячем для рекуперації енергії в мережу, або керованим ключем і гальмовими резисторами в ланцюзі постійної напруги для здійснення електродинамічного гальмування.

Істотними перевагами аналізованої системи ЕП з АІН є:

- практично необмежений діапазон регулювання частоти й швидкості;
- не критичність до потужності (у границях припустимої) і кількості притягнутих АД;
- можливість роботи в режимі холостого ходу, при відключених АД;
- високе, близьке до 1 значення коефіцієнта потужності мережі ($\cos \varphi$) у всіх режимах роботи;
- синусоїдальність вихідного струму, плавне обертання АД на швидкостях близьких до нульового;
- високі динамічні показники ЕП, обумовлені високою швидкістю ШІМ керування.

З урахуванням вимог, що висовуються до електроприводу компресорів, доцільно використати електропривод по системі ПЧ-АД, котрий забезпечує високу плавність та економічність регулювання швидкості обертання компресора.

1.4 Розробка структурної схеми силової частини електроприводу

Найпоширенішим типом перетворювачів частоти є двоступінчасте перетворювальне обладнання, виконане на основі випрямляча трифазної змінної напруги мережі й автономного інвертора напруги (АІН), що перетворює випрямлену напругу в змінну трифазну з регульованою частотою й амплітудою. Незважаючи на подвійне перетворення енергії й обумовлене цим деяке зниження ККД, такі перетворювачі частоти (із проміжною ланкою постійного струму) одержали найбільше поширення в різних типах електроустановок. На відміну від АІС постійного струму, що містить на своєму вході в ланцюзі, індуктивність, обов'язковим елементом на вході АІН є паралельно включена ємність. Тому в результаті підключень напівпровідниковими ключами цієї ємності до вихідних затисків АІН здійснюється формування кривих напруги навантаження. При використанні некерованого випрямляча забезпечується високе значення коефіцієнта потужності на вході, а регулювання величини вихідної напруги може здійснюватися методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Спрощена функціональна схема частотно-керованого асинхронного електроприводу наведено на рис.1.3.

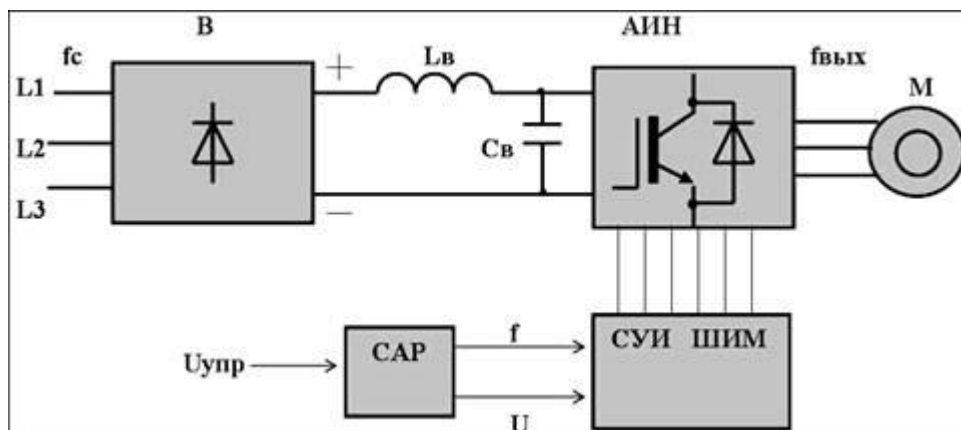


Рисунок 1.3 – Структурна схема перетворювача частоти.

Регулювання вихідної частоти $f_{вих}$ і напруги $U_{вих}$ здійснюється в АІН за рахунок високочастотного широтно-імпульсного (ШІМ) керування. ШІМ характеризується періодом модуляції, усередині якого обмотка статора ЕД підключається по черзі до позитивного й негативного полюсів випрямляча.

Тривалість цих станів усередині періоду ШІМ модулюється за синусоїдальним законом. При високих (звичайно 2...15 кГц) тактових частотах ШІМ, в обмотках електродвигуна, внаслідок їхніх фільтруючих властивостей, течуть синусоїдальні струми.

Таким чином, форма кривої вихідної напруги являє собою високочастотну двохполярну послідовність прямокутних імпульсів (рис. 2.44). Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалість (ширина) імпульсів протягом періоду вихідної частоти АІН промодульована за синусоїдальним законом. Форма кривої вихідного струму (струму в обмотках асинхронного електродвигуна) практично синусоїдальна. Регулювання вихідної напруги АІН можна здійснити двома способами: амплітудним (АР) за рахунок зміни вхідної напруги U_v і широтно-імпульсним (ШІМ) за рахунок зміни програми перемикавання вентилів V1-V6 при $U_v = \text{const}$. Другий спосіб одержав поширення в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази (мікропроцесори, IGBT-транзистори). При ШІМ - модуляції форма струмів в обмотках статора АД буде близькою до синусоїдальної завдяки фільтруючим властивостям самих обмоток.

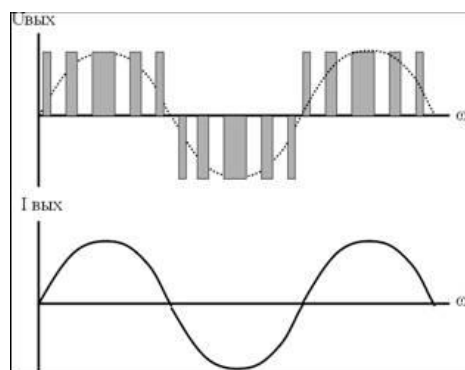


Рисунок 1.4 - Форма кривих напруги й струму на виході інвертора з широтно-імпульсною модуляцією.

Таке керування дозволяє одержати високий ККД перетворювача й еквівалентно аналоговому керуванню за допомогою частоти й амплітуди напруги.

Сучасні інвертори виконуються на основі повністю керованих силових напівпровідникових приладів —, що заціпаються GTO — тиристорів, або

біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. На рис. 1.5 представлена 3-х фазна мостова схема автономного інвертора на IGBT -Транзисторах. Вона складається із вхідного ємнісного фільтра C_f і шести IGBT транзисторів V1-V6 включеними паралельно діодами зворотного струму D1-D6.

За рахунок почергового перемикання вентилів V1-V6 по алгоритму, заданому системою керування, постійна вхідна напруга U_v перетворюється в змінну прямокутно-імпульсну вихідну напругу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова струму асинхронного електродвигуна АД, через діоди D1-D6 – реактивна складова струму АД

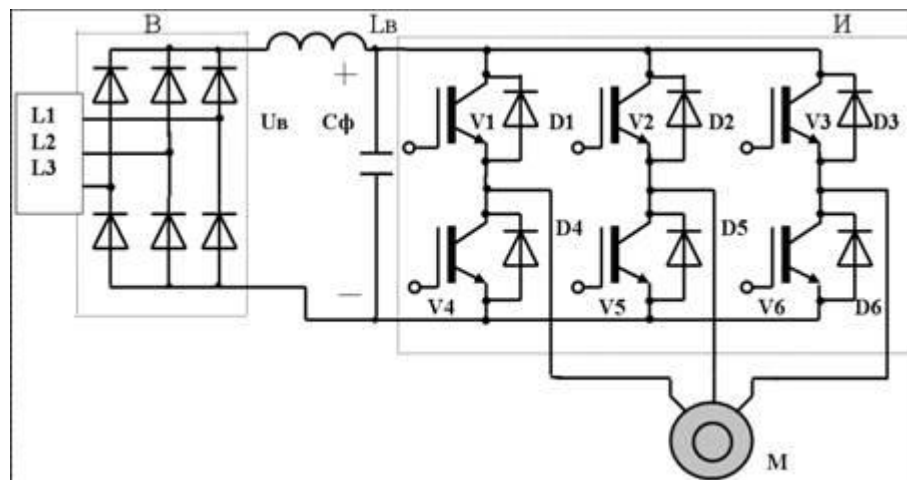


Рисунок 1.5. Спрощена принципова схема перетворювача частоти.

1.5 Вибір силового електрообладнання

Використовуючи каталожні дані обраного двигуна, вибираємо перетворювач частоти типу SV185 iS5-4NU виробництва LG Industrial Systems з наступними технічними характеристиками:

Живляча напруга: трифазна, 380÷480 В, 50 або 60 Гц;



Вихідні параметри : потужність двигуна – 18,5 кВт; навантажувальна здібність – 29,7 кВА; струм при повному навантаженні – 39А; вихідна напруга – трифазна, 0 - 380÷480 В; вихідна частота при U/f-керуванні – 0 ÷400 Гц; при бездавачовому векторному керуванні - 0 ÷300 Гц. На рисунку наведено зовнішній вигляд перетворювача частоти SV185 іS5-4NE.

Розділ 2 РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЦЕХОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОКАТНОГО СТАНУ

2.1 Розрахунок електричних навантажень

Електричні навантаження будемо розраховувати методом впорядкованих діаграм. Цей метод є основним при розробці технічних і робочих проектів електропостачання. За цим методом розрахункове максимальне навантаження групи електроприймачів:

$$P_{\text{макс.}} = K_{\text{макс.}} \cdot K_u \cdot P_{\text{ном.}} \quad (2.1)$$

де $K_{\text{макс.}}$ – коефіцієнт максимуму

K_u – коефіцієнт використання

$P_{\text{ном.}}$ – номінальна групова потужність електроприймачів (за виключенням резервних)

Для групи електроприймачів одного режиму роботи середні активне та реактивне навантаження за найбільш завантажену зміну визначаються за формулами:

$$P_{\text{см.}} = K_u \cdot P_{\text{ном.}} \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{см.}} = P_{\text{см.}} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.3)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності (відповідає середньозваженому $\cos \varphi$, який характерний для електроприймачів даного режиму роботи).

При наявності у групі електроприймачів різних режимів роботи вирази (2.2) та (2.3) змінюються:

$$P_{см.} = \sum p_{см.} = \sum k_u \cdot p_{ном.} \quad (2.4)$$

$$Q_{см.} = \sum q_{см.} = \sum p_{см.} \cdot \tan \varphi \quad (2.5)$$

При визначенні розрахункового навантаження по встановленій потужності і коефіцієнту використання складається “звідна таблиця споживачів” (таблиця (2.1)). В цій таблиці вказуються споживачі електричної енергії, номінальна потужність електроприймачів, коефіцієнт використання, коефіцієнт потужності, коефіцієнт реактивної потужності, середні активні та реактивні потужності.

Таблиця 2.1 – Характеристика споживачів електроенергії

Група струмо- приймачів	Кількість	Номінальна потужність, кВт	Коефіцієнт ви- користання	Коефіцієнт по- тужності	Коефіцієнт ре- активної поту- жності	Розрахункова потужність	
						Акти- вна, кВт	Реакти- вна, кВт
1	2	3	4	5	6	7	8
Пратцен крани	2	267	0,45	0,6	1,33	240,3	320,4
Завантажувальні шлепери	2	75	0,25	0,7	1,02	37,5	38,258
Підводячий роль- ганг	2	63	0,1	0,8	0,75	12,6	9,45
Скидач	2	21	0,2	0,49	1,78	8,4	14,944
Витягувальний пристрій	2	58	0,65	0,8	0,75	75,4	56,55
Штовхачі	2	84	0,65	0,8	0,75	109,2	81,9
Трайб-апарати- витягувачі	2	60	0,65	0,8	0,75	78	58,5
З'єднувальні ро- льганги	4	32	0,1	0,8	0,75	12,8	9,6
Трайб-апарати	4	44	0,65	0,8	0,75	114,4	85,8
Летючі аварійні ножиці	1	280	0,45	0,65	1,17	126	147,31

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Обривні важі- льні ножиці	2	220	0,45	0,65	1,17	198	231,49
Моталки	8	16	0,65	0,8	0,75	83,2	62,4
Зіштовхувач	8	84	0,65	0,8	0,75	436,8	327,6
Одноланцюж- ний транспор- тер	4	11	0,26	0,58	1,41	11,44	16,068
Муфельний тра- нспортер	4	7,5	0,26	0,58	1,41	7,8	10,955
Бунтонавішувач	4	9	0,65	0,8	0,75	23,4	17,55
Гаковий кон- веєр	4	55	0,35	0,7	1,02	77	78,556
Бунтоз'ємний пристрій	1	9	0,65	0,8	0,75	5,85	4,388
Пакет машина	1	12	0,65	0,8	0,75	7,8	5,85
Електромосто- вий кран	2	39	0,45	0,6	1,33	35,1	46,8
Електромосто- вий грейферний кран	1	34	0,3	0,6	1,33	10,2	13,6
Чорнова група клітей	9	1150	0,35	0,8	0,75	3622,5	2716,9
Перша про- міжна група клі- тей	4	950	0,35	0,8	0,75	1330	997,5
Друга проміжна група клітей	8	900	0,35	0,8	0,75	2520	1890
Чистова група клітей	16	850	0,35	0,8	0,75	4760	3570
Вентилятори машинного залу	10	10	0,65	0,8	0,75	65	4,875

Вентилятори прокатного стану	10	10	0,75	0,8	0,75	75	5,625
Освітлення цеху	40	700	0,85	0,9	–	23,8	–

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Освіт- лення побуто- вих при- міщень	70	100	0,85	0,9	–	5,95	–
Освіт- лення ка- бінетів	80	75	0,85	0,9	–	5,1	–

Максимальні розрахункові активну та реактивну потужності визначимо за формулами:

$$P_{\text{макс.}} = K_{\text{макс.}} \cdot P_{\text{см.}} \quad (2.6)$$

$$Q_{\text{макс.}} = K_{\text{макс.}} \cdot Q_{\text{см.}} \quad (2.7)$$

Після цього можна підрахувати максимальну повну потужність:

$$S_{\text{макс.}} = \sqrt{(P_{\text{макс.}})^2 + (Q_{\text{макс.}})^2} \quad (2.8)$$

Розрахунки зведемо в таблицю 2.2. В ній вкажемо споживачів електричної енергії, коефіцієнт використання, коефіцієнт максимуму, середні активні та реактивні потужності, максимальні розрахункові активні та реактивні потужності, максимальну повну потужність.

Таблиця 2.2 – Розрахунок максимальних потужностей

Група струмо- приймачів	$K_{\text{еф.іп}}$	$K_{\text{еф.іп}}$	Розрахункова потуж- ність	Максимальна потужність
----------------------------	--------------------	--------------------	------------------------------	------------------------

			Акти- вна, кВт	Реакти- вна, кВар	Акти- вна, кВт	Реакти- вна, кВар	Повна, кВА
1	2	3	4	5	6	7	8
Пратцен крани	0,45	1,86	240,3	320,4	446,96	595,94	744,93
Завантажувальні шлепери	0,25	2,57	37,5	38,258	96,375	98,322	137,68

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Підводячий ро- льганг	0,1	3,63	12,6	9,45	45,738	34,304	57,173
Скидач	0,2	3,35	8,4	14,944	28,14	50,062	57,429
Витягувальний пристрій	0,65	1,42	75,4	56,55	107,07	80,301	133,84
Штовхачі	0,65	1,42	109,2	81,9	155,06	116,3	193,83
Трайб-апарати- витягувачі	0,65	1,42	78	58,5	110,76	83,07	138,45
З'єднувальні ро- льганги	0,1	3,43	12,8	9,6	43,904	32,928	54,88
Трайб-апарати	0,65	1,38	114,4	85,8	157,87	118,4	197,34
Летючі аварійні ножиці	0,45	1,95	126	147,31	245,7	287,26	378
Обривні важі- льні ножиці	0,45	1,86	198	231,49	368,28	430,57	566,58
Моталки	0,65	1,25	83,2	62,4	104	78	130
Зіштовхувач	0,65	1,25	436,8	327,6	546	409,5	682,5
Одноланцюж- ний транспортер	0,26	2,38	11,44	16,068	27,227	38,241	46,943
Муфельний тра- нспортер	0,26	2,38	7,8	10,955	18,564	26,073	32,007

Бунтонавішувач	0,65	1,38	23,4	17,55	32,292	24,219	40,365
Гаковий конвеєр	0,35	2,01	77	78,556	154,77	157,9	221,1
Бунтоз'ємний пристрій	0,65	1,46	5,85	4,388	8,541	6,406	10,676
Пакет машина	0,65	1,46	7,8	5,85	11,388	8,541	14,235
Електромостовий кран	0,45	1,86	35,1	46,8	65,286	87,048	108,81
Зіштовхувач	0,65	1,25	436,8	327,6	546	409,5	682,5
Одноланцюжний транспортер	0,26	2,38	11,44	16,068	27,227	38,241	46,943

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Муфельний транспортер	0,26	2,38	7,8	10,955	18,564	26,073	32,007
Бунтонавішувач	0,65	1,38	23,4	17,55	32,292	24,219	40,365
Гаковий конвеєр	0,35	2,01	77	78,556	154,77	157,9	221,1
Бунтоз'ємний пристрій	0,65	1,46	5,85	4,388	8,541	6,406	10,676
Пакет машина	0,65	1,46	7,8	5,85	11,388	8,541	14,235
Електромостовий кран	0,45	1,86	35,1	46,8	65,286	87,048	108,81
Електромостовий грейферний кран	0,3	2,42	10,2	13,6	24,684	32,912	41,14
Чорнова група клітей	0,35	1,56	3622,5	2716,9	5651,1	4238,3	7063,9
Перша проміжна група клітей	0,35	2,01	1330	997,5	2673,3	2005	3341,6
Друга проміжна група клітей	0,35	1,62	2520	1890	4082,4	3061,8	5103

Чистова група клітей	0,35	1,35	4760	3570	6426	4819,5	8032,5
Вентилятори машинного залу	0,65	1,21	65	4,875	78,65	58,988	98,313
Вентилятори прокатного стану	0,75	1,12	75	5,625	84	63	105
Освітлення цеху	0,85	1,04	23,8	—	24,752	—	24,752
Освітлення побутових приміщень	0,85	1,025	5,95	—	6,099	—	6,099
Освітлення кабінетів	0,85	1,025	5,1	—	5,228	—	5,228

2.2 Вибір силового трансформатору

2.2.1 Вибір високовольтних трансформаторів

Вибір трансформатору будемо виконувати по розрахунковій потужності споживачів для нормального і аварійного режимів.

У цьому випадку виходять з їх раціонального завантаження у нормальному режимі, а також з мінімально необхідного резервування у післяаварійному режимі.

Відключення трансформаторів рідко мають місце, але таку вірогідність варто враховувати, тому при наявності серед навантажень споживачів ІйІІ категорій зазвичай встановлюють два трансформатори. Більша кількість трансформаторів не рекомендується, тому що це призводить до ускладнення схеми та появи труднощів при експлуатації.

В умовах нормальної роботи на підстанціях встановлюють два трифазних трансформатори з номінальними потужностями, які складають 60-70% від максимального навантаження.

Визначаємо необхідну потужність трансформаторів

$$S_{mp.} = \frac{S_{сер.макс.}}{N \cdot K_3} = \frac{27768297}{2 \cdot 0,7} = 19830000 \text{ В} \cdot \text{А} \quad (2.9)$$

де $S_{сер.макс.}$ – середнє навантаження за найбільш завантажену зміну

$$S_{сер.макс.} = 27768297 \text{ В} \cdot \text{А}$$

N – число трансформаторів ($N = 2$)

K_3 – коефіцієнт завантаження трансформатору ($K_3 = 0,7$)

Вибираємо високовольтні трансформатори, технічні дані яких наведемо у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні дані високовольтних трансформаторів

Марка	Номінальна потужність, кВА	Поєднання напруг, кВ			Втрати, кВт		U _{кз} , %			I _{хх} , %
		ВН	СН	НН	P _{хх}	P _{кз}	ВН- СН	ВН- НН	СН- НН	
ТДТН- 25000/150- 70У1 (х2)	25000	158	38,5	11	34	145	10,5	18	6	0,9

Перевіряємо трансформатор, що залишився у роботі (у випадку аварії) на перевантажувальну здатність

$$1,4 \cdot S_{mp.n} \geq S_{сер.макс.} \quad (2.10)$$

$$1,4 \cdot 25000000 \geq 27768297 \Rightarrow 35000000 \geq 27768297$$

Умова виконується.

2.2.2 Вибір цехового трансформатору

Вибираємо цеховий трансформатор за умовою

$$S_{цех.тр.н} \geq S_{сер.макс.} \quad (2.11)$$

де $S_{цех.тр.н}$ – номінальна потужність цехового трансформатору

$S_{сер.макс.}'$ – середнє навантаження за найбільш завантажену зміну, яке живиться від цього трансформатору

$$S_{сер.макс.}' = 812500B \cdot A$$

Технічні дані вибраного трансформатору наведемо у таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Технічні дані цехового трансформатору

Марка	Номінальна потужність, кВА	Поєднання напруг, кВ		Втрати, кВт		U _{кз} , %	I _{хх} , %
		ВН	НН	P _{хх}	P _{кз}		
ТМ- 1000/10 У1	1000	10	0,4	2,45	12,2	5,5	1,4

2.3 Розрахунок лінії електропередач

2.3.1 Вибір кабелю по допустимому навантаженню

Вибір кабелю по допустимому навантаженню (допустимому нагріву) виконується виходячи із співвідношення:

$$I_{тр.доп.каб.} \geq I_{тр.доп.розр.} \quad (2.12)$$

де $I_{тр.доп.каб.}$ – тривало допустимий струм кабелю в залежності від перетину, відповідно до таблиці з вибраним дротом

$I_{тр.доп.розр.}$ – розрахунковий тривало допустимий струм кабелю

$$I_{тр.доп.розр.} = \frac{I_{розр.норм.}}{K_t \cdot K_n \cdot K_{тв}} = \frac{57,017}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 1} = 83,849A \quad (2.13)$$

де $I_{розр.норм.}$ – максимальний розрахунковий струм нормального режиму роботи

$$I_{розр.норм.} = \frac{I_{розр.авар.}}{2} = \frac{114,035}{2} = 57,017A \quad (2.14)$$

де $I_{розр.авар.}$ – максимальний розрахунковий струм кабелю, який визначається для аварійного режиму роботи мережі

$$I_{розр.авар.} = \frac{S_{сер.макс.м}}{3 \cdot U_n} = \frac{130000}{3 \cdot 380} = 114,035 A \quad (2.15)$$

де $S_{сер.макс.м}$ – середня потужність моталок за найбільш завантажену зміну

$$S_{сер.макс.м} = 130000 B \cdot A$$

U_n – напруга живлення моталки ($U_n = 380 B$)

K_t – температурний коефіцієнт, враховує умови навколишнього середовища по відношенню до розрахункових умов ($K_t = 0,8$)

K_n – поправочний коефіцієнт, враховуючий кількість кабелів, які прокладаються в одному коробі одночасно ($K_n = 0,85$)

$K_{тв}$ – коефіцієнт тривалості включення (для тривалого режиму $K_{тв} = 1$)

2.3.2 Вибір кабелю по економічній щільності струму

Вибір кабелю по економічній щільності струму виконується виходячи із співвідношення:

$$F_{каб.} \geq F_{розр.} \quad (2.16)$$

де $F_{каб.}$ – перетин кабелю

$F_{розр.}$ – розрахунковий перетин кабелю

$$F_{розр.} = \frac{I_{розр.норм.}}{j_{эк.}} = \frac{57,017}{1,4} = 40,726 \text{ мм}^2 \quad (2.17)$$

де $j_{\text{ЭК.}}$ – економічна щільність струму (для кабелів с паперовою ізоляцією і алюмінієвими жилами $j_{\text{ЭК.}} = 1,4$)

По результатам пунктів 4.3.1 та 4.3.2 обираємо кабель АВВГ 3х50+1х25,
 $I_{\text{тр.доп.каб.}} = 110 \text{ A}$

2.3.3 Вибір ЛЕП по допустимому навантаженню

Вибір ЛЕП по допустимому навантаженню (допустимому нагріву) виконується виходячи із співвідношення:

$$I_{\text{тр.доп.л}} \geq I_{\text{тр.доп.розр.}} \quad (2.18)$$

де $I_{\text{тр.доп.л}}$ – тривало допустимий струм ЛЕП в залежності від перетину

$I_{\text{тр.доп.розр.}}$ – розрахунковий тривало допустимий струм ЛЕП

$$I_{\text{тр.доп.розр.}} = \frac{I_{\text{розр.норм.}}}{K_t \cdot K_{\text{тв}}} = \frac{231,403}{0,9 \cdot 1} = 257,114 \text{ A} \quad (2.19)$$

де $I_{\text{розр.норм.}}$ – максимальний розрахунковий струм нормального режиму роботи

$$I_{\text{розр.норм.}} = \frac{I_{\text{розр.авар.}}}{2} = \frac{462,805}{2} = 231,403 \text{ A} \quad (2.20)$$

де $I_{\text{розр.авар.}}$ – максимальний розрахунковий струм кабелю, який визначається для аварійного режиму роботи мережі

$$I_{\text{розр.авар.}} = \frac{S_{\text{сер.макс.}}}{3 \cdot U_n} = \frac{27768297}{2 \cdot 3 \cdot 10000} = 462,805 \text{ A} \quad (2.21)$$

де U_n – напруга живлення шини на 10кВ ($U_n = 10000 \text{ В}$)

двійка у знаменнику враховує, що шини на 10кВ живляться від двох ВЛЕП

K_t – температурний коефіцієнт, враховує умови навколишнього середовища по відношенню до розрахункових умов ($K_t = 0,9$)

$K_{те}$ – коефіцієнт тривалості включення (для тривалого режиму $K_{те} = 1$)

2.3.4 Вибір ЛЕП по економічній щільності струму

Вибір ЛЕП по економічній щільності струму виконується виходячи із співвідношення:

$$F_l \geq F_{розр.} \quad (2.22)$$

де F_l – перетин ЛЕП

$F_{розр.}$ – розрахунковий перетин ЛЕП

$$F_{розр.} = \frac{I_{розр.норм.}}{j_{эк.}} = \frac{257,114}{1,8} = 142,841 \text{ мм}^2 \quad (2.23)$$

де $j_{эк.}$ – економічна щільність струму (для неізолюваних мідних проводів і шин $j_{эк.} = 1,8$)

По результатам пунктів 4.3.3 та 4.3.4 обираємо кабельну лінію з алюмінієвою жилою перетином 185 мм^2 , $I_{тр.доп.л} = 270 \text{ А}$

2.4 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання будемо проводити у базисних величинах

2.4.1 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі вище 1кВ (К1)

Складаємо схему заміщення ділянки ланцюга електропостачання.

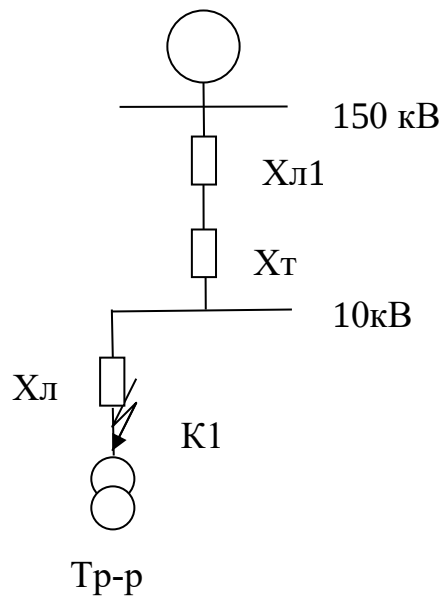


Рисунок 2.1 – Схема заміщення для точки К1

При розрахунку струмів короткого замикання в мережі вище 1кВ будемо враховувати тільки індуктивні опори споживачів.

Приймаємо за базисну потужність $S_{\sigma} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, базисні напруги $U_{\sigma 1} = 154 \text{ кВ}$, $U_{\sigma 2} = 10 \text{ кВ}$.

Визначаємо базисний струм

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma 1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,774 \text{ кА} \quad (2.24)$$

Визначаємо індуктивний опір ЛЕП 150кВ

$$X_{л1} = \frac{X_{0л1} \cdot l_{л1} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 1}^2} = \frac{0,42 \cdot 120 \cdot 100}{154^2} = 0,213 \quad (2.25)$$

де $X_{0л1}$ – індуктивний питомий опір ЛЕП 150кВ ($X_{0л1} = 0,42 \text{ Ом} / \text{км}$)

$l_{л1}$ – довжина ЛЕП 150кВ ($l_{л1} = 120 \text{ км}$)

Визначаємо індуктивний опір високовольтного трансформатору

$$X_{тр.} = \frac{U_{к}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{тр.н}} = \frac{18}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,72 \quad (2.26)$$

де U_K – номінальна напруга короткого замикання високовольного трансформатору

$S_{тр.н}$ – номінальна потужність високовольного трансформатору

Визначаємо індуктивний опір кабельної лінії 10кВ

$$X_{л2} = \frac{X_{0л2} \cdot l_{л2} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 2}^2} = \frac{0,077 \cdot 1 \cdot 100}{10^2} = 0,077 \quad (2.27)$$

де $X_{0л2}$ – індуктивний питомий опір кабельної лінії 10кВ ($X_{0л2} = 0,077 \text{ Ом/км}$)

$l_{л2}$ – довжина кабельної лінії 10кВ ($l_{л2} = 1 \text{ км}$)

Визначаємо сумарний індуктивний опір у точці К1 на стороні 10кВ

$$X_{\Sigma К1} = X_{тр.} + X_{л1} + X_{л2} = 0,213 + 0,72 + 0,077 = 1,01 \quad (2.28)$$

Визначаємо струм короткого замикання

$$I_{к.з.} = \frac{I_{\sigma}}{x_{\Sigma К1}} = \frac{5,774}{1,01} = 5,719 \text{ кА} \quad (2.29)$$

Визначаємо ударний струм у точці короткого замикання:

$$I_{удар.} = k_{удар.} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{к.з.} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 5,719 = 14,56 \text{ кА} \quad (2.30)$$

де $k_{удар.}$ – коефіцієнт ударного струму ($k_{удар.} = 1,8$)

Визначаємо потужність короткого замикання

$$S_{к.з.} = \frac{S_{\sigma}}{x_{\Sigma К1}} = \frac{100}{1,01} = 99,06 \text{ МВ} \cdot \text{А} \quad (2.31)$$

Визначаємо динамічний струм на шинах

$$I_{дин.} = I_{удар.} + 6,5 \cdot I_{розр.норм.} = 14,56 + 6,5 \cdot 0,231 = 16,06 \text{ кА} \quad (2.32)$$

2.4.2 Розрахунок струмів короткого замикання в мережі до 1кВ (К2)

Складаємо схему заміщення

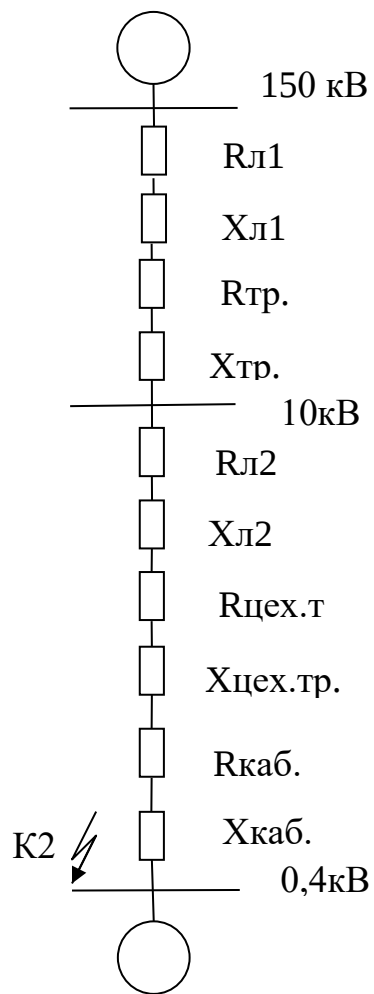


Рисунок 2.2 – Схема заміщення для точки К2

При розрахунку струмів короткого замикання в мережі до 1 кВ будемо враховувати не тільки індуктивні опори споживачів, а й активні опори.

Приймаємо за базисну потужність $S_{\sigma} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, базисну напругу $U_{\sigma 3} = 0,4 \text{ кВ}$.

Визначаємо базисний струм

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma 3}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 144,3 \text{ кА} \quad (2.33)$$

Індуктивний опір ЛЕП 150кВ

$$X_{л1} = 0,213$$

Визначаємо активний опір ЛЕП 150кВ

$$R_{л1} = \frac{R_{0л1} \cdot l_{л1} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 1}^2} = \frac{0,12 \cdot 120 \cdot 100}{154^2} = 0,061 \quad (2.34)$$

де $R_{0л1}$ – активний питомий опір ЛЕП 150кВ ($R_{0л1} = 0,12 \text{ Ом/км}$)

Індуктивний опір високовольтного трансформатору

$$X_{тр.} = 0,72$$

Визначаємо активний опір високовольтного трансформатору

$$R_{тр.} = \frac{\Delta P_{\text{м}}}{S_{тр.н}} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{тр.н}} = \frac{0,145}{25} \cdot \frac{100}{25} = 0,023 \quad (2.35)$$

Індуктивний опір кабельної лінії 10кВ

$$X_{л2} = 0,077$$

Визначаємо активний опір кабельної лінії 10кВ

$$R_{л2} = \frac{R_{0л2} \cdot l_{л2} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 2}^2} = \frac{0,167 \cdot 1 \cdot 100}{10^2} = 0,167 \quad (2.36)$$

де $R_{0л2}$ – активний питомий опір кабельної лінії 10кВ ($R_{0л2} = 0,12 \text{ Ом/км}$)

Визначаємо індуктивний опір цехового трансформатору

$$X_{цех.тр.} = \frac{U_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{цех.тр.н}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{100}{1} = 5,5 \quad (2.37)$$

Визначаємо активний опір цехового трансформатору

$$R_{цех.тр.} = \frac{\Delta P_{\text{м}}}{S_{цех.тр.н}} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{цех.тр.н}} = \frac{0,0122}{1} \cdot \frac{100}{1} = 1,22 \quad (2.38)$$

Визначаємо індуктивний опір кабелю 0,4кВ

$$X_{каб.} = \frac{X_{0каб.} \cdot l_{каб.} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 3}^2} = \frac{0,167 \cdot 1 \cdot 100}{0,4^2} = 3,75 \quad (2.39)$$

де $X_{0каб.}$ – індуктивний питомий опір кабелю 0,4кВ (

$$X_{0каб.} = 0,06 \text{ Ом/км})$$

$l_{каб.}$ – довжина кабелю 0,4кВ ($l_{л2} = 1 \text{ км}$)

Визначаємо активний опір кабелю 0,4кВ

$$R_{каб.} = \frac{R_{0каб.} \cdot l_{каб.} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 3}^2} = \frac{0,769 \cdot 0,1 \cdot 100}{0,4^2} = 48,063 \quad (2.40)$$

де $R_{0каб.}$ – активний питомий опір кабелю 0,4кВ ($R_{0каб.} = 0,769 \text{ Ом/км}$)

Визначаємо сумарний індуктивний опір у точці К2 на стороні 0,4кВ

$$\begin{aligned} X_{\Sigma К2} &= X_{л1} + X_{тр.} + X_{л2} + X_{цех.тр.} + X_{каб.} = \\ &= 0,213 + 0,72 + 0,077 + 5,5 + 3,75 = 10,26 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Визначаємо сумарний активний опір у точці К2 на стороні 0,4кВ

$$\begin{aligned} R_{\Sigma К2} &= R_{л1} + R_{тр.} + R_{л2} + R_{цех.тр.} + R_{каб.} = \\ &= 0,061 + 0,023 + 0,167 + 1,22 + 48,063 = 49,533 \end{aligned} \quad (2.42)$$

Визначаємо сумарний повний опір у точці К2 на стороні 0,4кВ

$$Z_{\Sigma К2} = \sqrt{\left(X_{\Sigma К2}\right)^2 + \left(R_{\Sigma К2}\right)^2} = \sqrt{10,26^2 + 49,533^2} = 50,585 \quad (2.43)$$

Визначаємо струм короткого замикання

$$I_{к.з.} = \frac{I_{\sigma}}{Z_{\Sigma К2}} = \frac{144,3}{50,585} = 2,853 \text{ кА} \quad (2.44)$$

Визначаємо ударний струм у точці короткого замикання:

$$I_{удар.} = k_{удар.} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{к.з.} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,853 = 7,264 \text{ кА} \quad (2.45)$$

Визначаємо потужність короткого замикання

$$S_{к.з.} = \frac{S_{\sigma}}{Z_{\Sigma К2}} = \frac{100}{50,585} = 1,977 \text{ МВ} \cdot \text{А} \quad (2.46)$$

Динамічний струм на шинах дорівнює

$$I_{дин.} = I_{удар.} + 6,5 \cdot I_{розр.норм.} = 7,264 + 6,5 \cdot 0,057 = 7,634 \text{ кА} \quad (2.47)$$

2.5 Вибір захисних апаратів

2.2.1 Вибір плавкого запобіжника

Вибір плавких запобіжників виконується по напрузі і струму:

$$U_{плавк.н} \geq U_{сн} \Rightarrow 0,4 \geq 0,4 \quad (2.48)$$

де $U_{плавк.н}$ – номінальна напруга плавкого запобіжника

$U_{сн}$ – номінальна напруга мережі (0,4кВ)

$$I_{плавк.н} \geq I_{расч.авар.} \Rightarrow 160 \geq 142,544 \quad (2.49)$$

де $I_{плавк.н}$ – номінальний струм плавкого запобіжника

$I_{расч.авар.}$ – максимальний розрахунковий струм лінії електропередач

(формула (2.15))

Зазвичай:

$$I_{плавк.н} \geq k \cdot I_{расч.авар.} = 1,25 \cdot 114,035 = 142,544 \text{ А} \quad (2.50)$$

де k – коефіцієнт запасу ($k = 1,25$)

Визначаємо мінімальний струм відключення

$$I_{\min} = (1,3 \div 1,5) \cdot I_{розр.норм.} = 1,4 \cdot 57,017 = 79,824 \text{ А}$$

Даному мінімальному струму відповідає діаметр алюмінієвого дроту (плавкої вставки) 1,22мм

Вибраний плавкий запобіжник та його технічні дані занесемо до таблиці:

Таблиця 2.5 – Технічні дані плавкого запобіжника

Тип	Номінальний струм плавкого запобіжника	Номінальний струм плавкої вставки, А	Найбільший струм відключення, кА	Номінальна напруга плавкого запобіжника, В
ПН2-250	250	160	40	400

2.2.2 Вибір автоматичного вимикача

Автоматичні вимикачі вибираються за умов:

1) номінальний струм електромагнітного або комбінованого розчеплювача вибирається за значенням тривалого розрахункового струму лінії (знаходився за формулою (2.13))

$$I_{ел.розч.н} \geq I_{тр.доп.розр.} \Rightarrow \geq 83,849 \quad (2.51)$$

2) струм спрацювання відсічки електромагнітного або комбінованого розчеплювача перевіряється за піковим струмом лінії

$$I_{спрац.ел.розч.} \geq k \cdot I_{нік} \Rightarrow \geq 1,25 \cdot 350 \Rightarrow \geq 437,5 \quad (2.52)$$

де $I_{нік}$ – піковий струм лінії (в даному випадку відповідає пусковому струму двигуна, $I_{нік} = 350A$)

Таблиця 2.6 – Технічні дані автоматичного вимикача

Тип	Номінальний струм автоматичного вимикача, А	Діапазон струмів розчеплювача перевантаження, А	Діапазон струмів розчеплювача короткого замикання, А	Вимикаємо здатність, кА
LZMN3-A500-I	500	400-500	3000-5000	50

СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Розділ 3. АНАЛІЗ РОЗІМКНЕНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТЕХНОЛОГІЧНОГО МЕХАНІЗМУ

3.1 Складання схеми заміщення і розрахунок її параметрів

Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна має такий вигляд:

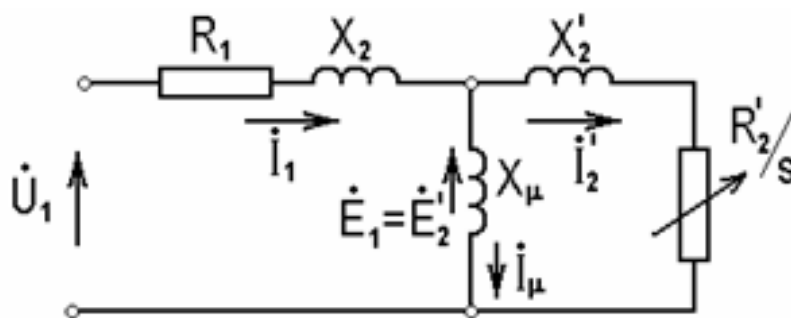


Рисунок 3.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

де R_1 , X_1 – активний та індуктивний опір фази статора АД;

R_2 , X_2 – активний та індуктивний опір фази ротора АД;

X_μ – індуктивний опір контуру намагнічування АД;

Знаходимо параметри схеми заміщення. Для спрощення розрахунків допустимо знехтувати активним опором контуру намагнічування.

Номінальна кутову швидкість:

$$\omega_{\text{ном}} = n_{\text{ном}} \cdot \frac{\pi}{30} = 76,97 \text{ 1/c}$$

Кутова швидкість холостого ходу:

$$\omega_0 = n_0 \cdot \frac{\pi}{30} = 78,54 \text{ 1/c}$$

Номінальне ковзання:

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = 0,02$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 1000 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = 240,36 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичне ковзання для рухового режиму:

$$S_k = S_n \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right) = 0,087$$

За кратністю пускового струму знаходимо повний опір двигуна при нерухомому роторі ($S=1$):

Приймаємо для двигуна значення коефіцієнта насичення магнітного ланцюга $C_1=1.04$ і механічні втрати, дорівнюють 1% від $P_{\text{ном}}$, тобто:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,01 \cdot P_{\text{H}} = 0,01 \cdot 18,5 = 0,185 \text{ кВт}$$

За кратністю пускового моменту $\lambda_{\text{п}}$ визначаємо активний опір ротора при $S=1$:

$$R_2' = \frac{(P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{мех}}) \cdot \lambda_{\text{п}}}{3(1 - S_{\text{H}}) \cdot k_i^2 \cdot I_{1\text{H}}^2} = 0,127 \text{ Ом}$$

Активний опір статора можна визначити за виразом:

$$R_1 = \frac{U_{1\text{H}}^2 (1 - S_{\text{H}})}{2c_1 (P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{мех}}) \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot \left(1 + \frac{c_1}{S_{\text{K}}}\right)} = 0,075 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора і ротора при $S = 1$ без урахування намагнічуючого струму:

$$X_{\text{K}} = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{S_{\text{K}}}\right)^2 - R_1^2} = 1.459 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статора:

$$X_1 = \frac{X_{\text{K}}}{2} = 0.73 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір ротора:

$$X_2' = \frac{X_1}{c_1} = 0.715 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{\text{р}} = \frac{X_2'}{2\pi f} = 0.0024 \text{ Гн}$$

Індуктивність розсіювання статора:

$$L_{\text{с}} = \frac{X_1}{2\pi f} = 0.0023 \text{ Гн}$$

Струм контуру намагнічування

$$I_{\mu\text{H}} = I_{1\text{H}} \left(\sin \varphi_{\text{H}} - \frac{S_{\text{H}} \cdot \cos \varphi_{\text{H}}}{S_{\text{K}}} \right) = 12,03 \text{ А}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_{\mu} = \frac{U_{1\phi}}{I_{\mu n}} = \frac{220}{18.22} = 18.29 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання контуру намагнічування:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f} = \frac{13.08}{314.15} = 0.058 \text{ Гн}$$

3.2.Розрахунок статичних характеристик електроприводу у розімкненій системі керування

Для розрахунку необхідних характеристик асинхронного електродвигуна при частотному керуванні скористаємося символьним методом розрахунку ланцюгів змінного струму.

Комплексний опір ротора

$$Z_2(s) = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2$$

Комплексний опір ланцюгу намагнічування

$$Z_{\mu} = j \cdot x_{\mu}$$

Комплексний опір вторинному ланцюгу схеми заміщення

$$Z_{20}(s) = \frac{Z_2(s) \cdot Z_{\mu}(s)}{Z_2(s) + Z_{\mu}(s)}$$

Комплексний опір ланцюгу статора

$$Z_1(s) = r_1 + j \cdot x_1$$

Повний комплексний опір схеми заміщення

$$Z_0(s) = Z_1(s) + Z_{20}(s)$$

Струм статора АД

$$I_1(s) = \frac{U_1}{Z_0(s)}$$

Напруга на затисках вторинного ланцюга

$$E_{20}(s) = U_1 - I_1(s) \cdot Z_1(s)$$

Струм ротора АД

$$I_2(s) = \frac{E_{20}(s)}{Z_2(s)}$$

Електромагнітний момент АД

$$M_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \left(I_2(s) \right)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

$$P_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \operatorname{Re}(U_1 \cdot \hat{I}_1(s)) ; \quad Q_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \operatorname{Im}(U_1 \cdot \hat{I}_1(s))$$

Коефіцієнт корисної дії АД:

$$\eta(s) = \frac{M_{\text{эм}}(s) \cdot \omega_0 \cdot (1 - s)}{P_{\text{АД}}(s)}$$

Коефіцієнт потужності АД:

$$k_m(s) = \cos(\arg(Z_0(s)))$$

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою програми MATHCAD. Результати розрахунків статичних і енергетичних характеристик електродвигуна приведені нижче.

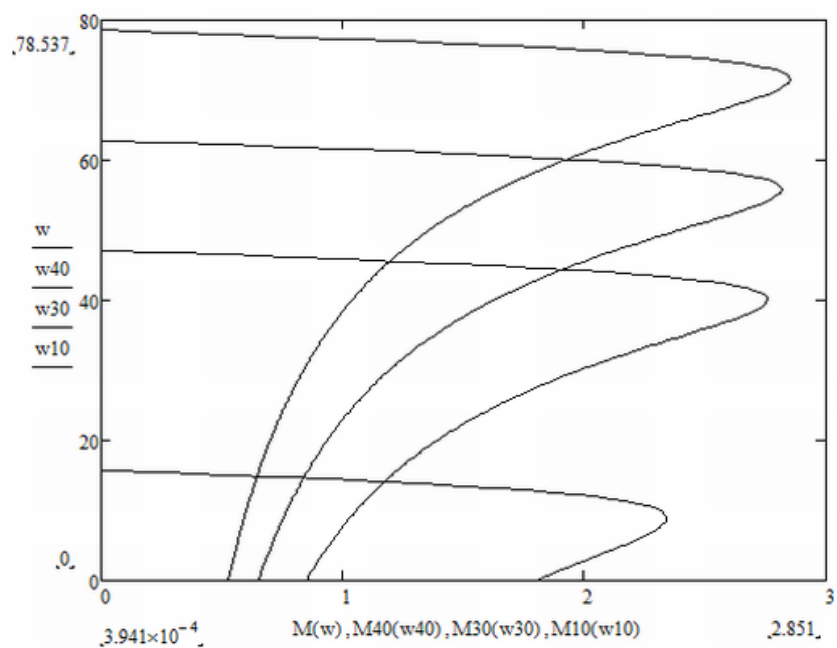


Рисунок 3.2 - Механічні характеристики АД при частотному регулюванні.

Частоти живлячої напруги – 50, 40, 30, 10 Гц

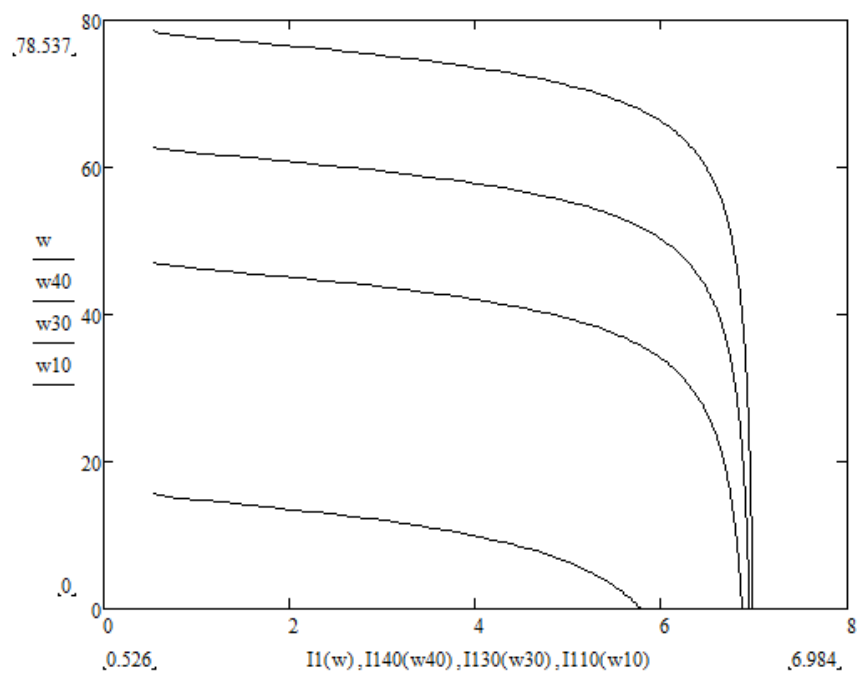


Рисунок 3.3 - Швидкісні характеристики АД по статору при частотному регулюванні. Частоти живлячої напруги – 50, 40, 30, 10 Гц

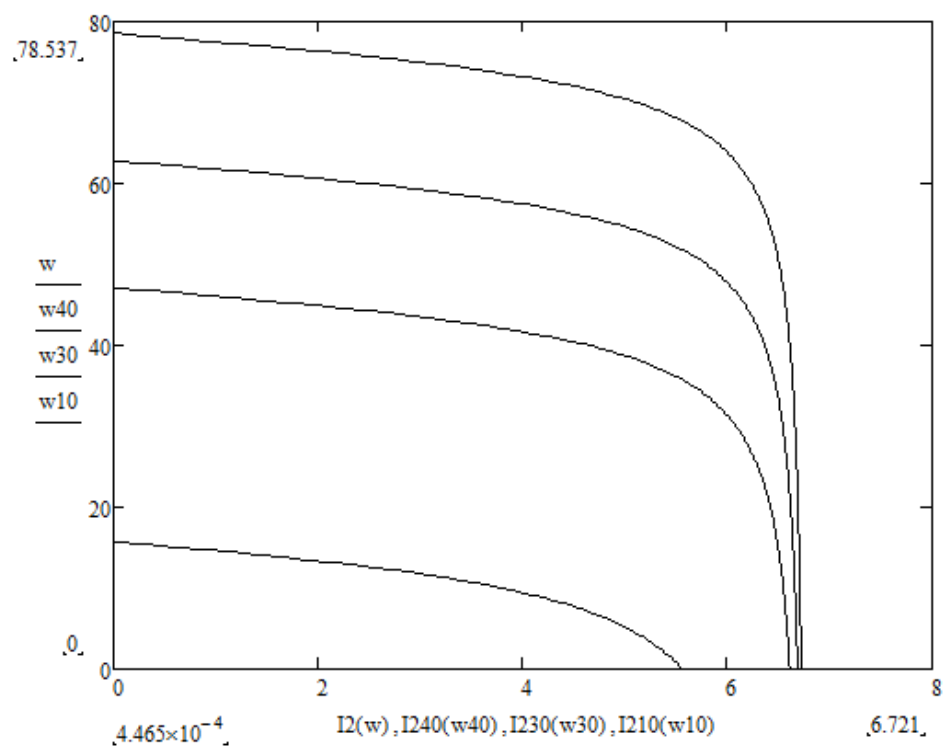


Рисунок 4.4-Швидкісні характеристики АД по ротору при частотному регулюванні. Частоти живлячої напруги – 50, 40, 30, 10 Гц

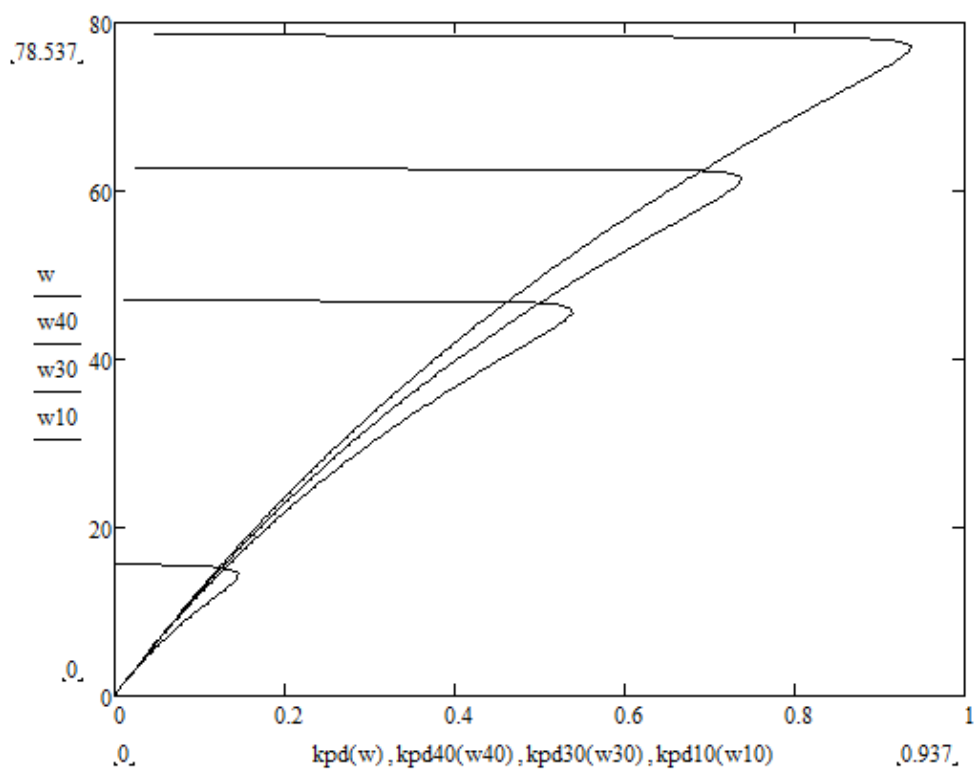


Рисунок 4.5 - Залежність ККД АД при частотному регулюванні. Частоти живлячої напруги – 50, 40, 30, 10 Гц

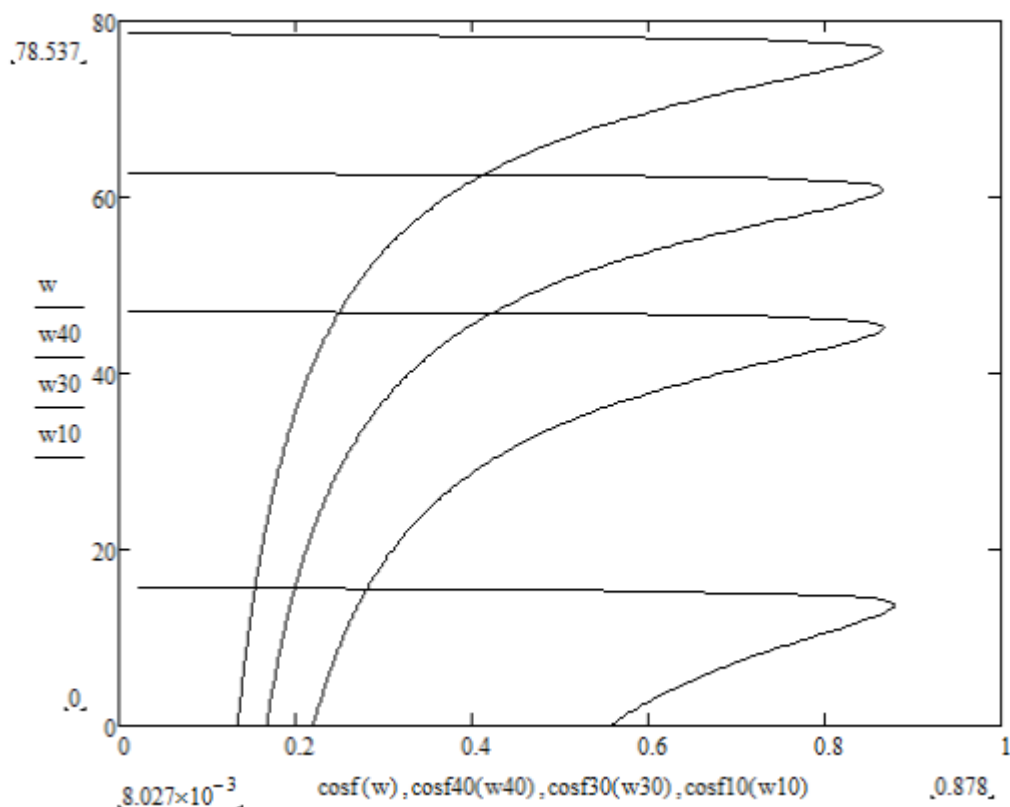


Рисунок 4.6 - Залежність коефіцієнту потужності АД при частотному регулюванні. Частоти живлячої напруги – 50, 40, 30, 10 Гц

Розділ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОТАЛКИ

4.1. Моделювання асинхронного двигуна в ортогональній системі координат « α , β , 0».

Рівняння в трифазній системі координат є громіздкими і погано піддаються вирішенню. Для спрощення системи диференціальних рівнянь АД доцільно використовувати метод лінійної заміни змінних, розглянутий в [12].

Координатна система нерухома відносно статора АД -« α , β , 0», у ній кутова швидкість ортогональної системи координат дорівнює $\omega_k = 0$. Ця система координат знаходить застосування при моделюванні АД в симетричних режимах роботи. Вісь α збігається з віссю “А”.

Для такого напрямку α усі перетворені змінні на цій осі збігаються з реальними фазними змінними.

Рівняння АД в ортогональній системі координат можуть бути записані відносно струмів або потокозчеплень.

Найбільш часто система диференціальних рівнянь АД в системі « $\alpha, \beta, 0$ » записується відносно потокозчеплень. Така система має вигляд

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - AR_s(\psi_{\alpha s}L'_r - \psi_{\alpha r}L_\mu); \\ \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = -U_{\beta s} - AR_s(\psi_{\beta s}L'_r - \psi_{\beta r}L_\mu); \\ \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = -AR'_r(\psi_{\alpha r}L_s - \psi_{\alpha s}L_\mu) + \psi_{\beta r}\omega; \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -AR'_r(\psi_{\beta r}L_s - \psi_{\beta s}L_\mu) + \psi_{\alpha r}\omega; \\ M = \frac{3}{2}pL_\mu A(\psi_{\alpha s}\psi_{\beta r} - \psi_{\beta s}\psi_{\alpha r}); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}pM - M_c. \end{cases} \quad (4.1)$$

де $A = \frac{1}{L_s L_r - L_\mu^2}$, R_s , R_r - активний опір фази відповідно статора і ротора;

L_s , L_r - повна індуктивність обмоток відповідно статора і ротора; L_μ - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

Значення струмів зв'язані з потокозчепленнями такими рівняннями:

$$i_{\alpha s} = A(L_s \psi_{\alpha s} - L_\mu \psi_{\alpha r}); \quad (4.2)$$

$$i_{\beta s} = A(L_s \psi_{\beta s} - L_\mu \psi_{\beta r}); \quad (4.3)$$

$$i_{\alpha r} = A(L_r \psi_{\alpha r} - L_\mu \psi_{\alpha s}); \quad (4.4)$$

$$i_{\beta r} = A(L_r \psi_{\beta r} - L_\mu \psi_{\beta s}). \quad (4.5)$$

Перетворені напруги

$$\begin{cases} U_\alpha = U_A = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0); \\ U_\beta = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \end{cases} \quad (4.6)$$

4.3. Аналіз віртуальної моделі асинхронного двигуна у середовищі MATLAB/Simulink.

Рівняння АД у системі ортогональних координат « α , β , 0» використовуються для створення віртуальної моделі АД у бібліотеці SimPower програми Simulink.

Віртуальна модель АД з використанням елементів бібліотеки SimPower наведена на рис. 4.1., а.

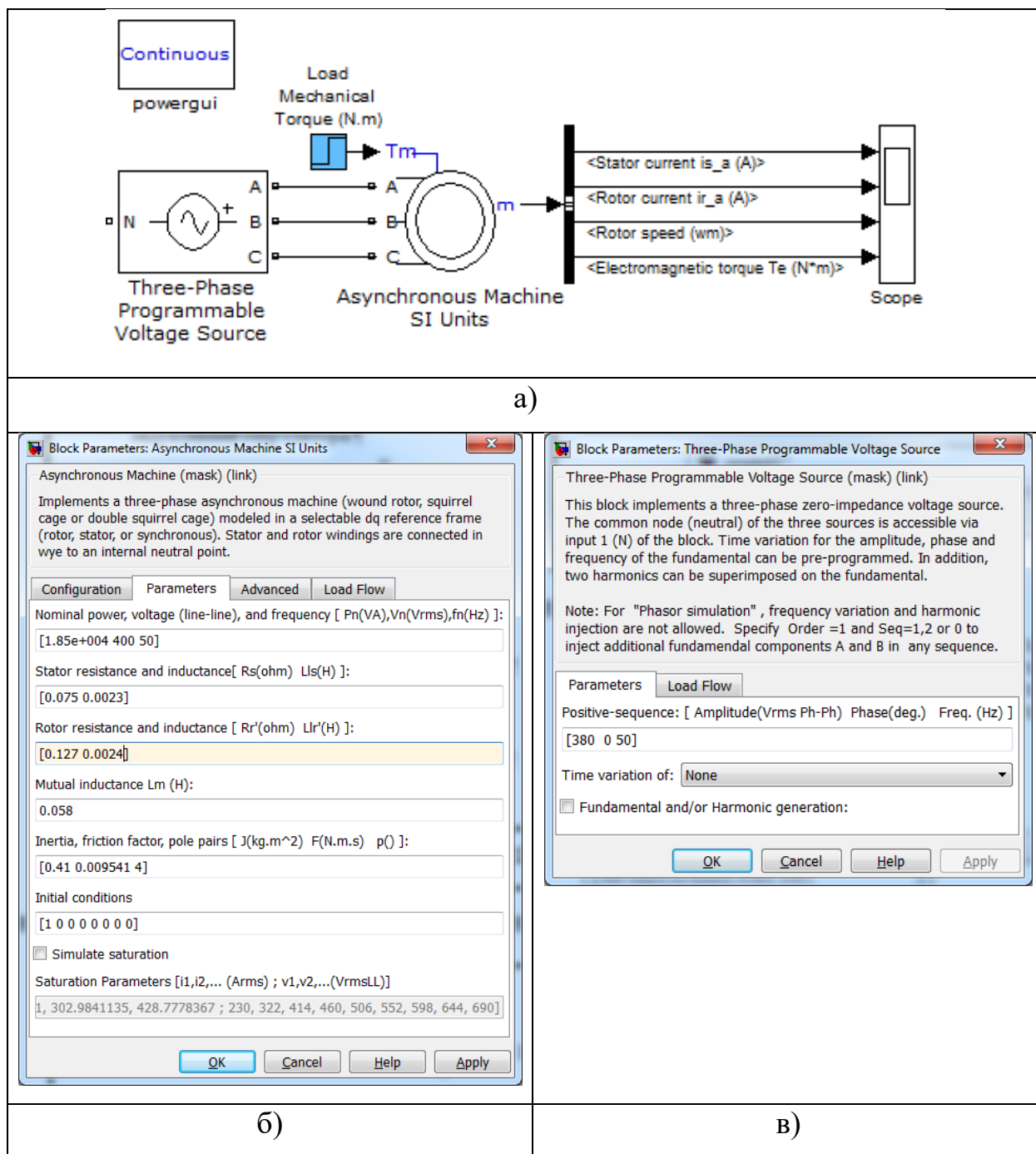


Рисунок 4.1 - Віртуальна модель АД з використанням елементів бібліотеки SimPower

На рис.4.1.б, в зображено діалогові вікна налаштування параметрів асинхронного двигуна та трифазного джерела живлення відповідно.

Для розрахунку динамічних режимів використовувався метод Дорманда-Прінса з максимальним кроком інтегрування $h = 0.001$ с.

Отримані графіки електромеханічних процесів у моделі з визначеними у п.3.1. параметрами наведено на рис. 4.3. Показано діаграми для струмів статора та ротора, а також швидкість та електромагнітний момент АД при запуску вхолосту. При $t = 2,5$ с момент навантаження АД зростає до номінального $M_{ст} = 220$ Нм. На рис.4.3.б наведено діаграми процесів АД при зростанні навантаження у збільшеному масштабі часу.

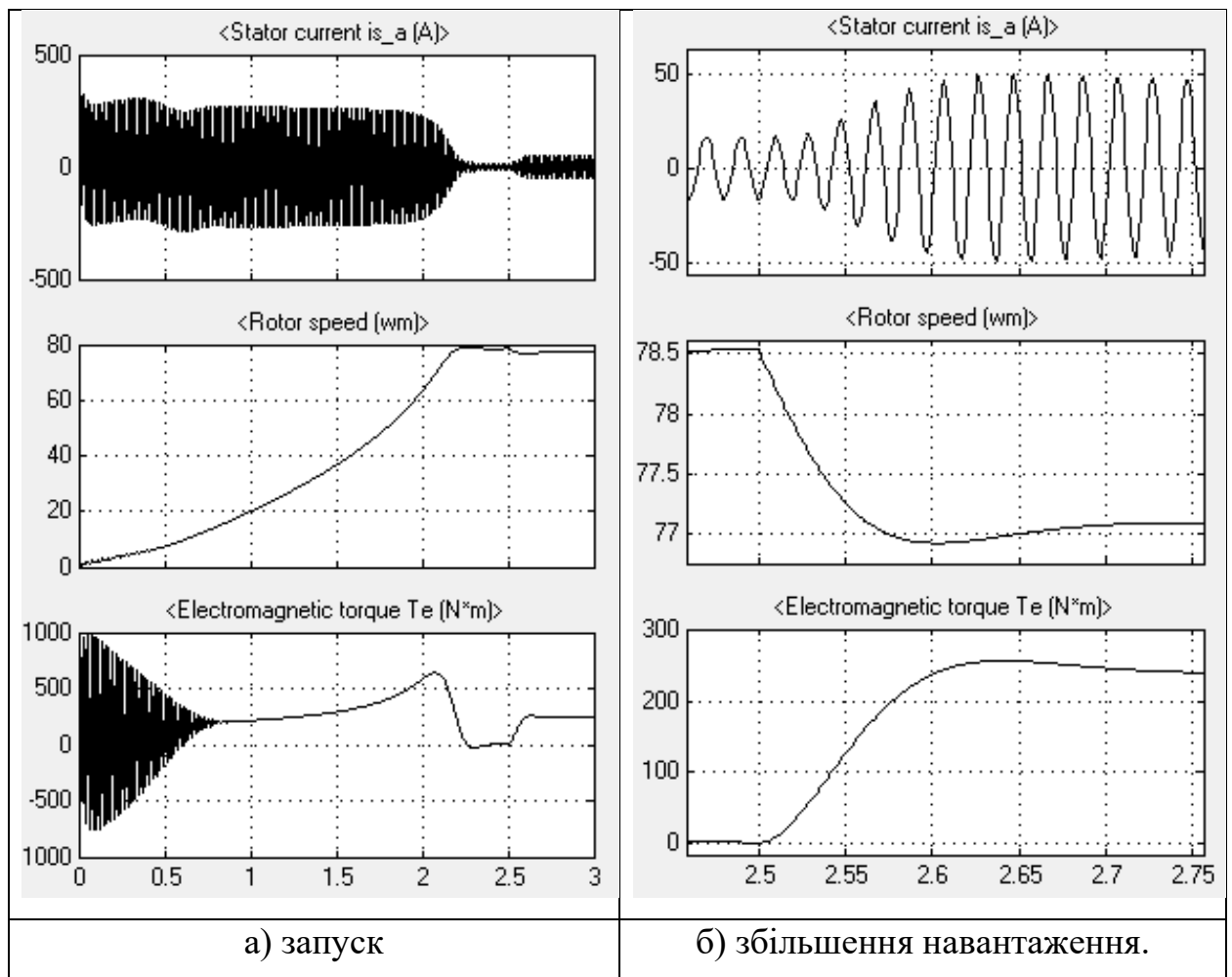


Рисунок 4.2 - Часові діаграми запуску АД та реакції на збільшення навантаження.

Як видно з рис.4.3.б, значення струмів та кутової швидкості при номінальному навантаженні задовільно співпадають з паспортними даними асинхронного двигуна, табл. 4.1.

Табл.4.1. Порівняння результатів моделювання з паспортними та розрахунковими даними АД.

Параметр	Паспортні дані	Експериментальні дані
Струм намагнічування, А	12,03	11,66
Номінальний струм статора, А	41	40,23
Номінальна швидкість, 1/с	76,97	77,084

4.4. Особливості математичних моделей елементів електромеханічної системи.

При створенні віртуальної моделі електромеханічної системи слід урахувати ті важливі особливості, що привносяться системою керування швидкістю електропривода та технологічним механізмом.

4.4.1. Математичне моделювання технологічного механізму.

Особливістю моталки як технологічного механізму, що створює навантаження для електроприводу є залежність моменту опору механізму та моменту інерції технологічного механізму від кількості стрічки, що намотується на барабан.

Загальна вага барабана зі стрічкою складається з двох складових - власної ваги барабана та ваги намотаної стрічки. Момент опору, що створюється силами тертя, прямо пропорційний загальній вазі барабана:

$$M_{\text{ст}} = \alpha \cdot (G_{\text{б}} + G_{\text{стр}})$$

Тому при намотуванні стрічки момент опору моталки монотонно зростає.

Робочий орган (барабан) моталки є суцільним циліндром, тому його момент інерції можна визначити за виразом:

$$J_{\text{мех}} = \frac{1}{2} \cdot (m_{\text{Б}} + m_{\text{СТР}}) \cdot R^2$$

При намотуванні стрічки на приймальний барабан збільшується вага стрічки $m_{\text{СТР}}$ а також зовнішній радіус циліндра.

Ці явища необхідно враховувати при синтезі замкнутих систем керування електроприводом.

4.4.3. Особливості побудови перетворювачів частоти для ПЧ-АД

Почнемо розглядати ШІМ з однократної модуляції, коли на напівперіоді вихідної напруги розташовується тільки один імпульс (рис. 4.3). Функція $u(\omega t)$ на цьому рисунку представлена у вигляді парної $u(\omega t) = u(-\omega t)$, крім того, існує симетрія даної функції щодо осі ωt . Отже, в спектрі напруги повинні бути відсутні парні гармоніки, а коефіцієнти ряду Фур'є, що визначають амплітуди і фази гармонік, знаходяться із співвідношення [3]:

$$U_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(\omega t) \cos n\omega t d\omega t, \quad (4.7)$$

де $n = 1, 3, 5, \dots$ – номер гармоніки; $\omega = 2\pi/T$ – частота основної (першої) гармоніки.

З (4.7) для імпульсної напруги отримаємо:

$$U_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi D/2} u(\omega t) \cos n\omega t d\omega t = \frac{4U}{\pi n} \sin n \frac{\pi D}{2}. \quad (4.8)$$

Функція $u(\omega t)$, показана на рис.4.3, замінюється тригонометричною сумою:

$$u(\omega t) = U_1 \cos \omega t + U_3 \cos 3\omega t + \dots + U_n \cos n\omega t,$$

де коефіцієнти $U_1, U_3, \dots, U_n$, мають позитивний або негативний знак, визначаються відповідно до (4.8).

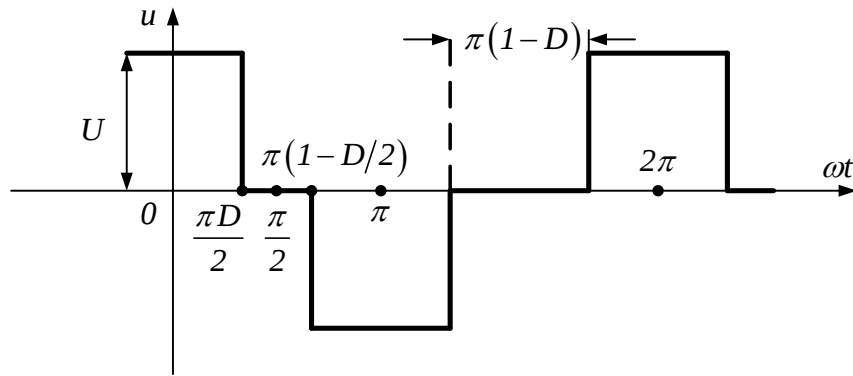


Рисунок 4.3 - ШІМ з однократною модуляцією.

Для виключення третьої гармоніки тривалість половини імпульсу в кутових одиницях згідно (29) повинна дорівнювати:

$$\frac{\pi D}{2} = \pi/3.$$

П'ята гармоніка буде відсутня, якщо має місце рівність:

$$\frac{\pi D}{2} = \pi/5.$$

Очевидно, що одночасне виключення третьої і п'ятої гармонік в кривій на рис.6 неможливо при будь-яких кутах $\pi D/2$. Можна графічно показати, яким чином відбувається виключення тієї або іншої гармоніки із спектру імпульсної напруги $u(\omega t)$. Для цього достатньо відзначити, що саме показує загальний вираз (3.30) у разі імпульсної напруги $u(\omega t)$, що володіє парністю функції і симетрією щодо осі ωt . Інтеграл в (3.31) показує сумарну площу за чверть періоду тих ділянок кривої n-ої гармоніки, які відповідають ненульовим значенням імпульсної напруги. Наприклад, функція $U_3 \cos 3\omega t$ при імпульсній напрузі (рис. 6) і значенні $\frac{\pi D}{2} = \pi/3$ обертається в нуль. При цьому значенні $\pi D/2$ всі гармоніки кратні трьом також дорівнюють нулю. Підтвердження цьому показано на рис.9, де можна побачити рівність позитивної і негативної

площ косинусної функції на інтервалі, де $u(\omega t)$ не дорівнює нулю. Якщо на рис.9 показати п'яту гармоніку $U_5 \cos 5\omega t$, а U_5 визначити з (29), можна побачити, що сума позитивних і негативних площ на інтервалі $0 \dots \pi/3$ не дорівнює нулю.

Розглянемо складніші види однополярної напруги за напівперіод, коли імпульс, показаний на рис.6, розділяється на два або більшу кількість імпульсів на напівперіоді, тобто коли ШІМ стає багатократною.

На рис.10 показана напруга, в якій початковий імпульс на напівперіоді ділиться на два з одним нульовим проміжком (паузою) між ними. Визначимо n -й коефіцієнт ряду Фур'є ($n = 1, 3, 5, \dots$, коефіцієнти при парних номерах гармонік дорівнюють нулю). Використовуємо для розрахунку формулу (28):

$$U_n = \frac{4}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi D}{2}}^{\alpha + \frac{\pi D}{2}} U \cos n\omega t = \frac{4U}{\pi n} \sin n\omega t \Big|_{\alpha - \frac{\pi D}{2}}^{\alpha + \frac{\pi D}{2}} =$$

$$= \frac{8U}{\pi n} \sin \left(n \frac{\pi D}{2} \right) \cos n\alpha. \quad (4.9)$$

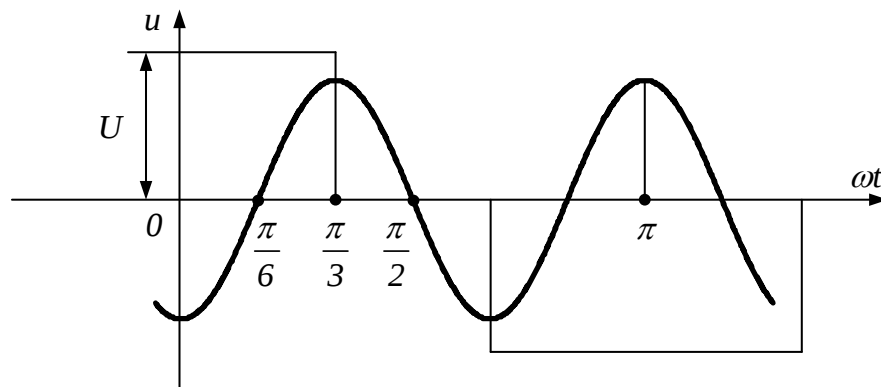


Рисунок 4.4 - Рівність позитивної і негативної площі функції $-\cos(\omega t)$ на інтервалі $0 \dots \pi/3$ показує, що третя гармоніка виключається з ряду Фур'є.

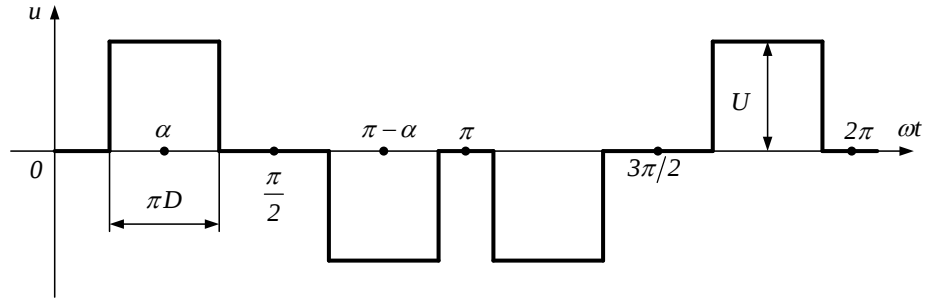


Рисунок 4.5 - Напруга з одним нульовим проміжком між імпульсами.

Як показує останнє співвідношення, вибираючи кут $\alpha = \pi/6$, можна усунути третю гармоніку при будь-якому значенні πD від 0 до $\pi/3$; при $\alpha = \pi/10$ буде відсутня п'ята гармоніка, значення πD може при цьому змінюватися від 0 до $\pi/5$. Одночасно не можуть бути усунені обидві низькі гармоніки – третя і п'ята.

Нехай тепер на напівперіоді розташовуються три імпульси з двома нульовими інтервалами напруги між ними (рис.12). Для даної тут імпульсної напруги характерно, що вона може бути виражена у вигляді парної функції, причому тривалість середнього імпульсу може бути відмінною від тривалості двох крайніх. Кут α на рис.10 відповідає середині останнього імпульсу на чверті періоду, тривалості середнього і крайніх імпульсів рівні відповідно πD_1 і πD_2 (в кутових одиницях).

Коефіцієнти ряду Фур'є ($n = 1, 3, 5, \dots$) визначаються завідомими формулами:

$$U_n = \frac{4}{\pi} U \left(\int_0^{\pi D_1/2} \cos n\omega t + \int_{\alpha - \frac{\pi D_2}{2}}^{\alpha + \frac{\pi D_2}{2}} \cos n\omega t \right) = \quad (4.10)$$

$$= \frac{4U}{\pi n} \left\{ \sin\left(\frac{n\pi D_1}{2}\right) + \sin\left[n\left(\alpha + \frac{\pi D_2}{2}\right)\right] - \sin\left[n\left(\alpha - \frac{\pi D_2}{2}\right)\right] \right\}.$$

Нехай кут, при якому закінчується останній імпульс в першій чверті періоду, тобто $\alpha + \frac{\pi D_2}{2}$, рівний $\pi/3$. Використаємо (4.10) та визначимо при даній умові, чи можливе одночасне усунення третьої та п'ятої гармонік в спектрі. З (3.33) отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \sin(3\pi D_1/2) - \sin[3(\alpha - \pi D_2/2)] = 0; \\ \sin(5\pi D_1/2) - \sin[5(\alpha - \pi D_2/2)] = \sqrt{3}/2. \end{cases}$$

Вирішуючи останню систему рівнянь чисельним методом, надамо значення тривалості імпульсу πD_1 і різниці $\alpha - \pi D_2/2$:

$$\begin{aligned} \pi D_1 &= \frac{4}{15} \pi; \\ \alpha - \pi D_2/2 &= \frac{3}{15} \pi. \end{aligned} \tag{4.11}$$

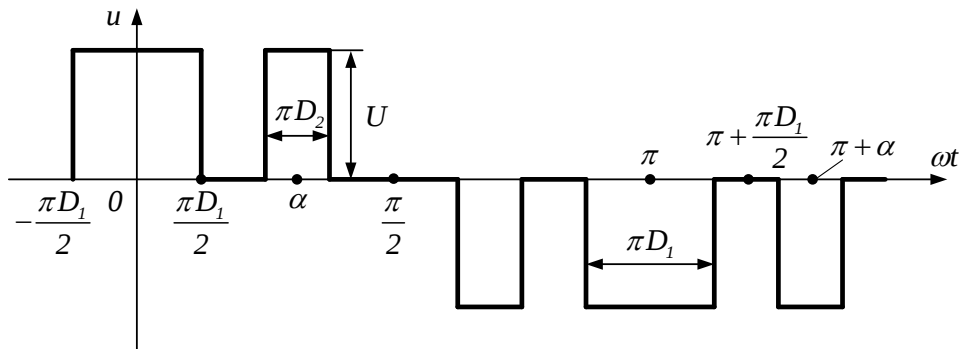


Рисунок 4.6 - Напруга з двома нульовими проміжками між імпульсами.

Оскільки сума кутів $\alpha + \pi D_2/2$ дорівнює $\pi/3$, отримаємо:

$$\alpha = \frac{4}{15} \pi; \quad \pi D_2 = \frac{2}{15} \pi. \tag{4.12}$$

Таким чином, значення кутів (3.34), (3.35) дозволяє виключити із спектру дві низькі гармоніки – третю і п'яту. При цих же значеннях кутів із спектру усуваються всі гармоніки кратні трьом, але залишається частина гармонік кратних п'яти.

Розглянемо аналіз ще одного виду однорівневої імпульсної напруги, в якому на напівперіоді розташовуються чотири імпульси з трьома нульовими інтервалами між ними (рис.4.7). Тривалість кожного імпульсу в кутових одиницях πD , середини імпульсів, відлічувані від початку координат, відповідають кутам α_1 і α_2 .

Коефіцієнти, що визначають амплітуди непарних гармонік (амплітуди парних гармонік дорівнюють нулю), визначаються з (3.30):

$$U_n = \frac{4}{\pi} U \left(\int_{\alpha_1 - \pi D/2}^{\alpha_1 + \pi D/2} \cos n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_2 - \pi D/2}^{\alpha_2 + \pi D/2} \cos n\omega t d\omega t \right) =$$

$$= \frac{8}{\pi n} U \sin \left(n \frac{\pi D}{2} \right) \cdot \cos [\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2].$$

Складемо систему рівнянь, яка визначає відсутність всіх гармонік кратних трьом і п'яти одночасно:

$$\begin{cases} \cos k3\alpha_1 + \cos k3\alpha_2 = 0; \\ \cos k5\alpha_1 + \cos k5\alpha_2 = 0. \end{cases} \quad (4.13)$$

де k – номер кратності гармонік (1,3,5...). Для вирішення системи (4.13) приведемо її до вигляду:

$$\begin{cases} \cos \left(k3 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) + \cos \left(k3 \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) = 0; \\ \cos \left(k5 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) + \cos \left(k5 \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) = 0. \end{cases}$$

Остання система дозволяє отримати аналітичне рішення:

$$\alpha_1 = \frac{1}{15} \pi; \alpha_2 = \frac{4}{15} \pi.$$

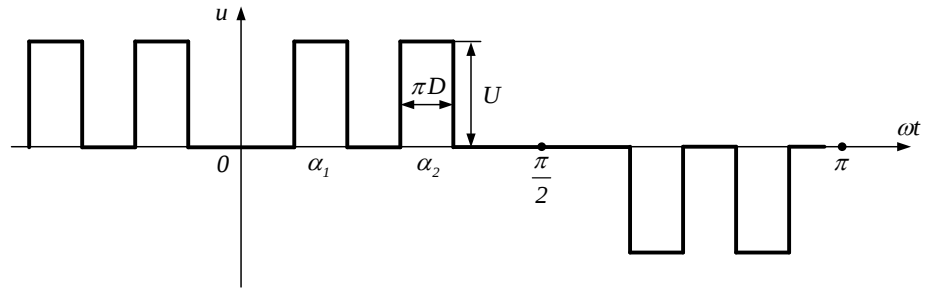


Рисунок 4.7 - Напряга з трьома нульовими проміжками між імпульсами.

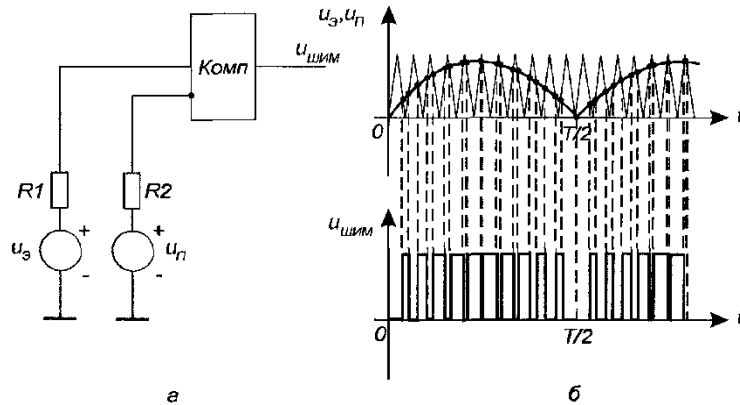


Рисунок 4.8 - Отримання послідовності імпульсів, модульованої по синусоїдальному закону.

а) схема включення компаратора з аналоговим синусоїдальним і пилоподібним високочастотним сигналами на його входах; б) діаграми напруг на входах компаратора і його виході

В даному прикладі всі гармоніки кратні трьом і п'яти будуть виключені із спектру при кутах α_1 і α_2 знайдених вище. Більш того, всі названі гармоніки виключаються при модуляції коефіцієнта заповнення D.

З даних випадків однорівневої імпульсної напруги можна бачити, що ускладнення форми напруги, тобто збільшення числа імпульсів за напівперіод, дозволяє виключити не тільки окремі низькі гармоніки, але також і кратні їм, при одночасній модуляції тривалості імпульсів.

Модуляція імпульсів по синусоїдальному закону на напівперіоді основної частоти також сприяє усуненню вищих гармонік із спектру. Дослідження імпульсних видів напруги при модуляції по синусоїдальному

закону показали їх ефективність при достатньо великому числі імпульсів на напівперіоді основної частоти.

Модуляція імпульсів по синусоїдальному закону відбувається, наприклад, при порівнянні на компараторі еталонного синусоїдального сигналу і високочастотного пилоподібного (рис. 4.8).

Синусоїдальна (u_C) і пилоподібна (u_H) напруги поступають через опори R_1 і R_2 на прямий і інверсний входи компаратора. Формування модульованих імпульсів відбувається в моменти перетину вхідних напруг. За допомогою мікропроцесора можна створити східчасту напругу близьку до синусоїдального при частотах 50...400 Гц. На збільшенні вмісту низьких гармонік у вихідній імпульсній напрузі інвертора використання східчастої еталонної напруги від мікропроцесора не відображається.

4.4. Віртуальна модель електроприводу моталки по системі ПЧ-АД.

Для розробки математичної моделі частотно-регульованого електроприводу моталки доцільно використати математичний пакет Matlab/Simulink, який надає достатньо великий набір віртуальних моделей силових електронних приладів та значно спрощує задачу моделювання перетворювального агрегату електропривода.

Розроблена віртуальна модель електропривода ліфта з частотно-регульованим асинхронним електроприводом наведена на рис. 4.9.

У цій структурній схемі реалізовано реактивний момент опору, характерний для підйомних машин, обладнаних противагою. Також на моделі реалізовано взаємопов'язане регулювання частоти живлення та напруги АД за законом Костенко стосовно до механізму з механічною характеристикою типу сухого тертя.

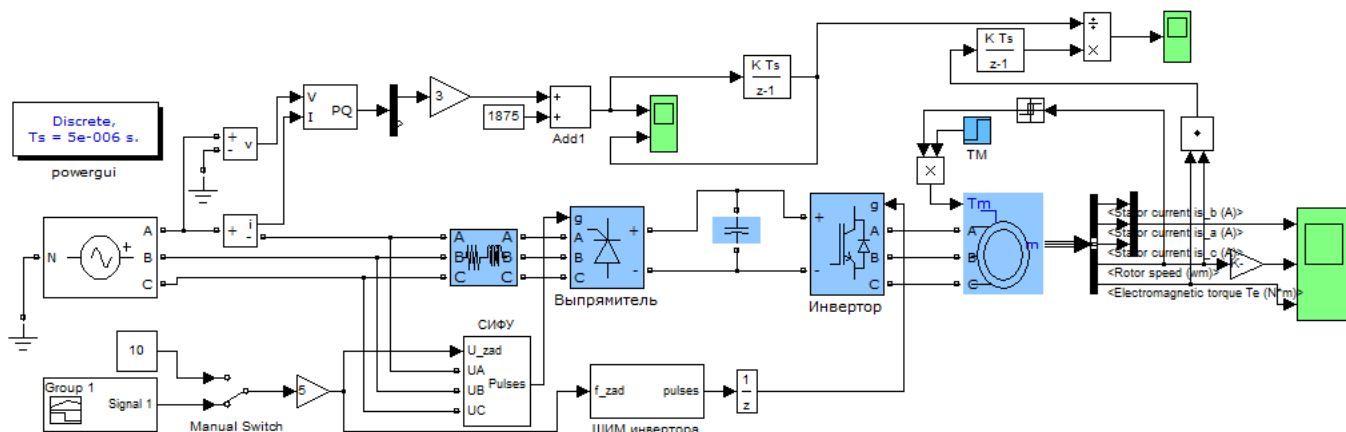


Рисунок 4.9 – Структурна схема ПЧ-АД у програмі Simulink.

Наведемо структурні схеми блоків керування випрямлячем та інвертором перетворювача частоти, рис.4.10.

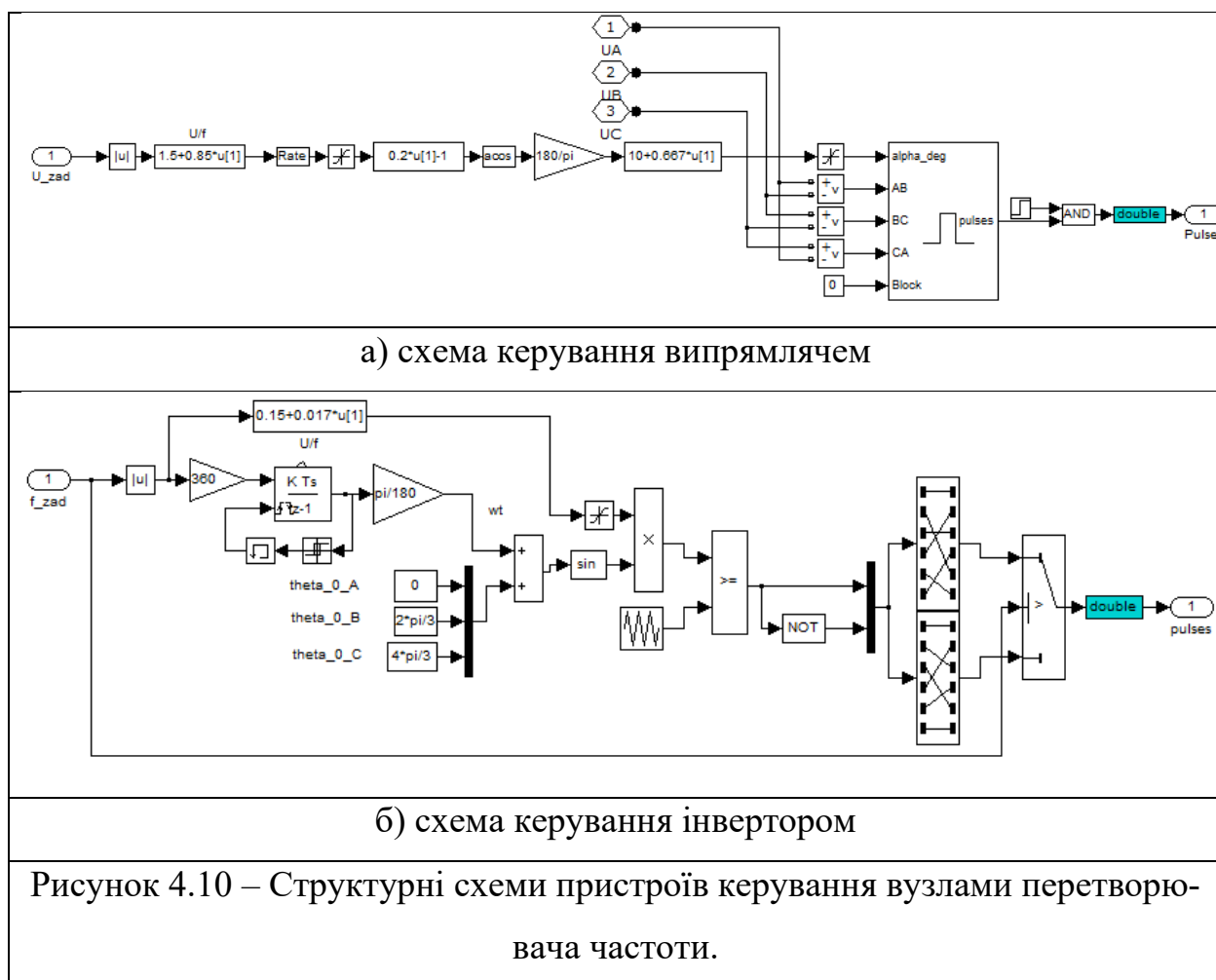


Рисунок 4.10 – Структурні схеми пристроїв керування вузлами перетворювача частоти.

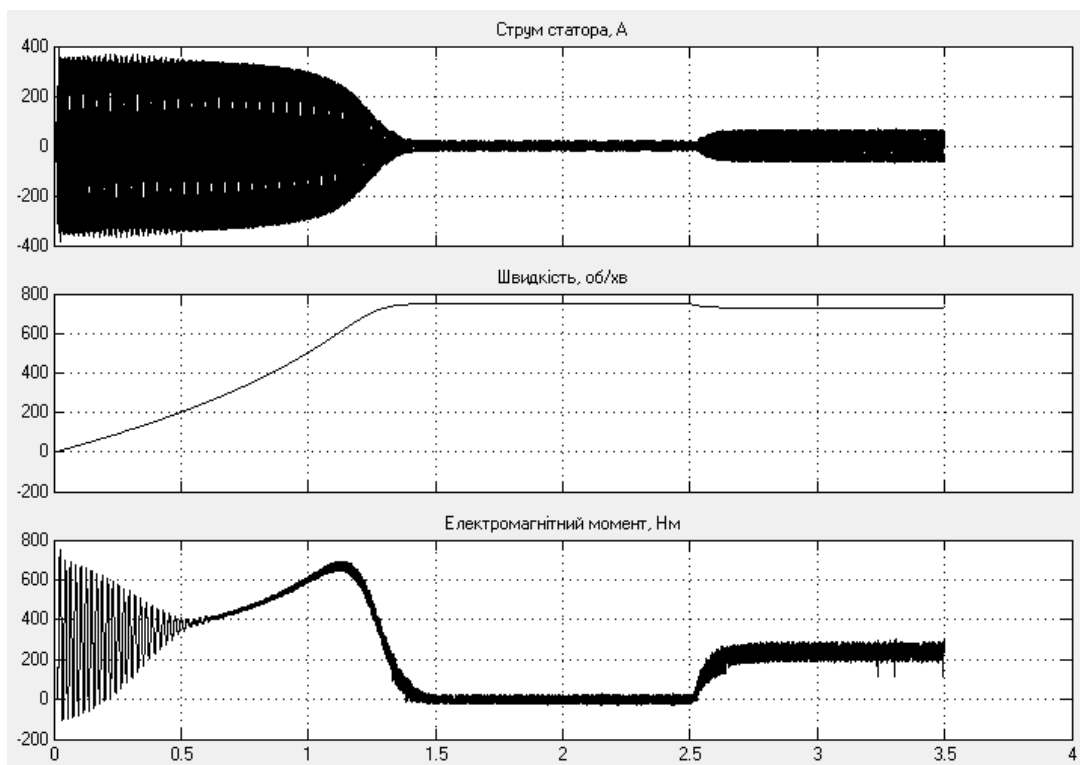
Для керування випрямлячем використовуємо стандартний блок генерації шестифазної системи керуючих імпульсів Synchronized 6-PulseGenerator. Цей

блок було доповнено ланцюгом для перетворення керуючої напруги 0-10 В у кут керування 0-90 град.

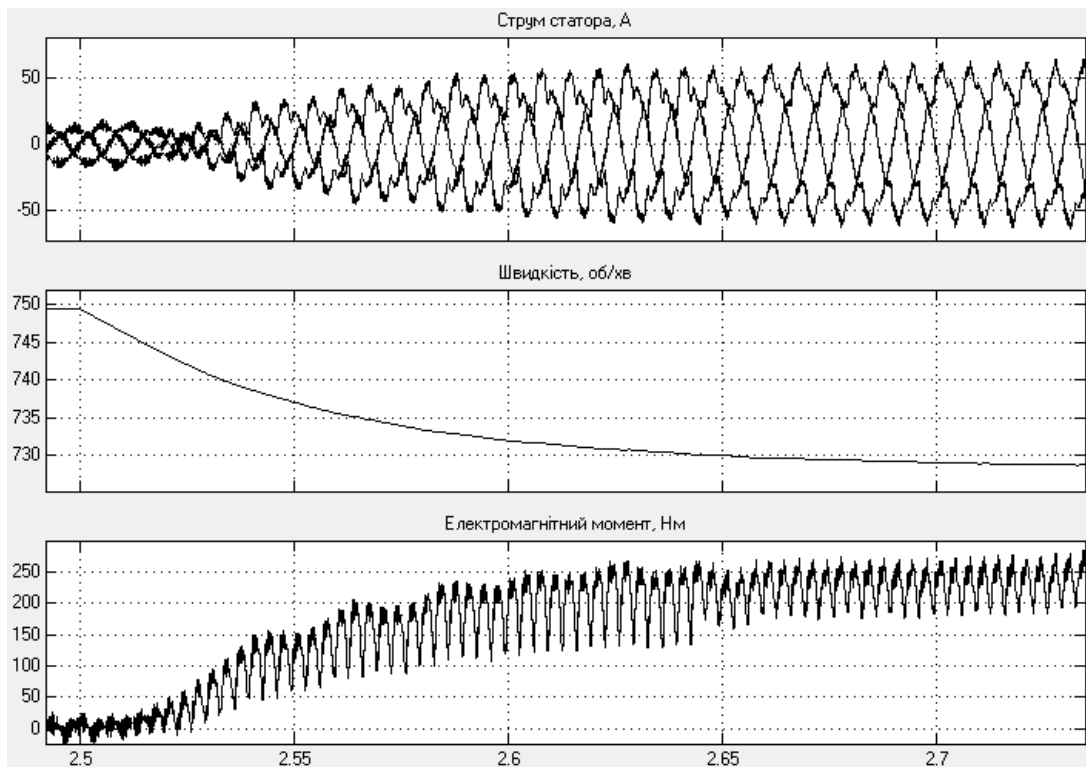
Для керування інвертором було використано інший стандартний блок – PWM generator for 6-pulse IGBT/MOSFET inverter з несучою частотою в 4000 Гц.

Для розрахунку динамічних режимів використовувався метод змінних стану без безперервних станів з сталим кроком інтегрування $h = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

Отримані графіки електромеханічних процесів у цій моделі наведено на рис. 4.11. Показано діаграми для струмів статора та ротора, а також швидкість та електромагнітний момент ПЧ-АД при запуску вхолосту. При $t = 2,5$ с момент навантаження ПЧ-АД зростає до номінального $M_{ст} = 250$ Нм. На рис. 4.11.б наведено діаграми процесів ПЧ-АД при зростанні навантаження у збільшеному масштабі часу.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Часові діаграми запуску ПЧ-АД та збільшення навантаження на валу.

4.5. Дослідження режимів енергоспоживання на віртуальній моделі.

Для дослідження енергетичних режимів ПЧ-АД перш за все необхідно доповнити модель електроприводу засобами вимірювання споживаної у ході виконання технологічного процесу потужності.

З цією метою використовуємо блок `ActiveReactivePower`, призначений для вимірювання активної та реактивної потужності у однофазному колі змінного струму.

Для обчислення складових повної потужності у несинусоїдальних колах цей блок обчислює складові повної потужності по першій гармоніці напруги та струму.

Оскільки для несинусоїдальних кіл таке визначення реактивної потужності недопустиме, то надалі будемо розглядати лише споживання активної потужності та ККД електромеханічної системи.

Оскільки миттєві значення активної та механічної потужності мають складний імпульсний склад, то будемо визначати ККД електромеханічної системи як відношення виробленої механічної енергії до спожитої електроенергії :

$$\eta = \frac{\int_0^t \omega \cdot M_{\text{эм}} dt}{\int_0^t P dt}$$

Усі необхідні елементи для визначення миттєвих значень механічної та активної потужностей, механічної та спожитої активної енергій та визначення ККД наведено на структурній схемі рис.4.9.

Для перевірки впливу режимів керування перетворювачем частоти на показники енергоспоживання у моделі було відтворено процес виконання навантажувальної діаграми електроприводу, рис. 1.1, за якою виконувався розрахунок потужності електропривода.

Необхідна керуюча напруга формується за допомогою блока SignalBuilder. Часова діаграма керуючої напруги зображена на рис. 4.13.

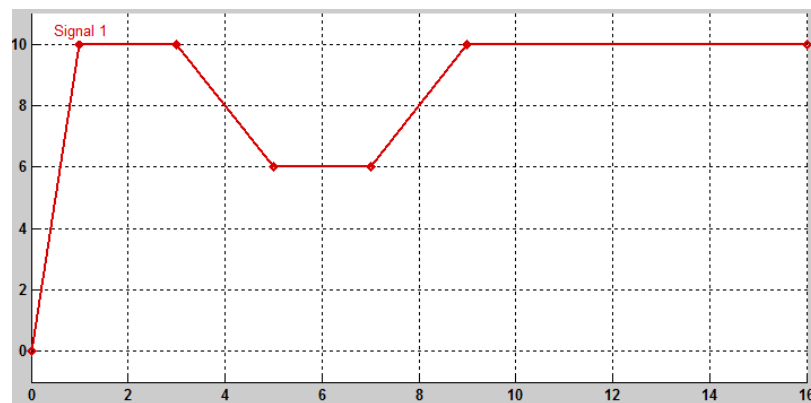


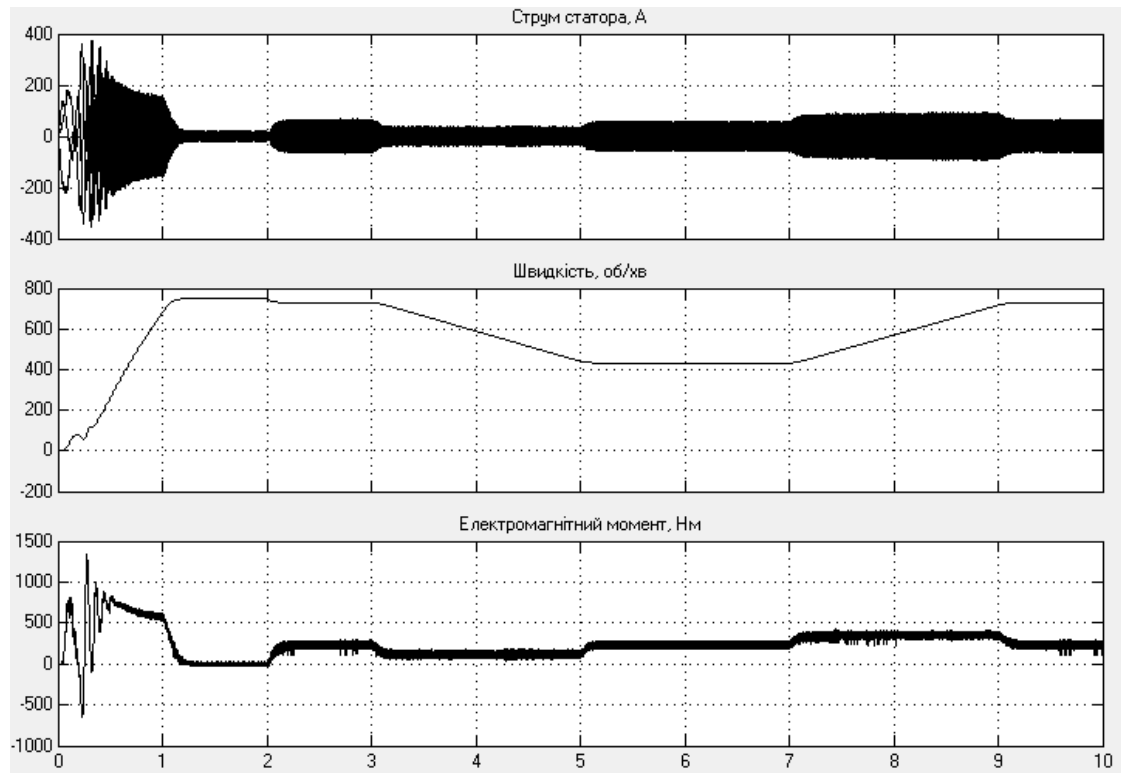
Рисунок 4.12 – Часова діаграма керуючої напруги для виконання навантажувальної діаграми технологічного механізму.

Порівнювались між собою два режими керування асинхронним двигуном з перетворювачем частоти. Перший режим (а) : керування частоти при постійній, максимально можливій напрузі статора. Другий режим (б): режим поєднаного керування напруги та частоти згідно закону Костенко. Для моталки,

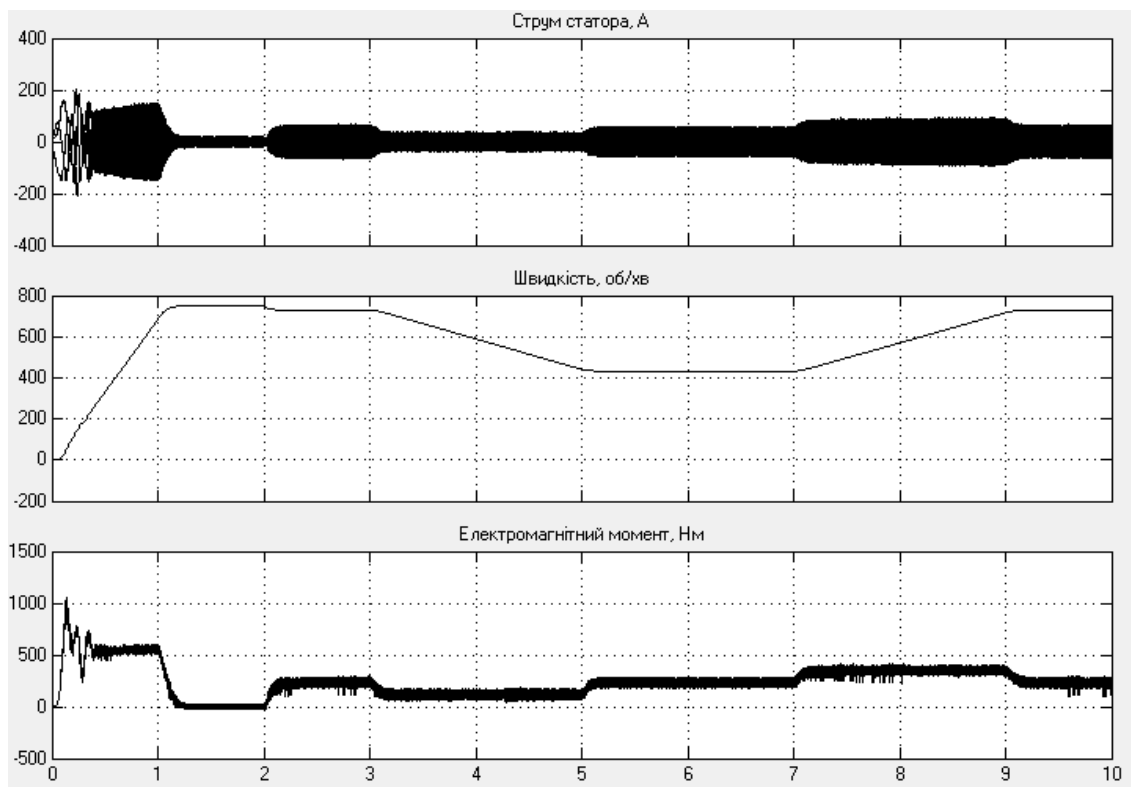
момент опору якої утворюється в основному за рахунок сил тертя, необхідно реалізувати закон керування $U/f = \text{const}$.

На рис.4.13 наведено часові діаграми струмів статора, швидкості обертання та електромагнітного моменту асинхронного двигуна при відпрацюванні навантажувальної діаграми і різних принципах керування перетворювачем частоти.

З часових діаграм рис.4.13 досить виразно помітно різницю у фазних струмах статора та характеру розгону-гальмування при зміні керуючої напруги. Розглянемо, як закон керування перетворювачем частоти впливатиме на споживання активної потужності та коефіцієнт корисної дії електромеханічної системи.



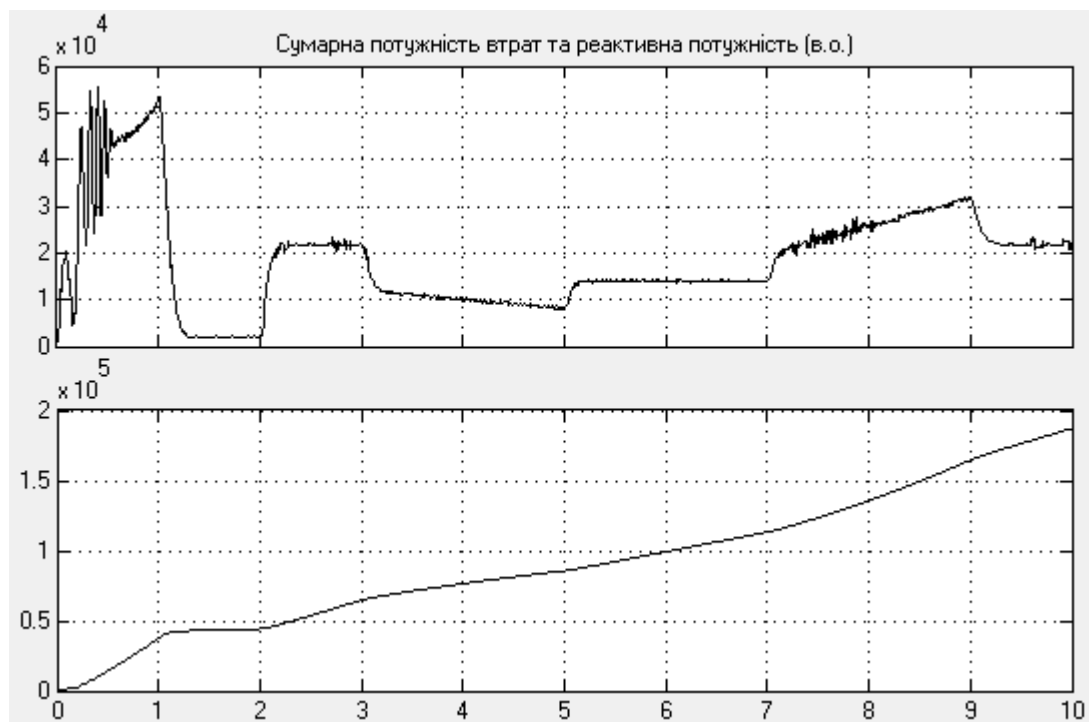
а)



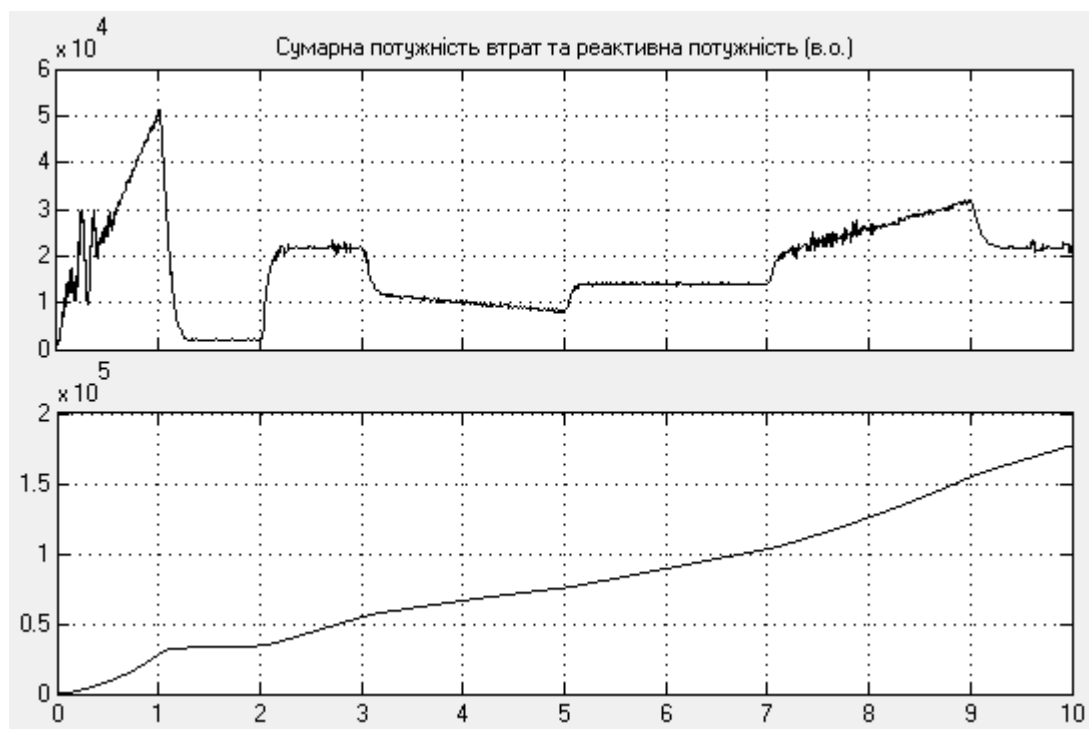
б)

Рисунок 4.13 - Відпрацювання навантажувальної діаграми при різних законах керування перетворювачем частоти.

На рис.4.14. наведено часові діаграми миттєвої активної потужності та активної енергії, споживаної електромеханічною системою для вказаних вище режимів керування перетворювачем частоти.



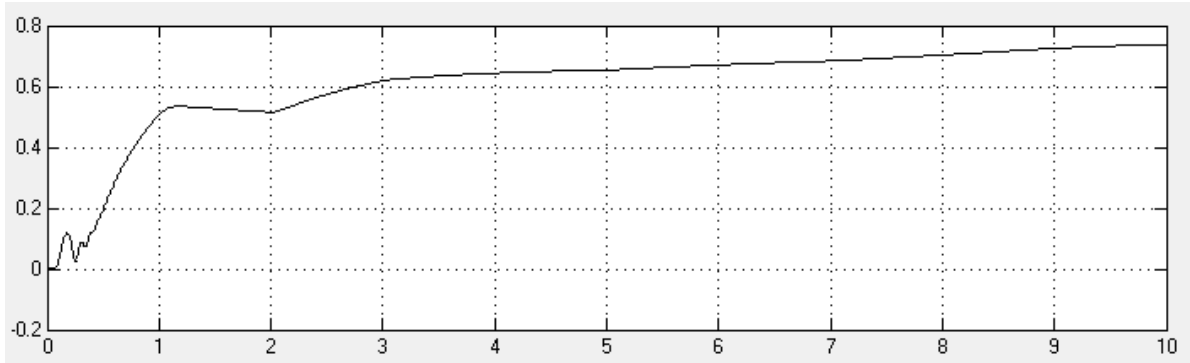
а)



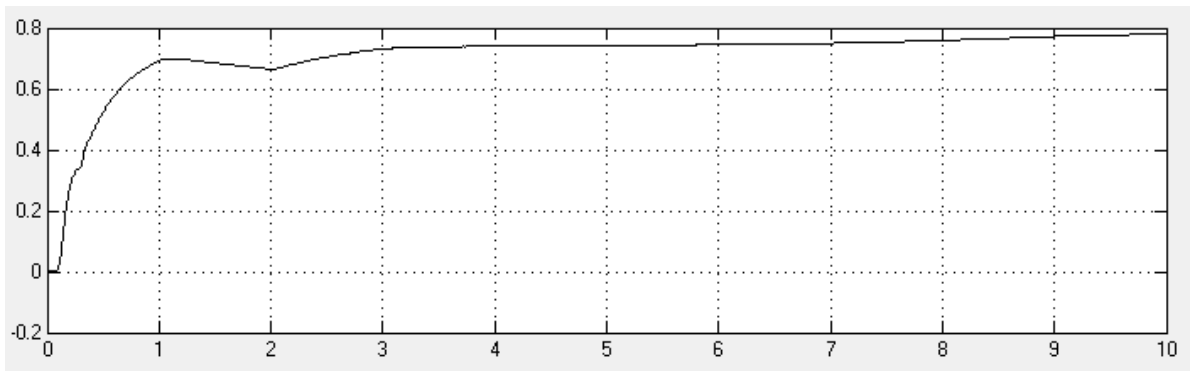
б)

Рисунок 4.14 - Споживання активної потужності та активної складової енергії при різних законах керування перетворювачем частоти.

На рис.4.15. наведено часові діаграми коефіцієнту корисної дії електро-механічної системи системою для вказаних вище режимів керування перетворювачем частоти.



а)



б)

Рисунок 4.15 - Споживання активної потужності та активної складової енергії при різних законах керування перетворювачем частоти.

Ці діаграми підтверджують необхідність використання поєднаного керування напруги та частоти АД згідно з законом Костенко. Особливо наглядно переваги такого керування видно на початковій стадії запуску електроприводу.