

АНТОНЕНКО Антон Артемович

Розробка електроприводу механізму пересування візка мостового крана вантажопідйомністю 32,5 т в умовах ПАТ «ДТЕК Дніпрообленерго»  
проф. Титюк В.К.

## **ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА**

### **Розділ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МОСТОВИХ КРАНІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

#### **1.1 Облаштування і характеристики мостових кранів загального призначення**

Мостові крани загального призначення класифікуються відповідно до особливостей конструкції наступним чином:

1. Залежно від способу опори на крановий шлях, крани поділяють на два основні типи — підвісні та опорні. Підвісні крани закріплюються до нижніх полиць двотаврових балок, які, у свою чергу, з'єднані з перекриттями будівлі. Рух таких кранів здійснюється по внутрішній частині нижніх полиць балок за допомогою ходових коліс.

Опорні ж крани мають ходові колеса, які пересуваються по рейках, закріплених на спеціальних підкранових балках. Ці балки встановлюють на верхній частині колон виробничих будівель або на естакадах.

2. За конструкцією моста розрізняють однобалкові (кран-балки) та двобалкові моделі. Однобалковий міст має лише одну головну балку, тоді як у двобалкового мосту передбачено дві головні балки, з'єднані кінцевими балками, в яких розміщено ходові механізми.

3. За типом приводу механізмів крани класифікують на моделі з ручним управлінням та з електроприводом, що забезпечує підйом вантажів і пересування самої конструкції.

Якщо потрібно, можу також адаптувати текст під науковий стиль або для оформлення в дипломній роботі.

У кранах із ручним керуванням для піднімання та переміщення вантажів використовуються ручні пересувні талі з черв'ячним приводом. Пересування самого крана здійснюється за допомогою трансмісійного вала, який з'єднує ведучі ходові колеса з приводним колесом, через яке пропущено замкнений тяговий ланцюг. Такі крани доцільно застосовувати у випадках, коли необхідно піднімати або переміщати вантажі малої маси з невеликою швидкістю, наприклад, під час ремонтних робіт або при виконанні допоміжних транспортних задач.

Найширше розповсюдження отримали мостові крани з електроприводом. Вони оснащуються механізмами підіймання у вигляді електричних талей або лебідок, змонтованих на спеціальних самохідних візках. Ці візки рухаються вздовж моста крана за допомогою системи, що включає електродвигун, редуктор і колеса. Сам міст також приводиться в рух електродвигунами, які через редуктор або комбінацію редуктора і трансмісії обертають ходові колеса.

В опорних однобалкових кранах з електроприводом вантаж піднімається і переміщується електроталлю, яка рухається вздовж головної балки, спираючись колесами на її нижню полицю. Механізм пересування складається з електропривода, трансмісійного вала та ходових коліс, встановлених у кінцевих балках і опертих на рейкову колію. Для кранів з великим прольотом конструкція головної балки підсилюється горизонтальними фермами, що забезпечують підвищену вантажонесучу здатність.

У двобалковому мостовому крані опорного типу (рис. 1.1) конструкція моста утворена двома головними балками, які сполучаються з кінцевими балками, що містять ходові колеса. Саме через ці колеса кран спирається на рейки. По верхній частині головних балок прокладені візкові рейки, по яких переміщується візок із вантажопідіймальним механізмом перпендикулярно основному напрямку руху крана.

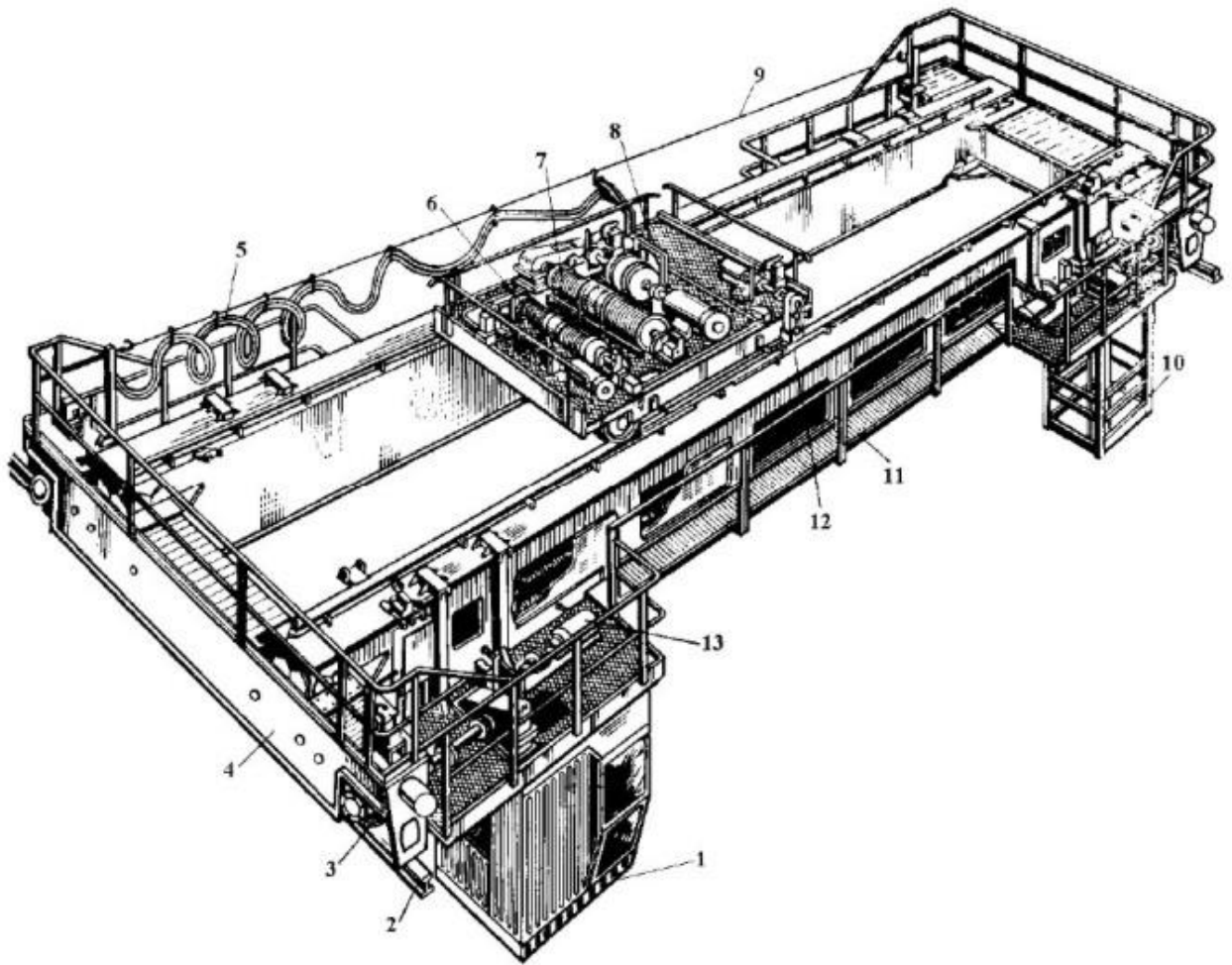


Рисунок 1.1 - Двобалочний мостовий кран опорного типу

1 - кабіна; 2 - підкранові шляхи; 3 - ходові колеса; 4 - кінцеві балки; 5 - гнучкий кабель; 6 - допоміжний механізм підйому; 7 - головний механізм підйому; 8 - кранова візок; 9 - провідка; 10 - майданчик для обслуговування; 11 - міст; 12 - механізм пересування візка; 13 - механізм пересування крана.

Візок обладнаний механізмами головного і допоміжного підйомів, а також механізмом переміщення по мосту крана. Пересування самого мосту крана вздовж цеху здійснюється за допомогою окремих приводів, встановлених на майданчиках, що приводять у рух кожне з ведучих коліс окремо.

Керування усіма крановими механізмами здійснюється з кабіни, що закріплена безпосередньо на мостовій частині крана. Електродвигуни, які забезпечують роботу механізмів, підключаються до цехових тролей, що зазвичай

виготовлені з кутової сталі та змонтовані на ізоляторах вздовж стіни виробничої будівлі. По цих троліях переміщуються струмознімальні черевики, з'єднані з металевою конструкцією моста крана.

Для обслуговування троліїв і струмознімачів на мосту передбачено спеціальну додаткову кабіну-колиску. Доступ до неї, як і до основної кабіни оператора, забезпечується з обслуговуючого майданчика, розміщеного на мосту. Живлення двигунів візка часто організоване через гнучкий кабель.

В окремих типах кранів електропостачання двигунів візків реалізується за допомогою троліїв, розташованих уздовж однієї з головних балок моста. У таких випадках струм передається через спеціальні струмознімачі, закріплені на рамі візка.

Останнім часом усе ширшого застосування набуває система живлення двигунів візка за допомогою каретки для перенесення кабелю, яка рухається синхронно з візком уздовж моста. Така конструкція дозволяє значно знизити механічні навантаження на кабелі та запобігти їхнім пошкодженням через надмірні вигини, що часто виникають у процесі експлуатації.

**Металоконструкції мостів і кранів.** Міст двобалкового крана має рамну конструкцію, яка включає дві головні (пролітні) балки та дві кінцеві балки, де розміщуються ходові колеса агрегату.

Найчастіше головні балки виконані у вигляді прямокутного коробчастого зварного профілю, що формується з чотирьох сталевих листів або гнутих елементів. Іноді для виготовлення використовуються ґратчасті ферми. Такий тип конструкції забезпечує високу міцність та стійкість до згинальних навантажень як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. Внутрішню вертикальну стінку головної балки, звернену до центру моста, називають основною, а протилежну – зовнішньою або допоміжною. У деяких випадках зовнішню стінку виконують у вигляді ферми без косинок, створюючи у ній прямокутні отвори з бортиками, що дозволяє зменшити вагу всієї конструкції.

Горизонтальні частини балки мають назви: верхній та нижній пояси. У середині головної балки, перпендикулярно її осі, монтують вертикальні сталеві діафрагми різної висоти — малі та великі, які зварюються з трьох боків: до обох вертикальних стінок і верхнього поясу. Висота великих діафрагм майже дорівнює висоті балки, а в їхніх повернях іноді прорізають отвори з округленими кутами. Під великими діафрагмами залишають зазор до нижнього поясу. Ці діафрагми збільшують жорсткість балок, виконують функцію опори під візкові рейки, перешкоджають деформації верхнього поясу та загалом підвищують просторову жорсткість моста.

У конструкціях, де висота балки втричі більша за ширину, у середині балки розміщують електрообладнання.

Щоб компенсувати прогини, які виникають при великих навантаженнях, у головні балки заздалегідь вводять спеціальну випуклість вгору — будівельний підйом. Для цього вертикальні листи під час виготовлення розкрояють із урахуванням цієї деформації.

На верхньому поясі головної балки встановлюють візкові рейки, по яких рухається візок. По обох краях цих рейок монтують обмежувачі, що запобігають виходу візка за межі. До зовнішніх стінок балок уздовж усієї довжини прикріплюють робочі платформи та перехідні майданчики для зручності монтажу та обслуговування обладнання, тролей і апаратури. Ці конструкції складаються з опорних кронштейнів, настилу та огорожень. До металоконструкції моста також відносять драбини для підйому в кабінку кранівника, а також сходи й перила для переходу по кінцевій балці на інший бік моста. Незалежно від типу головних балок, кінцеві балки виконуються у вигляді прямокутного коробчастого профілю. На їхніх кінцях встановлюються букси або осі балансирів для монтажу ходових коліс, а також кінцеві вимикачі, буфери й обмежувачі руху. У кранах, що працюють на відкритому повітрі, у середині кінцевих балок передбачено протиугінні пристрої — механізми, які утримують кран від зміщення під дією вітру.

З'єднання головних балок з кінцевими виконується за допомогою зварних накладок або опорних пластин на високоміцних болтах.

У випадку, коли міст поставляється двома блоками (по одній головній балці з половинками кінцевих), їх скріплюють монтажними накладками.

**Механізми пересування кранів.** Для переміщення мостових кранів використовують механізми з центральним і відокремленим приводом (рис. 1.2).

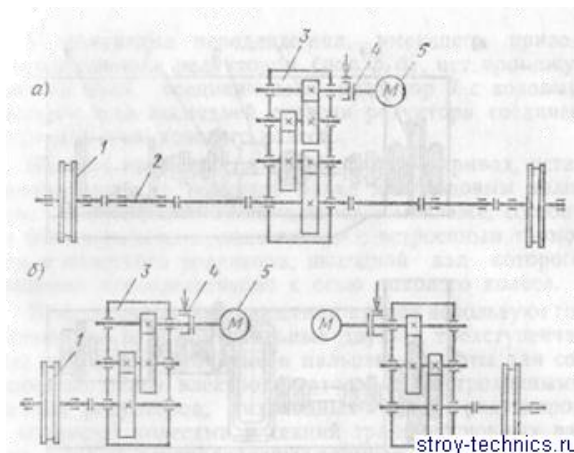


Рисунок 1.2 - Схеми пересувних механізмів мостових кранів:

а — з центральним приводом і малошвидкісним валом;

б — з індивідуальними приводами.

Позначення: 1 — ходове колесо, 2 — передавальний вал, 3 — редуктор, 4 — гальмівний пристрій, 5 — електропривод.

На рисунку 1.2, а представлена схема механізму переміщення крана з центральним приводом і малошвидкісним валом. Цей механізм включає привід, до складу якого входять електродвигун, редуктор і гальмо, розміщені в центральній частині моста, а також трансмісійний вал, що складається з окремих секцій, з'єднаних муфтами. Вал обертається в підшипникових опорах і передає момент на ходову частину, яка складається з коліс або балансирних візків із колесами.

На відміну від цієї конструкції, в системі з центральним приводом і швидкохідним валом електродвигун, розташований також у центрі моста, приводить трансмісійний вал в обертання безпосередньо, без участі редуктора (що і

визначає його як швидкохідний). Обидва кінці такого валу з'єднані з редукторами, які розташовані біля ходових коліс і передають їм обертальний момент.

**Кранові візки.** Конструкція візків у різних типах мостових кранів може суттєво відрізнятися, проте всі вони мають спільні основні компоненти. До таких елементів належать:

- **рама**, яка встановлюється на колеса, що переміщуються по рейках, прокладених уздовж головних балок моста;

- **механізм підйому вантажів**, що може бути один або два (основний та додатковий);

- **механізм пересування**, який забезпечує рух візка по довжині моста крана.

Відстань між рейками, по яких рухається візок, у горизонтальній площині визначається як колія візка. База ж візка – це дистанція між осями передньої та задньої пар коліс у вертикальній площині.

На рисунку 1.3 представлено приклад візка мостового крана, оснащеного одним механізмом підйому та одним механізмом пересування. Уся система змонтована на рамі візка. Електричний двигун через горизонтальний редуктор приводить в рух підйомний барабан, на який намотується канат подвійного поліспасти з гаком. Передача обертання від двигуна до редуктора здійснюється за допомогою зубчастої муфти та проміжного вала. Одна з частин цієї муфти виконує функцію шків гальма колодкового типу.

Механізм руху візка включає електропривод, редуктор і гальмо. Передача крутного моменту до коліс відбувається через зубчасті муфти з проміжними валами. Колеса забезпечують пересування візка вздовж рейкового шляху на мосту.

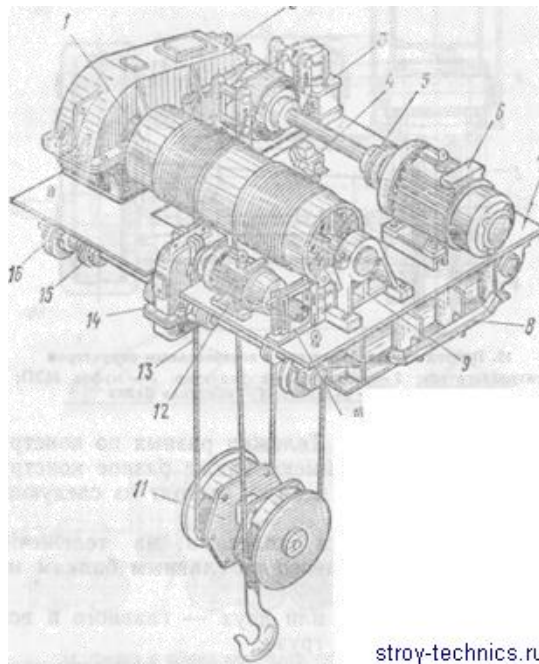
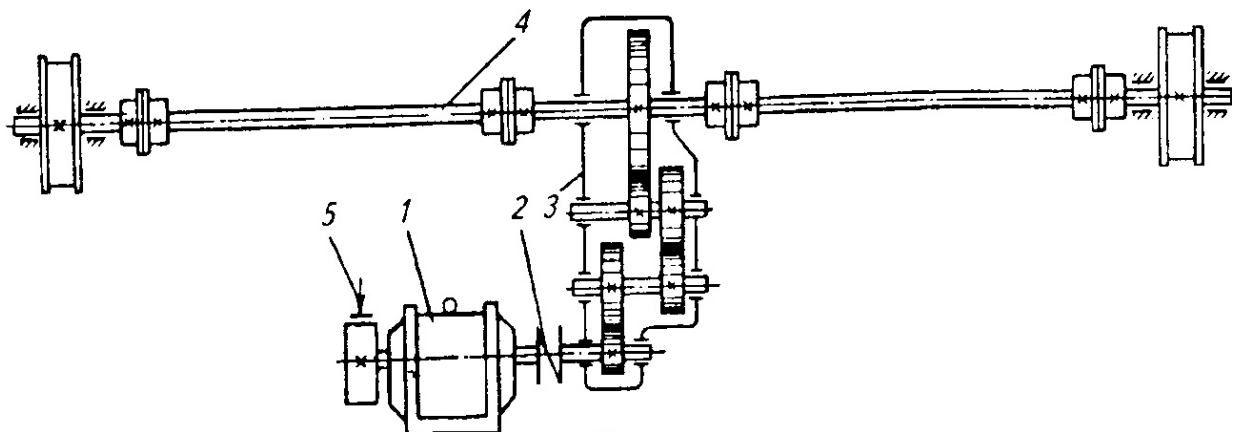


Рисунок 1.3 - Візок мостового крану з одним механізмом підйому

1 - барабан; 2, 14 - редуктори; 3, 10 - гальма; 4 - кінцевий вимикач; 5, 15-зубчасті муфти МЗП; 6, 12 - електродвигуни; 7-рама; 8 - лінійка; 9 - опора осі барабана; 11 - Крюкова підвіска, 13 - канат; 16 - ходове колесо

На рамі візка змонтовані, крім того, кінцевий вимикач механізму підйому вантажу, що відключає його при досягненні крюковою підвіскою крайніх верхнього і нижнього положень, лінійка, що впливає в крайніх положеннях візка на кінцеві вимикачі, установлені на мосту крана і обмежують шлях її пересування, а також зрівняльний блок поліспада (на рисунку не видно). На рис.1.4. приведено типову кінематичну схему механізму пересування візка мостового крана з центральним приводом.



## Рисунок 1.4 – Кінематична схема механізму пересування візка крана

1 - електродвигун; 2 - муфта; 3 - редуктор; 4 – з'єднувальний вал; 5 – гальмо;

Каркаси рам візків зазвичай виготовляють зварним способом із прокатних або гнутих металевих профілів, найчастіше П-подібної форми. Настил виконують із сталевих листів з прорізами, які дають змогу вільно проходити канатам. Основні вузли механізмів переміщення та підйому закріплюються на металевих підкладках.

**Запобіжні елементи підйомно-транспортних механізмів** є невід'ємною частиною системи безпечної експлуатації мостових кранів. До засобів захисту механізмів пересування належать: кінцеві обмежувачі для крана і візка, амортизувальні буфери, обмежувальні упори, а також пристрої, що запобігають зміщенню крана під впливом вітрових навантажень. Для механізмів підйому передбачені обмежувачі максимальної вантажопідйомності та обмежувачі крайньої висоти підйому вантажу.

Кінцеві вимикачі, які відключають електродвигуни при досягненні граничного положення моста або візка, є основою обмежувальних систем пересування. Вони працюють у поєднанні з направляючими лініями, які, наближаючись до ролика важеля, повертають його у відповідному напрямку. Це призводить до розмикання контактів і зупинки руху. Після зміни напрямку руху лінійка сходить з ролика, і важіль повертається у вихідне положення.

Для візка механізм обмеження працює аналогічно, але з тією відмінністю, що сам вимикач встановлюють на мосту, а рух здійснює лінійка, прикріплена до рами візка.

На кінцях рейкових шляхів для візків і кранів монтуються граничні упори, які визначають крайні положення та запобігають виходу за межі. На кінцевих балках і рамах візків встановлюють буфери для пом'якшення зіткнень із упорами або з іншими кранами. Залежно від типу, застосовують пружинні, гідравлічні або комбіновані амортизатори. Для захисту від попадання сторонніх

предметів під колеса попереду встановлюють захисні щитки з максимально допустимим зазором 10 мм до рейки.

**Обмежувачі вантажопідйомності** в системах підймання вантажів можуть бути різного типу, зокрема торсіонні. У таких пристроях основним елементом є гнучкий валик. Один його кінець жорстко закріплений, тоді як інший — через важіль сполучений із блоком поліспаста і під'єднаний до змінного контакту потенціометра. При підйомі вантажу на блок діє зусилля, що закручує валик, і відповідно змінює опір у схемі керування. Коли піднята маса перевищує допустиму, електродвигун вимикається, що зупиняє підйом.

**Кранові колії.** Для прокладки рейок під візки та мости кранів зазвичай використовують залізничні рейки вузькоколіїних типів Р18, Р24, Р38 і ширококоліїних — Р43, Р50, Р65. Крім того, застосовують спеціалізовані кранові рейки типів КР50, КР70, КР80, КР100 та КР120, а також сталеві прутки квадратного перерізу із заокругленими гранями. У випадку підвісних кранів як на прямні кранові колії зазвичай використовують двотаврові балки.

## 1.2 Обґрунтування і вибір системи електропривода

Електропривод вантажопідймальних кранів має низку специфічних особливостей, які вирізняють його серед електроприводів загальнопромислового та спеціального призначення:

- Механічні характеристики охоплюють усі чотири квадранти, причому бажано забезпечити безперешкодний перехід електричної машини з моторного режиму в генераторний при опусканні вантажу;
- Діапазон регулювання швидкості порівняно невеликий — зазвичай не перевищує співвідношення 10:1 у разі одно-зонного регулювання;
- Немає підвищених вимог до жорсткості механічної характеристики, як і до високої швидкодії;

- Умови експлуатації можуть бути складними: температура навколишнього середовища коливається від  $-40$  до  $+40$  °C, а в металургійних цехах — від  $-10$  до  $+50$  °C;
- Відносна вологість повітря може досягати 90 % при температурі  $+25$  °C;
- Запиленість повітря може становити до  $5$  г/м<sup>2</sup> за добу, а також можливе осадження кислотних парів у межах до  $500$  мг/м<sup>2</sup> за добу;
- Механічні впливи включають вібрацію та удари, частотою 1–50 Гц і прискоренням до  $5$  м/с<sup>2</sup>, при цьому можливі одиночні удари з прискоренням до  $30$  м/с<sup>2</sup>;
- Часто відсутнє обслуговування висококваліфікованим персоналом, тому пред'являються високі вимоги до надійності та простоти експлуатації.

За характером навантаження електроприводи кранових механізмів поділяються на дві категорії:

- з переважно активним статичним моментом (наприклад, приводи вантажопідіймальних лебідок або стрілових лебідок з невірвненою стрілою);
- з переважно реактивним статичним моментом (як у механізмах горизонтального переміщення).

Бажані механічні характеристики приводів підйому та пересування зображені на рисунку 1.5. Привод повинен працювати зі стабільною характеристикою у всьому діапазоні навантажень. Для операцій вибору слабину вантажного каната необхідна характеристика з пониженою швидкістю (типу 1П), а для точного позиціонування вантажу — характеристика типу 1С. При опусканні вантажу привід працює як у четвертому квадранті (гальмівне опускання), так і в третьому (силове опускання).

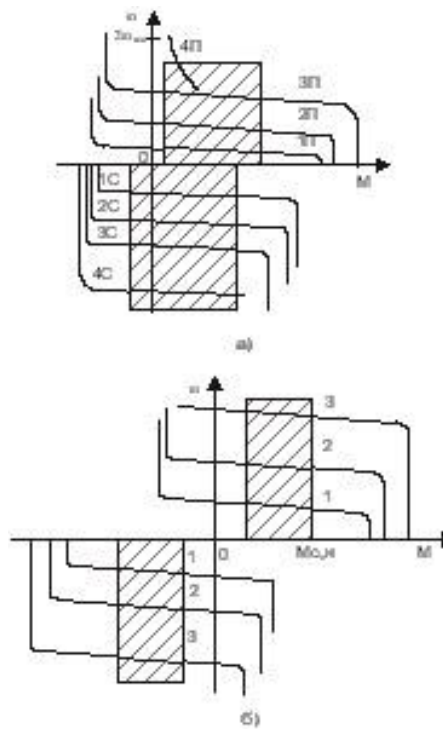


Рисунок 1.5 - Рекомендовані механічні характеристики електроприводів для підйомних механізмів (а) та механізмів горизонтального переміщення (б).

Електропривод для механізмів горизонтального переміщення повинен забезпечувати стабільні (жорсткі) характеристики у всьому діапазоні навантаження. Під час зниження швидкості з високої до нижчої система приводу має автоматично переходити з режиму тяги в режим гальмування, при цьому обмежуючи величину гальмівного моменту.

До таких механізмів належать системи пересування крана, візків, а також поворотні пристрої. Всі вони характеризуються реактивним типом навантаження, тобто незалежним від напрямку руху.

Оптимально налаштований електропривод для горизонтального переміщення повинен демонструвати стабільні механічні характеристики як у режимі тяги, так і в режимі гальмування. На відміну від підйомних механізмів, гальмування у таких системах триває нетривалий час і, як правило, виникає при переході між режимами з вищих на нижчі швидкості.

Крім того, гальмівний режим може бути задіяний у випадках руху під нахилом (наприклад, при деформаціях рейкових колій) або під дією вітрового навантаження.

Оскільки багато механізмів горизонтального руху мають значний зведений момент інерції, привід повинен забезпечувати контрольоване прискорення та гальмування, щоб уникнути різких динамічних навантажень на конструктивні елементи.

Через великий момент інерції електродвигуни для таких приводів обираються з урахуванням підвищених втрат на пуску. Водночас у сталому режимі момент на валу зазвичай не перевищує 50% номінального значення.

На відміну від підйомного обладнання, маса вантажу має менший вплив на момент електроприводу горизонтального переміщення. Найчастіше маса самої конструкції крана більша за масу вантажу. Проте для мостових кранів маса візка і вантажу часто однакова, а в баштових кранах вантаж суттєво перевищує масу візка. Це означає, що вага переміщуваного об'єкта може значно впливати на навантаження приводу.

Система керування гальмуванням у механізмах горизонтального переміщення зазвичай простіша, ніж у підйомних приводах. Завдяки реактивному характеру навантаження гальмо часто можна знімати до досягнення двигуном статичного моменту. Головна умова — накласти гальмо, коли швидкість руху майже дорівнює нулю, щоб зменшити ударні навантаження та знизити зношення гальмівних елементів.

У ролі приводного двигуна зазвичай застосовують асинхронні електродвигуни. Використання частотного регулювання дозволяє підвищити точність керування приводом і покращити енергетичну ефективність механізму.

Крановий електропривод на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, що живиться від частотного перетворювача (ПЧ),

характеризується високими енергетичними та експлуатаційними показниками завдяки таким перевагам:

- покращені динамічні властивості, що забезпечуються плавним запуском і зупинкою механізмів;
- широкий діапазон регулювання та висока точність підтримання швидкості за рахунок адаптації ПЧ до параметрів двигуна та застосування ефективних алгоритмів векторного керування, що дозволяє реалізовувати як розімкнені, так і замкнені системи регулювання;
- зниження динамічних навантажень, що призводить до збільшення ресурсу елементів металоконструкцій і механізмів крана та зменшення витрат на обслуговування;
- суттєве зниження енергоспоживання завдяки відсутності струмових кидків під час пуску, усуненню необхідності у пускових резисторах, зменшенню споживаної реактивної потужності з мережі, а також можливості рекуперації енергії в мережу;
- підвищена надійність приводу, обумовлена відмовою від рележно-контакторної апаратури;
- зростання продуктивності крана завдяки оптимізації циклограми роботи.

### **1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна механізму пересування візка**

#### **1.3.1. Вихідні дані**

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Вантажопідйомність на крюкі, кг | $Q_1 = 32000$ |
| Вага візка з траверсою, кг      | $J_t = 31200$ |
| Швидкість пересування, м/с      | $V = 1$       |

|                                                                |                 |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|
| ККД механізму                                                  | $\eta = 0,85$   |
| Діаметр цапфи колеса, м                                        | $d = 0,1$       |
| Діаметр колеса, м                                              | $D_k = 0,5$     |
| Коефіцієнт тертя у підшипнику                                  | $f = 0,015$     |
| Коефіцієнт тертя реборди колеса                                | $k_p = 1,5$     |
| Передавальне число механізму                                   | $i = 18$        |
| Коефіцієнт тертя кочення колеса                                | $\mu = 0,0006$  |
| Маховий момент ротора двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$    | $J_d = 1,84$    |
| Маховий момент гальмівного шківa, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ | $J_{sh} = 1,58$ |
| Маховий момент муфти, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$             | $J_{mf} = 0,76$ |
| Швидкість обертання ротора двигуна, об/хв                      | $N_{dv} = 700$  |
| Час розгону, с                                                 | $t = 3$         |

### 1.3.2. Розрахунок моменту навантаження на валу та потужності двигуна.

Статичний момент опору на валу двигуна обчислюємо за формулою

$$M_{\text{ст}} = \frac{k_p \cdot (J + Q_1) \cdot (f \cdot d + 2 \cdot \mu) \cdot g}{2 \cdot \eta \cdot i} = 82 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Динамічний момент на валу двигуна дорівнює

$$M_d = \frac{\delta(J_d + J_{sh} + J_{mf}) \cdot N_{dv} \cdot g}{375t} + \frac{0.975(J + Q_1) \cdot V^2 \cdot g}{N_{dv} \cdot t \cdot \eta} = 367 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальний момент на валу двигуна при запуску механізму дорівнюватиме

$$M_{\text{max}} = \frac{M_{\text{ст}} + M_d}{f_t \cdot f_h \cdot f_u \cdot f_\omega} = 554 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

У механізмі переміщення візка використовується один електродвигун. Його підбір здійснюється за номінальним моментом відповідно до двох основних критеріїв.

Перший із них передбачає, що номінальний момент двигуна має перевищувати статичний розрахунковий момент, приведений до його вала.

$$M_{\text{ном}} = k_{\text{зап}} \cdot M_{\text{ст}} = 1,15 \cdot 82 = 94 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Другий критерій – перевантажувальна здібність двигуна повинна забезпечувати максимальний розрахунковий момент :

$$M_{\text{ном}} = \frac{M_{\text{max}}}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{554}{1.7} = 325 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

При частоті обертання електродвигуна  $n = 750$  об/хв отримуємо необхідну потужність електродвигуна

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} = 24 \text{ кВт}$$

### 1.3.3. Вибір приводного електродвигуна.

У якості приводного двигуна механізму пересування візка обираємо короткозамкнений асинхронний двигун типу K21F 225 M8 (VEM), технічні характеристики якого наведено у табл.1.

Таблиця 1 - Характеристики електродвигуна K21F 225 M8 (VEM)

| № | Характеристика                      | Значення |
|---|-------------------------------------|----------|
| 1 | Номінальна потужність, кВт          | 25       |
| 2 | Номінальна частота обертання, об/хв | 735      |
| 3 | ККД, %                              | 90       |
| 4 | Номінальний коефіцієнт потужності   | 0,77     |
| 5 | Номінальний струм, А                | 48,5     |
| 6 | Номінальний момент, Н · м           | 338      |
| 7 | Кратність максимального моменту     | 2,6      |
| 8 | Вага, кг                            | 260      |

### 1.3.4. Розрахунок та вибір перетворювача частоти.

Використаємо рівняння балансу механічної та електричної енергії:

$$M \cdot n \cdot \frac{\pi}{30} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{max}} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta$$

Виходячи з цього, обчислюємо максимальний споживаний струм двигуна

$$I_{\text{max}} = 102 \text{ А}$$

Оскільки для перетворювача частоти максимальний струм не повинен перевищувати номінальний більше, ніж у 1,5 рази, то номінальний струм перетворювача повинен бути не менше, ніж

$$I_{\text{ном ПЧ}} = I_{\text{max}}/1,5 = 68 \text{ A}$$

За значенням номінального струму обираємо остаточно перетворювач частоти типу SV185 iS5-4NE виробництва компанії LS Industrial Systems, що має потужність 30 кВт. Номінальний струм перетворювача частоти складає 66 А.

### 1.3.5. Перевірка запасу зчеплення коліс

Коефіцієнт запасу зчеплення коліс з рейками повинен задовольняти умові:

$$K_{\varphi} = \frac{J_{pr} \cdot \varphi}{W_{\text{пер}}^{\text{без вантажу}} + J_{kr} \cdot \left( \frac{a}{g} - \frac{n_{pr}}{n} \cdot \mu \cdot \frac{d}{D_k} \right)} \geq 1.1$$

де  $a$  – прискорення візка,  $a = V/t = 1/3 = 0,33 \text{ м/с}^2$ ;

$J_{pr}$  - сумарний тиск на приводні колеса,

$$J_{pr} = (J_t) \cdot (n_{pr}/n) = (31200) \cdot (2/4) = 15600 \text{ кг};$$

$J_{kr}$  - сумарний тиск на колеса,

$$J_{pr} = (J_t) = (31200) = 31200 \text{ кг};$$

$n_{pr}$  - число приводних коліс,  $n_{pr} = 2$ ;  $n$  - загальне число коліс,  $n = 4$ ;

$\varphi$  - коефіцієнт зчеплення з рейкою (на повітрі 0,12; в приміщенні 0,15; із піском 0,2);

$W_{\text{пер}}^{\text{без груза}}$  - опір кочення коліс візка без вантажу, яке знаходиться за формулою:

$$W_{\text{пер}}^{\text{без вантажу}} = k_p \cdot (J_t) \cdot \frac{\mu \cdot d}{D_k} = 8,5 \text{ кГ}$$

Запас зчеплення дорівнює

$$K_{\varphi} = \frac{J_{pr} \cdot \varphi}{W_{\text{пер}}^{\text{без вантажу}} + J_{kr} \cdot \left( \frac{a}{g} - \frac{n_{pr}}{n} \cdot \mu \cdot \frac{d}{D_k} \right)} = 2.2 > 1.1$$

Вимога виконується.

## **Розділ 2 РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЦЕХОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ПАТ «ДТЕК ДНПРООБЛЕНЕРГО»**

### **2.1 Розрахунок електричних навантажень**

Розрахунок електричних навантажень виконуватиметься за методом впорядкованих діаграм, який є базовим при розробці технічної та робочої документації з електропостачання. Відповідно до цього методу, розрахункове максимальне навантаження для групи електроприймачів визначається як:

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

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:

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

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

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 струмоприймачів           | Кількість | Номінальна потужність, кВт | Коефіцієнт використання | Коефіцієнт потужності | Коефіцієнт реактивної потужності | Розрахункова потужність |                 |
|---------------------------------|-----------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------|
|                                 |           |                            |                         |                       |                                  | Активна, кВт            | Реактивна, кВар |
| 1                               | 2         | 3                          | 4                       | 5                     | 6                                | 7                       | 8               |
| Мостові 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 рольганг             | 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 рольганги          | 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          |
| Обривні важільні 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           |
| Одноланцюжний транспортер       | 4         | 11                         | 0,26                    | 0,58                  | 1,41                             | 11,44                   | 16,068          |
| Муфельний транспортер           | 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 конвеєр                 | 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            |
| Електромостовий кран            | 2         | 39                         | 0,45                    | 0,6                   | 1,33                             | 35,1                    | 46,8            |
| Електромостовий 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 проміжна група клітей     | 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                    | —               |
| Освітлення побутових приміщень  | 70        | 100                        | 0,85                    | 0,9                   | —                                | 5,95                    | —               |
| Освітлення кабінетів            | 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 (4.2). 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 струмоприймачів     | Коефіцієнт використання | Коефіцієнт максимуму | Розрахункова потужність |                 | Максимальна потужність |                 |            |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------|
|                           |                         |                      | Активна, кВт            | Реактивна, кВар | Активна, кВт           | Реактивна, кВар | Повна, кВА |
| 1                         | 2                       | 3                    | 4                       | 5               | 6                      | 7               | 8          |
| Мостові 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     |
| Підводячий рольганг       | 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 рольганги    | 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 важільні 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      |
| Одноланцюжний транспортер | 0,26                    | 2,38                 | 11,44                   | 16,068          | 27,227                 | 38,241          | 46,943     |
| 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     |
| 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     |
| 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 | 1,02<br>5 | 5,95   | –      | 6,099  | –      | 6,099  |
| Освітлення кабінетів            | 0,85 | 1,02<br>5 | 5,1    | –      | 5,228  | –      | 5,228  |

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

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

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<br>потужність,<br>кВА | Поеднання на-<br>пруг, кВ |      |    | Втрати,<br>кВт  |                 | U <sub>кз</sub> , % |           |           | I <sub>хх</sub> ,<br>% |
|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|------|----|-----------------|-----------------|---------------------|-----------|-----------|------------------------|
|                          |                                  | ВН                        | СН   | НН | P <sub>хх</sub> | P <sub>кз</sub> | ВН-<br>СН           | ВН-<br>НН | СН-<br>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

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

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

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

$$S'_{сер.макс.} = 812500 B \cdot A$$

Технічні дані вибраного трансформатору наведемо у таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Технічні дані цехового трансформатору

| Марка         | Номінальна<br>потужність,<br>кВА | Поеднання напруг,<br>кВ |     | Втрати, кВт     |                 | U <sub>кз</sub> , % | I <sub>хх</sub> , % |
|---------------|----------------------------------|-------------------------|-----|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|               |                                  | ВН                      | НН  | P <sub>хх</sub> | P <sub>кз</sub> |                     |                     |
| 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

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

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

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

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 крана за найбільш завантажену зміну

$$S_{сер.макс.м} = 130000 B \cdot A$$

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

$K_t$  – 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 ( $K_n = 0,85$ )

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

### 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  $j_{эк.}$  – економічна щільність струму (для кабелів с паперовою ізоляцією і алюмінієвими жилами  $j_{эк.} = 1,4$ )

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

### 2.3.3 Вибір ЛЕП по допустимому навантаженню

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

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

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

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

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

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

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

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

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

де  $U_n$  – напруга живлення шини на 10кВ ( $U_n = 10000 B$ )

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

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

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

#### 2.3.4 Вибір ЛЕС по економічній щільності струму

Вибір ЛЕС по економічній щільності струму виконується виходячи із співвідношення:

$$F_l \geq F_{розр.} \quad (2.22)$$

де  $F_l$  – перетин ЛЕС

$F_{розр.}$  – розрахунковий перетин ЛЕС

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

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  $185 \text{ мм}^2$ ,  $I_{тр.доп.л} = 270 \text{ А}$

## 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.

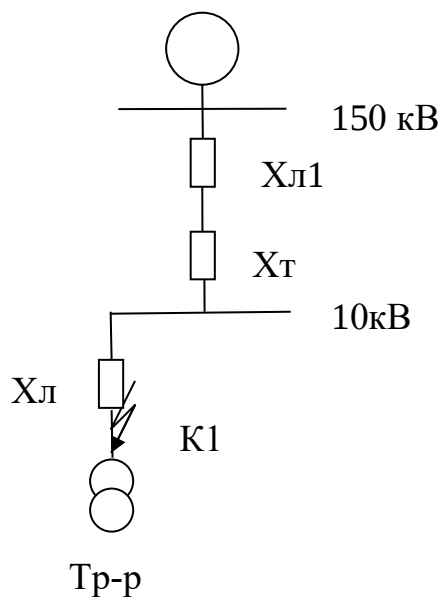


Рисунок 2.1 – Схема заміщення для точки К1

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

Приймаємо за базисну потужність  $S_{б} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ , базисні напруги  $U_{б1} = 154 \text{ кВ}$ ,  $U_{б2} = 10 \text{ кВ}$ .

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

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

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

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

Визначаємо індуктивний опір високовольтного трансформатору

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

де  $U_{\kappa}$  – номінальна напруга короткого замикання високовольтного трансформатору

$S_{\text{тр.н}}$  – номінальна потужність високовольтного трансформатору

Визначаємо індуктивний опір кабельної лінії 10кВ

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

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

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

Визначаємо сумарний індуктивний опір у точці К1 на стороні 10кВ

$$X_{\Sigma \text{к1}} = X_{\text{тр.}} + X_{\text{л1}} + X_{\text{л2}} = 0,213 + 0,72 + 0,077 = 1,01 \quad (2.28)$$

Визначаємо струм короткого замикання

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

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

$$S_{к.з.} = \frac{S_{\phi}}{x_{\Sigma к1}} = \frac{100}{1,01} = 99,06 \text{ МВ} \cdot \text{А} \quad (2.31)$$

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

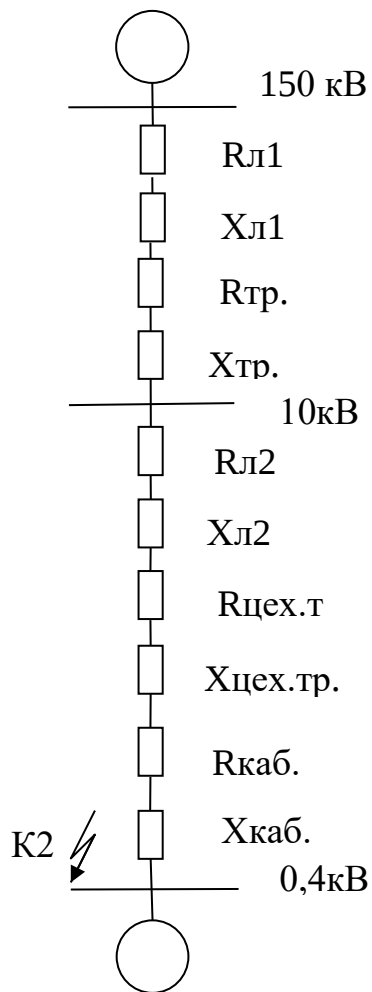


Рисунок 2.2 – Схема заміщення для точки К2

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 ( $R_{0л1} = 0,12 \text{ Ом} / \text{км}$ )

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 ( $R_{0л2} = 0,12 \text{ Ом} / \text{км}$ )

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 (  $X_{0каб.} = 0,06 \text{ Ом} / \text{км}$  )

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

Визначаємо активний опір кабелю 0,4кВ

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

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

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

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

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

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

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

### 2.5.1 Вибір плавкого запобіжника

Вибір плавких запобіжників виконується по напрузі і струму:

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

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

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

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

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

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

(формула (2.15))

Зазвичай:

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

де  $k$  – коефіцієнт запасу ( $k = 1,25$ )

Визначаємо мінімальний струм відключення

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

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                                        |

### 2.5.2 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,  $I_{нік} = 350 \text{ А}$ )

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                      |

## 2.6 Вибір силового трансформатору

### 2.6.1 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 ІІІ 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

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

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<br>потужність,<br>кВА | Поеднання напруг,<br>кВ |      |    | Втрати,<br>кВт  |                 | U <sub>кз</sub> , % |           |           | I <sub>хх</sub> ,<br>% |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------|----|-----------------|-----------------|---------------------|-----------|-----------|------------------------|
|                                  |                                  | ВН                      | СН   | НН | P <sub>хх</sub> | P <sub>кз</sub> | ВН-<br>СН           | ВН-<br>НН | СН-<br>НН |                        |
| ТДТН-<br>25000/150-<br>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

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

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

Умова виконується.

## 2.6.2 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

$$S_{сер.макс.}' = 812500 B \cdot A$$

Технічні дані вибраного трансформатору наведемо у таблиці 2.4

Таблиця 2.4 – Технічні дані цехового трансформатору

| Марка                | Номінальна<br>потужність,<br>кВА | Поеднання напруг,<br>кВ |     | Втрати, кВт |          | $U_{кз}, \%$ | $I_{хх}, \%$ |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------|-----|-------------|----------|--------------|--------------|
|                      |                                  | ВН                      | НН  | $P_{хх}$    | $P_{кз}$ |              |              |
| ТМ-<br>1000/10<br>У1 | 1000                             | 10                      | 0,4 | 2,45        | 12,2     | 5,5          | 1,4          |

## 2.7 Розрахунок лінії електропередач

### 2.7.1 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 пе-

ретину, відповідно до таблиці з вибраним дротом

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

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

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

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

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

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

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

$$S_{сер.макс.м} = 130000 B \cdot A$$

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

$K_t$  – 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  $K_{тв} = 1$ )

### 2.7.2 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  $j_{эк.}$  – економічна щільність струму (для кабелів с паперовою ізоляцією і алюмінієвими жилами  $j_{эк.} = 1,4$ )

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

### 2.7.3 Вибір ЛЕП по допустимому навантаженню

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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  $K_{те} = 1$ )

#### 2.7.4 Вибір ЛЕП по економічній щільності струму

Вибір ЛЕП по економічній щільності струму виконується виходячи із співвідношення:

$$F_{л} \geq F_{розр.} \quad (2.22)$$

де  $F_{л}$  – 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  $185 \text{ мм}^2$ ,  $I_{тр.доп.л} = 270 \text{ А}$

### 2.7 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання будемо проводити у базисних величинах

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

Складаємо схему заміщення ділянки ланцюга електропостачання.

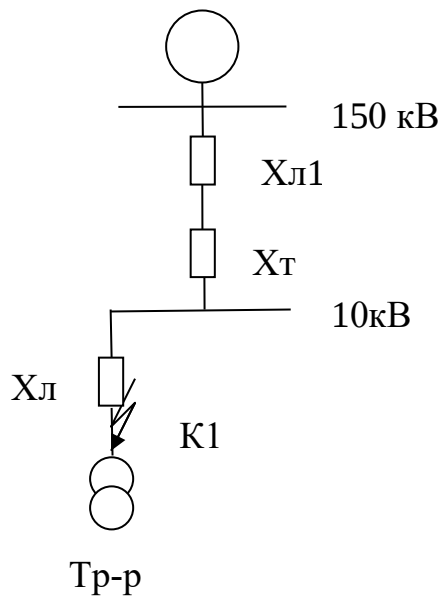


Рисунок 2.1 – Схема заміщення для точки К1

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 високовольтного трансформатору

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

Визначаємо індуктивний опір кабельної лінії 10кВ

$$X_{л2} = \frac{X_{ол2} \cdot l_{л2} \cdot S_{\sigma}}{U_{\sigma 2}^2} = \frac{0,077 \cdot 1 \cdot 100}{10^2} = 0,077 \quad (2.27)$$

де  $X_{ол2}$  – індуктивний питомий опір кабельної лінії 10кВ ( $X_{ол2} = 0,077 \text{ Ом/км}$ )

$l_{л2}$  – 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

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

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

Складаємо схему заміщення

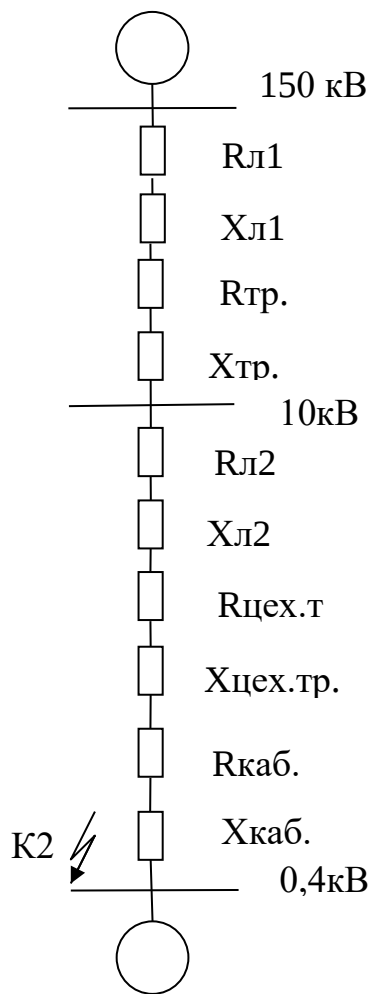


Рисунок 2.2 – Схема заміщення для точки К2

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 ( $R_{0л1} = 0,12 \text{ Ом} / \text{км}$ )

Індуктивний опір високовольного трансформатору

$$X_{тр.} = 0,72$$

Визначаємо активний опір високовольного 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 ( $R_{0л2} = 0,12 \text{ Ом} / \text{км}$ )

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.8 Вибір захисних апаратів

### 2.8.1 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                                        |

### 2.8.2 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

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

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

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 МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ ВІЗКА

#### 3.1 Схема заміщення приводного двигуна і розрахунок її параметрів

Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна має такий вигляд:



Рисунок 3.1 – Т-подібна схема замінщення 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;

$X_0$  – індуктивний опір контуру намагнічування АД;

Знаходимо параметри схеми замінщення. Для спрощення розрахунків допустимо вважати активним опором контуру намагнічування.

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{ном}} = n_{\text{ном}} \cdot \frac{\pi}{30} = 77,18 \text{ 1/c}$$

Кутова швидкість колекторного коду:

$$\omega_0 = n_0 \cdot \frac{\pi}{30} = 78,75 \text{ 1/c}$$

Номінальний ковзання:

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

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 1000 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = 324 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначимо номінальний струм статора за формулою:

$$I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = 54,81 \text{ А}$$

де  $P_n$  – номінальна потужність двигуна;

$U_{1n}$  – номінальна фазна напруга;

$\eta_n$  – номінальний к.к.д.;

$\cos\varphi_N$  – номінальний коефіцієнт потужності;

Визначимо струм статора при 75% навантаженні:

$$I_{12} = \frac{P_N \cdot P_N}{3 \cdot U_{1N} \cdot \eta_{P_N} \cdot \cos\varphi_{P_N}} = 41.95 \text{ A}$$

де  $P_N = P/P_N$  – коефіцієнт навантаження двигуна;

$\eta_{P_N}$  – ККД при частковому навантаженні;

$\cos\varphi_{P_N}$  – коефіцієнт потужності при частковому навантаженні;

Сучасні асинхронні двигуни проєктуються таким чином, що найбільший ККД досягається при навантаженні на 10-15% менше номінального. Двигуни розраховуються так, тому що більшість з них в силу стандартної дискретної шкали потужностей працюють з деяким недо навантаженням. Тому ККД при номінальному навантаженні і навантаженні  $P_N = 0.75$  практично рівні між собою, тобто:

$$\eta_N = \eta_{0.75}$$

Коефіцієнт потужності при тому ж навантаженні  $P_N = 0.75$  сильно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, причому ця відмінність в значній мірі залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підкоряються залежності, приведеній на рисунку 3.2.

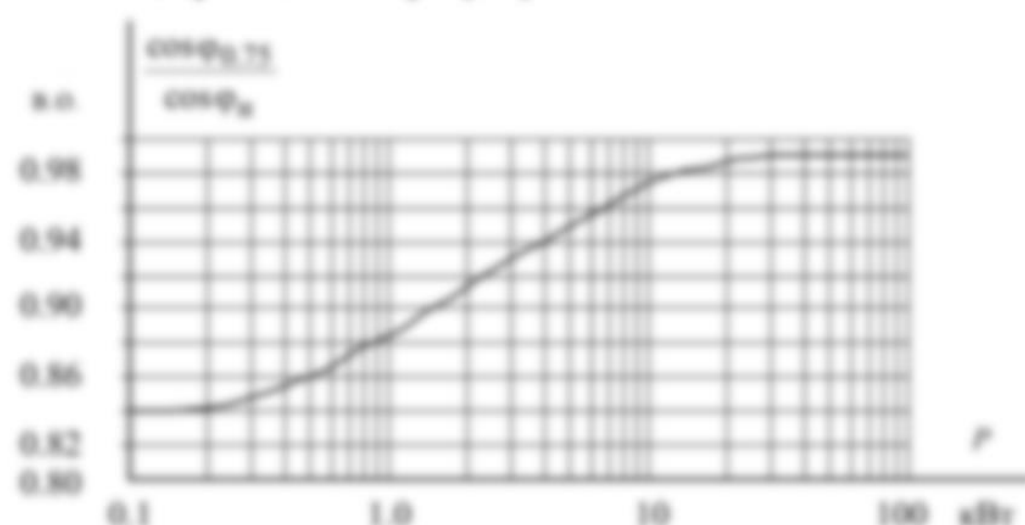


Рисунок 3.2 - Залежність  $\cos\varphi_{0,75}/\cos\varphi_n$  від потужності асинхронного двигуна

З вище приведеної залежності маємо, що для двигуна пересування візка:

$$\cos\varphi_{0,75} \approx \cos\varphi_n;$$

Визначимо струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - [p_n \cdot I_{1n} \cdot (1 - s_n)/(1 - p_n \cdot s_n)]^2}{1 - [p_n \cdot (1 - s_n)/(1 - p_n \cdot s_n)]^2}} = 12.62 \text{ A}$$

де  $I_{1n}$  – номінальний струм статора;

$I_{1p}$  – струм статора при 75% навантаженні;

$s_n$  – номінальне ковзання;

Визначимо критичне ковзання:

$$S_k = S_n \frac{(\lambda_n + \sqrt{\lambda_n^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_m - 1)]})}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_m - 1)} = 0.1$$

де  $k_m$  – перевантажувальна здатність двигуна;

$\beta$  – коефіцієнт, значення якого лежить у межах 0.6-2.5 (для асинхронних двигунів серії 4A  $\beta = 1.3$ );

Визначимо коефіцієнт  $C_1$ :

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_1 \cdot I_{1n}} = 1.0209$$

де  $k_1$  – кратність пускового струму;

Визначимо коефіцієнт  $A_1$ :

$$A_1 = \frac{3 \cdot U_{1n}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_m \cdot P_n} = 1.088$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора  $R_2'$ :

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_n) \cdot C_1} = 0.0943 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 0.1252 \text{ Ом}$$

Рисунок 3.2 - Залежність  $\cos\varphi_{0,75}/\cos\varphi_n$  від потужності асинхронного двигуна

З вище приведеної залежності маємо, що для двигуна пересування візка:

$$\cos\varphi_{0,75} \approx \cos\varphi_n;$$

Визначимо струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - [p_n \cdot I_{1n} \cdot (1 - s_n)/(1 - p_n \cdot s_n)]^2}{1 - [p_n \cdot (1 - s_n)/(1 - p_n \cdot s_n)]^2}} = 12.62 \text{ A}$$

де  $I_{1n}$  – номінальний струм статора;

$I_{1p}$  – струм статора при 75% навантаженні;

$s_n$  – номінальне ковзання;

Визначимо критичне ковзання:

$$S_k = S_n \frac{(\lambda_n + \sqrt{\lambda_n^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_m - 1)]})}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (k_m - 1)} = 0.1$$

де  $k_m$  – перевантажувальна здатність двигуна;

$\beta$  – коефіцієнт, значення якого лежить у межах 0.6-2.5 (для асинхронних двигунів серії 4A  $\beta = 1.3$ );

Визначимо коефіцієнт  $C_1$ :

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_1 \cdot I_{1n}} = 1.0209$$

де  $k_1$  – кратність пускового струму;

Визначимо коефіцієнт  $A_1$ :

$$A_1 = \frac{3 \cdot U_{1n}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_m \cdot P_n} = 1.088$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора  $R_2'$ :

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_n) \cdot C_1} = 0.0943 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 0.1252 \text{ Ом}$$

Комплексний опір ланцюгу намагнічування

$$Z_p = j \cdot x_p$$

Комплексний опір роторного кола схеми заміщення

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

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 затискач роторного кола

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

Струм ротора АД

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

Електромагнітний момент АД

$$M_m(s) = 3 \cdot (|I_2(s)|)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

$$P_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \text{Re} \left( U_1 \cdot I_1^*(s) \right); Q_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \text{Im} \left( U_1 \cdot I_1^*(s) \right)$$

Коефіцієнт корисної дії АД:

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

Коефіцієнт потужності АД:

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

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою програми MATLAB. Результати розрахунків статичних і енергетичних характеристик електродвигуна приведені нижче на рис.3.3.

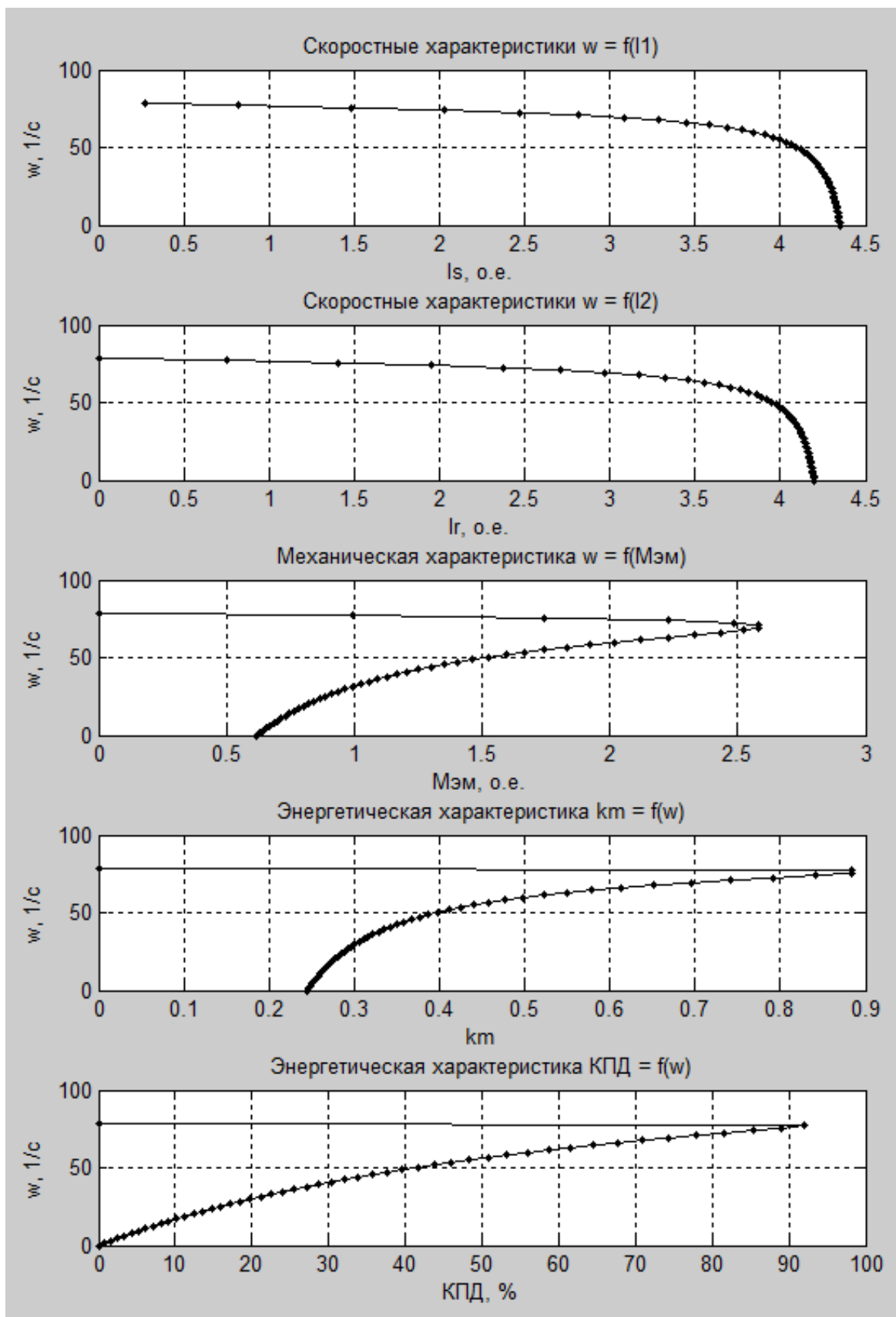


Рисунок 3.3 – Натуральні статичні та енергетичні характеристики приводного асинхронного електродвигуна.

### 3.3 Розрахунок статичних характеристик частотно-керованого електроприводу у розімкненій системі керування

Параметри схеми заміщення частотно-керованого асинхронного електроприводу відрізнятимуться від природних характеристик за рахунок впливу опорів згладжуючого дроселя та динамічних опорів силових напівпровідникових ключів. Повний активний опір фази статора обчислюємо за формулою:

$$R_{1\Sigma} = R_1 + R_{\text{др}} = 0.16 \text{ Ом}$$

При частотному керуванні слід враховувати, що індуктивні опори асинхронного двигуна також будуть змінюватися. Індуктивні опори асинхронного двигуна при частоті живлячої мережі  $f$  Гц можна обчислити по відомим значенням опорів при частоті живлячої мережі 50 Гц за формулою:

$$X_f = X_{50} \cdot \frac{f}{50}$$

Також при розрахунках характеристик електропривода у розімкненій системі керування необхідно враховувати взаємопов'язане керування напруги та частоти за законом Костенко. Згідно з формулою 2.6 при заданій частоті живлячої мережі  $f$  Гц діюче значення фазної напруги складатиме

$$U = 4.5 \cdot f \text{ В}$$

Для розрахунку необхідних характеристик асинхронного електродвигуна скористаємося символьним методом комплексним методом розрахунку кіл 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 роторного кола схеми заміщення

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

Комплексний опір ланцюгу статора

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

Повний комплексний опір схеми заміщення

$$Z_0(s) = Z_1(s) + Z_2(s)$$

Струм статора АД

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

Напруга на затисках роторного кола

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

Струм ротора АД

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

Електромагнітний момент АД

$$M_{\text{эм}}(s) = 3 \cdot (|I_2(s)|)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

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

Коефіцієнт корисної дії АД:

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

Коефіцієнт потужності АД:

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

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою програми MATLAB. Результати розрахунків статичних і енергетичних характеристик електродвигуна приведені нижче на рис.3.4 – 3.7.

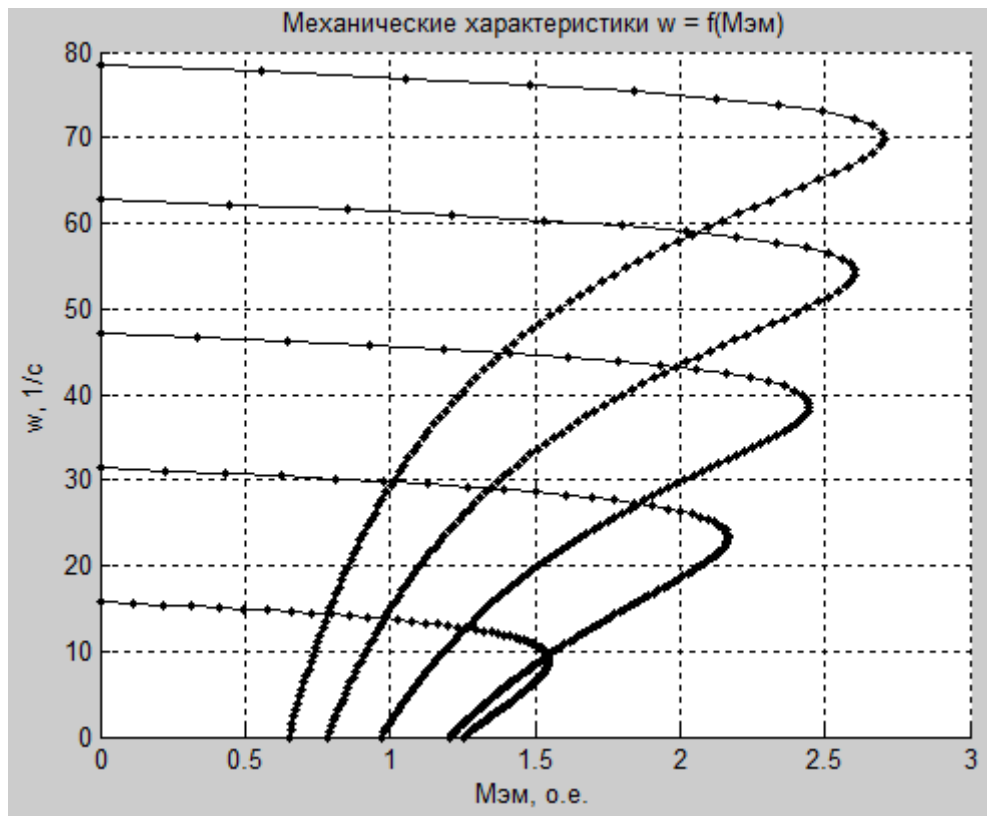


Рисунок 3.4 - Механічні характеристики АД при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

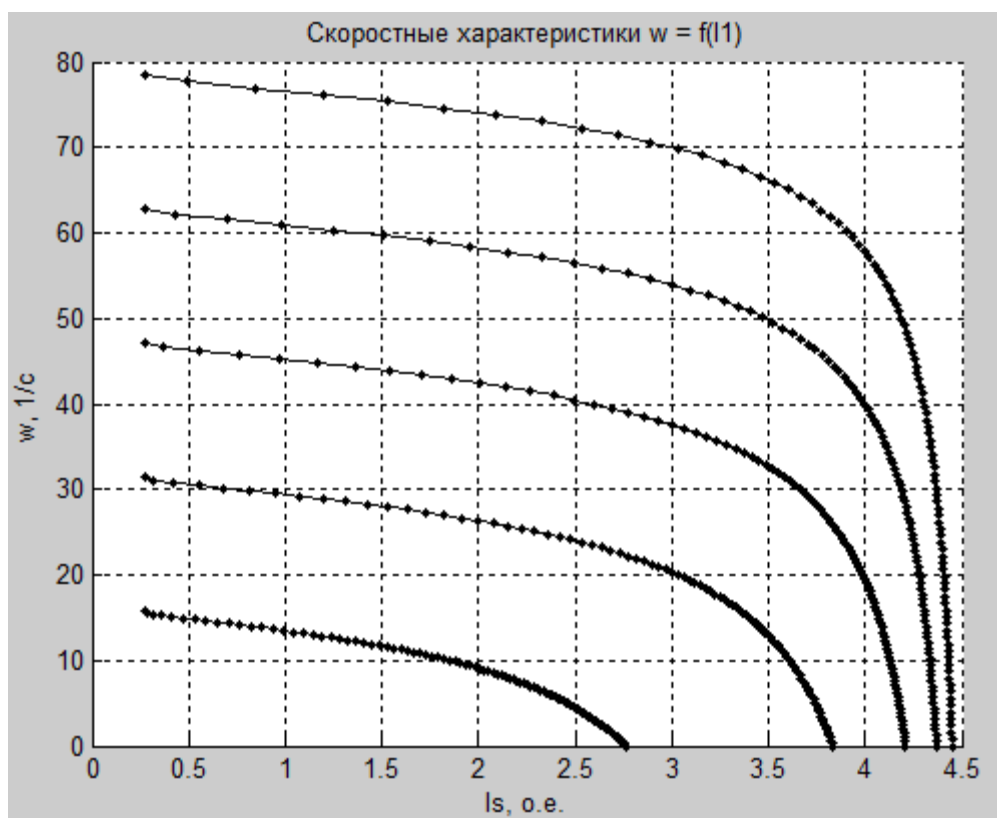


Рисунок 3.5 - Швидкісні характеристики АД по струму статора при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

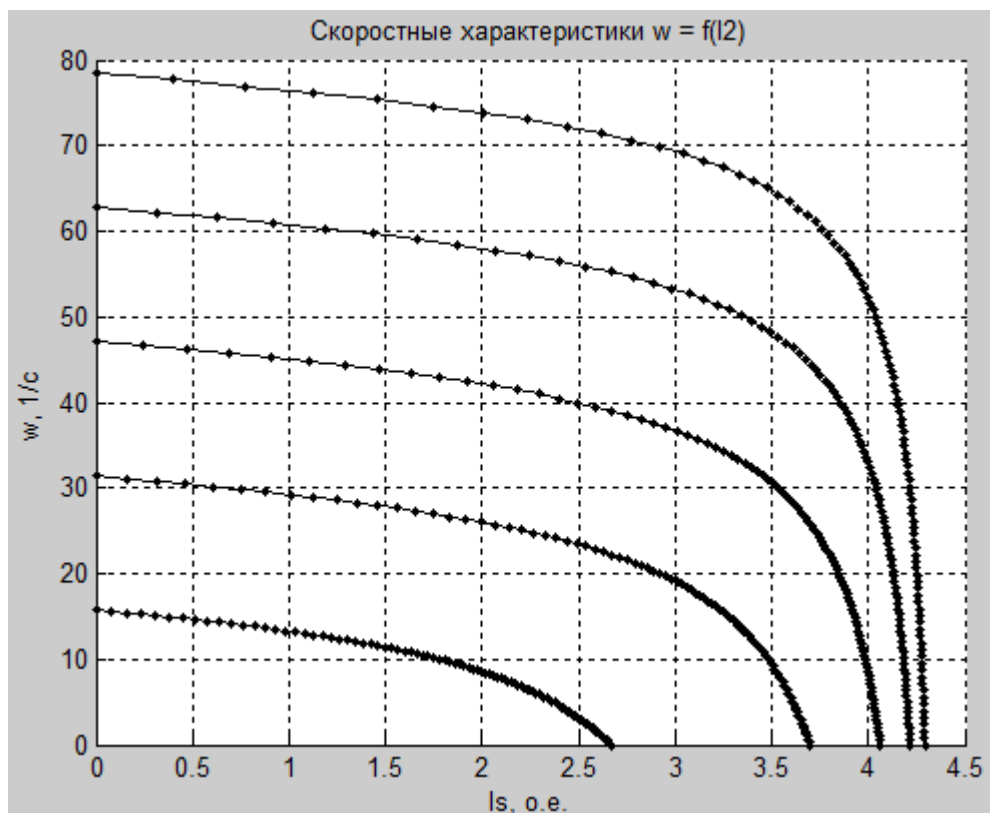


Рисунок 3.6-Швидкісні характеристики АД по ротору при частотному регулюванні. Частота живлячої на-  
пруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

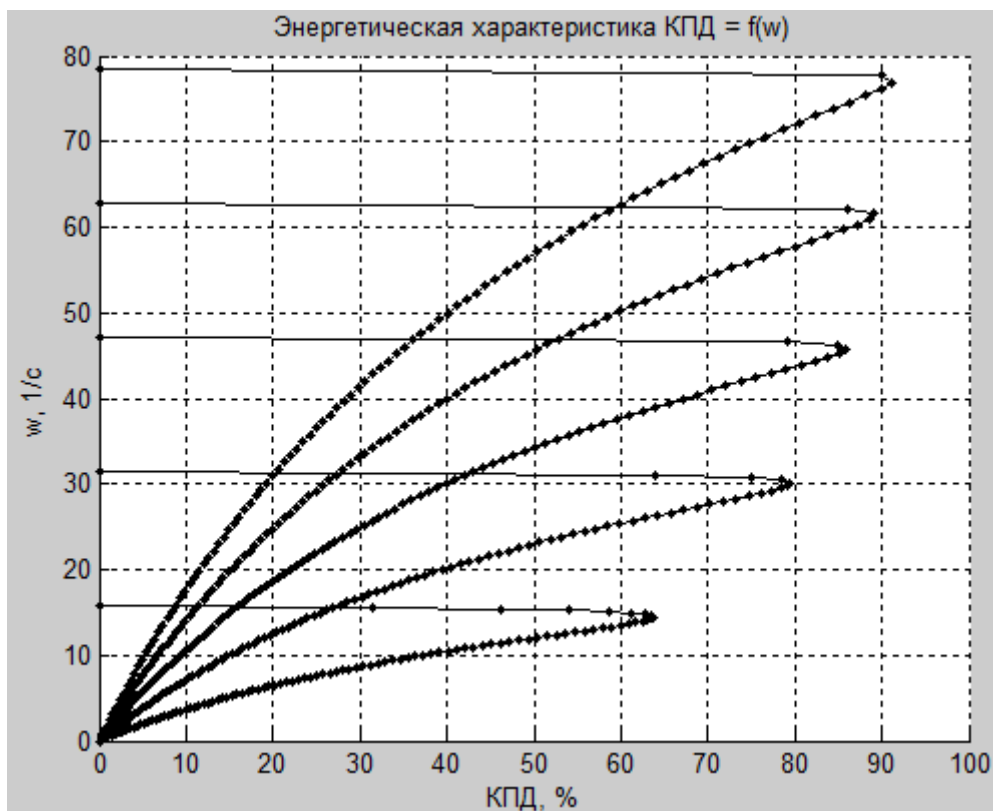


Рисунок 3.7 - Залежність ККД АД при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20,  
10 Гц

## Висновки до третього розділу

У третьому розділі проведено розрахунок природних характеристик двигуна приводу, а також електромеханічних і енергетичних параметрів електроприводу в умовах розімкненої системи керування. Отримані характеристики електроприводу демонструють нижчу жорсткість у порівнянні з природними характеристиками самого двигуна. При зменшенні частоти живильної напруги жорсткість механічної характеристики залишається прийнятною, однак ефективність роботи електроприводу знижується через значне падіння коефіцієнта корисної дії.

## Розділ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ ВІЗКА МОСТОВОГО КРАНА

### 4.1 Моделювання асинхронного двигуна в ортогональній системі координат « $\alpha$ , $\beta$ , 0»

Система координат « $\alpha$ ,  $\beta$ , 0» є нерухомою відносно статора асинхронного двигуна, тому її кутова швидкість дорівнює  $\omega_k = 0$ . Ця система координат широко застосовується при моделюванні АД у симетричних режимах роботи. Напрям осі  $\alpha$  збігається з віссю фази “А”, що забезпечує збіг проєкцій змінних на цій осі з дійсними фазними величинами.

Математичний опис асинхронного двигуна в ортогональній системі координат може бути подано як через струми, так і через потокозчеплення. Найчастіше система диференціальних рівнянь для АД у системі « $\alpha$ ,  $\beta$ , 0» формулюється саме через потокозчеплення. У цьому випадку вона має такий вигляд:

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

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;  $L_\mu$  - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

Струми окремих обмоток можуть бути обчислені за значеннями потокозчеплень за такими виразами:

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

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

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

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

Перетворені напруги

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

## 4.2 Аналіз віртуальної моделі асинхронного двигуна у середовищі

### MATLAB/Simulink

Математичні рівняння асинхронного двигуна в ортогональній системі координат « $\alpha$ ,  $\beta$ , 0» застосовуються для побудови його віртуальної моделі за допомогою бібліотеки SimPower у середовищі Simulink.

Схема віртуальної моделі АД, реалізованої з використанням елементів бібліотеки SimPower, представлена на рисунку 4.1, а.

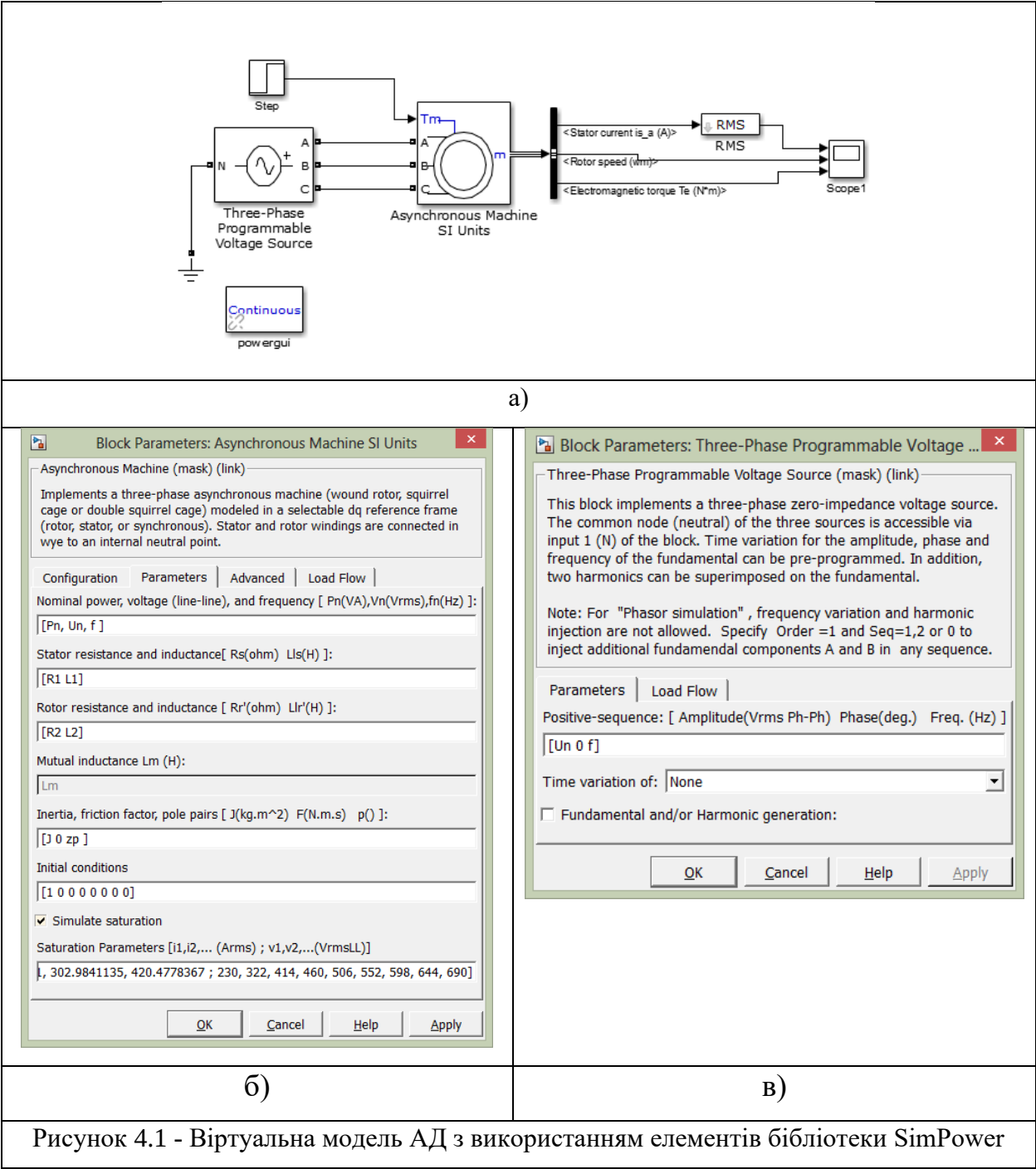
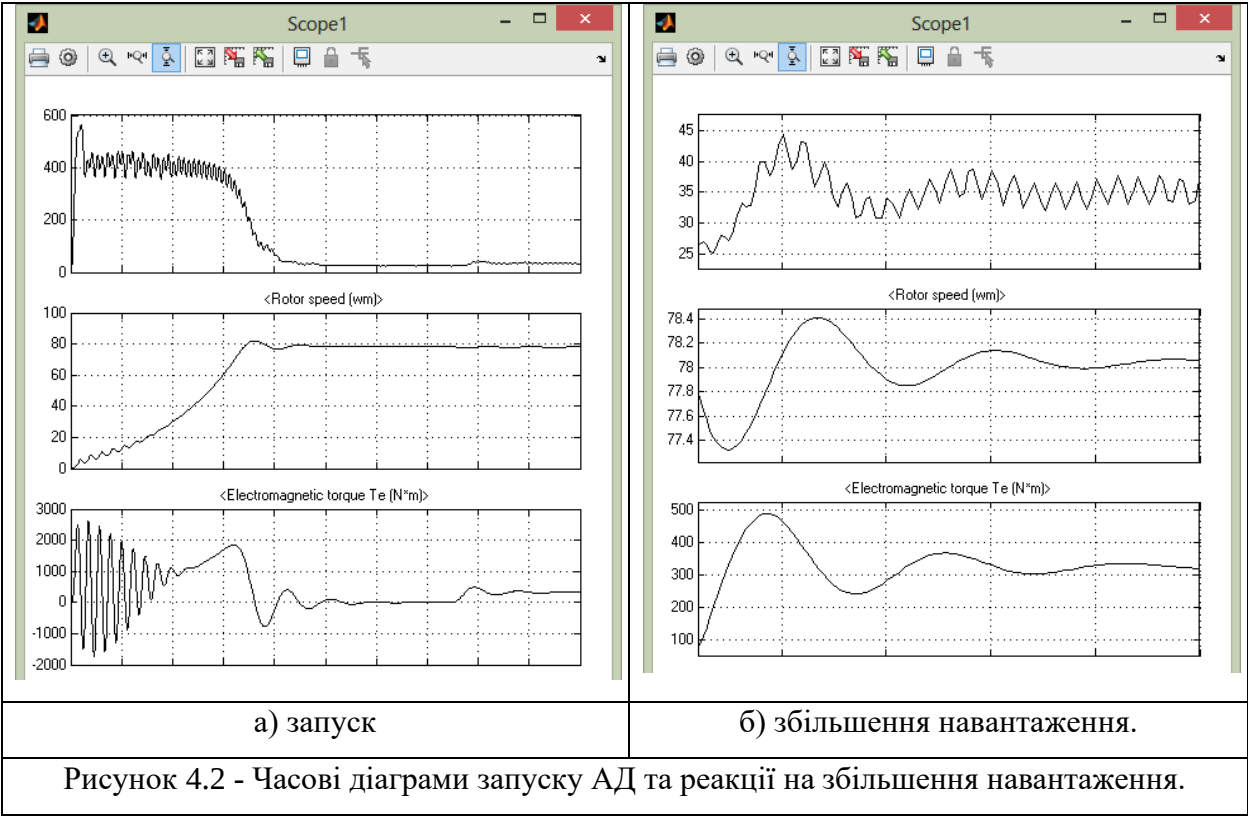


Рисунок 4.1 - Віртуальна модель АД з використанням елементів бібліотеки SimPower

На рисунку 4.1.б подано діалогові вікна для налаштування параметрів асинхронного двигуна та трифазного джерела живлення. Для моделювання динамічних режимів роботи була застосована чисельна схема Дорманда-Прінса з максимальним кроком інтегрування  $h = 0,001$  с. Результати моделювання електромеханічних процесів для моделі з

параметрами, зазначеними у пункті 2.1, представлені на рисунку 4.2. На графіках відображено динаміку струмів статора і ротора, а також зміну швидкості обертання і електромагнітного моменту при пуску двигуна без навантаження. У момент часу  $t = 2,5$  с навантажувальний момент на валу двигуна досягає номінального значення  $M_{ст} = 220 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

На рисунку 4.2.б наведено ці ж процеси в умовах збільшеного масштабу часу, що дозволяє детальніше прослідкувати динаміку при зміні навантаження.



Аналіз рис.4.2.б показує, що абсолютні значення струмів та кутової швидкості при номінальному навантаженні 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 |

#### **4.3 Математичне моделювання механізму пересування з вантажем на гнучкому з'єднанні**

Проблема взаємодії багатомасової системи, якою є крановий механізм горизонтального переміщення, з вантажем, що підвішений на гнучкому тросі, є надзвичайно важливою. Під час запуску або гальмування крана, зокрема механізмів пересування та повороту, у підвішеного вантажу виникають коливальні рухи. Якщо не передбачити спеціальних заходів, ці коливання будуть затухати дуже повільно через низький опір повітря. В результаті знижується ефективність роботи крана, погіршуються експлуатаційні характеристики.

Коливання вантажу призводять до нестабільного руху, збільшення навантаження на стрілу та інші конструктивні частини механізму, а також ускладнюють роботу оператора. Особливо це відчутно під час зупинки, коли точність позиціонування є критично важливою, наприклад, у випадках, коли кран задіяний у точному монтажі. Крім того, розгойдування вантажу суттєво ускладнює автоматизацію кранових операцій.

Як вже зазначалося, механізми горизонтального переміщення — як для прямих переміщень кранів без стріли, так і для обертальних — мають тривалі перехідні режими, які знижують загальну продуктивність. Тому для кранів з підвішеними вантажами електромеханічні системи управління необхідно оптимізувати за критерієм швидкодії, тобто мінімізувати тривалість перехідного процесу.

При цьому важливо не лише досягти необхідної швидкості руху, але й забезпечити стабілізацію вантажу: до завершення розгону вантаж має бути в стані спокою, а при зупинці — трос повинен залишатися у вертикальному

положенні, щоб не викликати подальших коливань. Отже, завдання полягає в розробці такої системи автоматичного електромеханічного керування, яка б дозволяла реалізувати оптимальну траєкторію управління згідно з заданими критеріями та обмеженнями.

Для розв'язання цього завдання зручно застосовувати принцип максимуму. Цей підхід дозволяє ефективно враховувати обмеження на керуючі впливи та широко використовується при побудові систем, що оптимізуються за критерієм швидкодії.

У підсумку, оптимізація системи з урахуванням вимог до швидкодії передбачає, що прискорення і гальмування крана повинні виконуватися за мінімальний час таким чином, щоб до завершення перехідного процесу вантаж не мав кутового відхилення і не здійснював коливального руху, тобто відхилення від вертикалі і його похідна повинні дорівнювати нулю.

#### **4.3.1 Основні рівняння механізмів поступального переміщення з підвішеним вантажем**

До подібних механізмів віднесемо механізми переміщення моста і візка мостового крана, а також козлового крана та мостових перевантажувачів. Для аналізу роботи досліджуваної механічної частини ЕМС розглянемо процес пуску механізму пересувні-ня вантажопідйомної візки з підвішеним на гнучкій нитки (канате) вантажем, описавши його диференціальними рівняннями. Відома розрахункова схема механічної частини для цього випадку [15,16], зображена на рис. 4.3. На цьому етапі досліджень-ня механізм представлений у вигляді двох поступально рушійних-ся мас:  $m_1$  - візки (моста) і  $m_2$  - вантажу, підвішеного на гнучкій нитки довжиною  $l$ ,  $s_1$  і  $s_2$  - шляху їх переміщення відповідно.

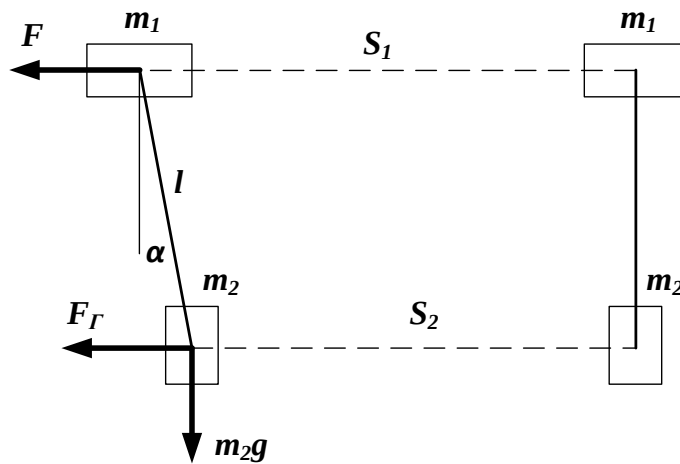


Рисунок 4.3 - Розрахункова схема механізму поступального переміщення.

Пуск механізму здійснюється під дією динамічної сили  $F$ , яка безпосередньо прикладається до візка і визначається як різниця між зусиллям (або моментом), створюваним двигуном, та силою статичного опору (тертя). Якщо значення сили опору відоме, то  $F$  фактично характеризує тягове зусилля або момент, що створюється двигуном.

Для зручності всі параметри розглядаються в площині поступального руху візка, оскільки нас цікавить поведінка підвішеного вантажу та реальний кут його відхилення від вертикалі  $\alpha$ .

Припускається, що до моменту початку руху всі люфти у приводі вже вибрані, а підвісна нитка є нерозтяжною — її довжина  $l$  не залежить від маси вантажу. Крім того, у розрахунках не враховуються зовнішні збурення, зокрема вітрові навантаження.

Із врахуванням зазначених припущень і нехтуючи втратами, пов'язаними з деформацією підвісу, рух системи можна описати відомими диференціальними рівняннями:

$$F - F_r - F_{\text{тр}} = m_1 \frac{d^2 S_1}{dt^2} \quad (4.7)$$

$$F_r = m_2 \frac{d^2 S_2}{dt^2} \quad (4.8)$$

де горизонтальна складова від сили ваги вантажу  $m_2g$ , еквівалентна зусиллю пружною лінійній деформації,

$$F_r = m_2g \frac{S_1 - S_2}{l} \quad (4.9)$$

У наведеному виразі величина  $m_2g/l$  є аналогом коефіцієнта жорсткості  $C_{12}$  у випадку лінійної деформації, де  $g$  — прискорення вільного падіння.

Кут  $\alpha$  використовується для опису відхилення вантажу від вертикального положення. За умови малих реальних кутів (приблизно 5–10 градусів) із достатнім рівнем точності можна застосувати апроксимацію:  $\sin \alpha \approx \alpha$ , що дозволяє спростити подальші розрахунки:

$$\alpha = \frac{S_1 - S_2}{l} = \frac{\Delta S}{l}$$

отож,

$$F_r = m_2g\alpha \quad (4.10)$$

Перетворюючи рівняння (4.7) і (4.8), з урахуванням формули (4.10) отримуємо вираз, що зв'язує кут відхилення вантажу з заданою дією,

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \Omega^2\alpha = \frac{F}{m_1l} \quad (4.11)$$

де частота власних коливань системи "візок - вантаж"

$$\Omega = \frac{1}{T} = \sqrt{\frac{g(m_1 + m_2)}{lm_1}} = \Omega_0\sqrt{\gamma_1} \quad (4.12)$$

а  $\Omega_0$  - Відоме значення частоти коливань математичного маятника, підвішеного до конструкції, маса якої вважається нескінченно великою ( $m_1 = \inf$ ),

$$\Omega_0 = \frac{1}{T_0} = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (4.13)$$

#### 4.3.2 Рівняння руху візка

На рис 4.4 представлена схема сил, що діють на візок.

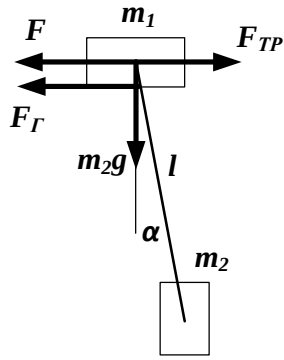


Рисунок 4.4 - Схема сил, діючих на візок з підвішеним вантажем

Зусилля  $F$  створюється приводним механізмом візка. Вага підвішеного вантажу  $m_2$  і вага візка  $m_1$  створюють зусилля тертя кочення  $F_{тр}$ , пропорційне вазі вантажу та візки,.

Також на візок впливає зусилля, викликане відхиленням вантажу від вертикалі  $F_{Г}$ , яке може бути співспрямованим або протилежно спрямованим по відношенню до вектору рушійного зусилля  $F$ . Зусилля  $F_{Г}$  можна визначити за виразом (4.10).

#### 4.3.3 Система рівнянь руху та моделювання візка з підвішеним вантажем

Повна система рівнянь руху візка з підвішеним вантажем, приведена до канонічного вигляду, представлена нижче.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_1}{dt} = v_1 \\ \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{m_1} (F_{дв} - F_{Г} - F_{тр}) \\ \frac{dS_2}{dt} = v_2 \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{m_2} \cdot F_{Г} \\ F_{тр} = (m_1 + m_2) \cdot g \cdot c_{mp} \\ \alpha = \frac{S_1 - S_2}{l} \\ F_{Г} = m_2 \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha \end{array} \right. \quad (3.21)$$

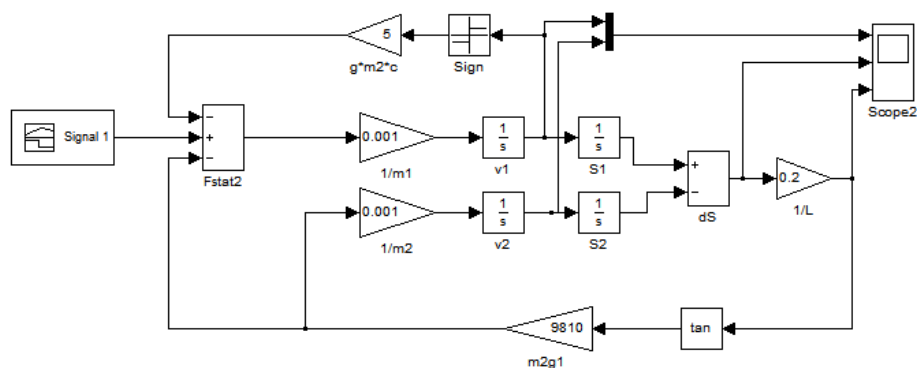


Рисунок 4.5 - Схема MATLAB, що реалізує рівняння руху візка з підвішеним вантажем.

Для цієї моделі прийнято  $m_1 = m_2 = 1000$  кг;  $l = 5$  м.

Графіки роботи цієї моделі наведено на рис. 3.12. На рисунку наведені графіки: швидкість візка / вантажу, дельта  $S$  і кут схилу вантажу.

Протягом перших 6 секунд працює привід візка. Привід відключається, але візок під дією розгойдується вантажу продовжує переміщення і остаточно зупиняється в районі позначки  $t = 60$  с, а вантаж продовжує розгойдуватися.

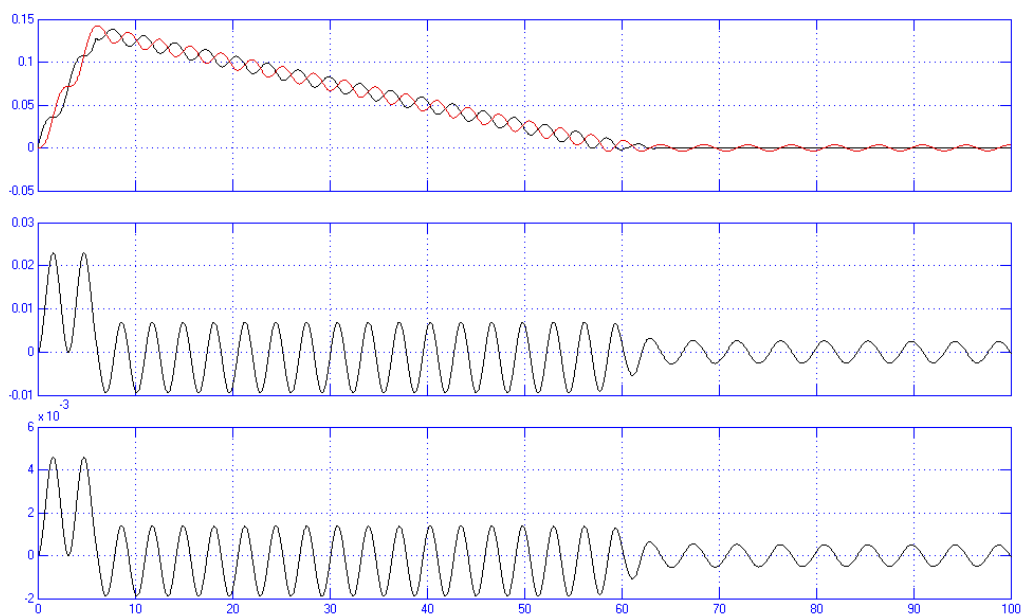


Рисунок 4.6 – Часові діаграми руху візка з підвішеним вантажем.

#### 4.4 Дослідження пускових режимів електроприводу пересування візка на віртуальній моделі

Важливою проблемою, пов'язаною з підвищенням експлуатаційної надійності кранових механізмів, є зменшення динамічних ударів та поштовхів при запуску електроприводу. Вирішення цієї задачі досягається шляхом плавного запуску механізму візка засобами регульованого електроприводу. За допомогою перетворювача частоти формуємо лінійно зростаючу від нуля до номінальної напругу на затискачах статора. У математичній моделі лінійно зростаючий сигнал формується за допомогою блоку Signal Builder, рис. 4.7.

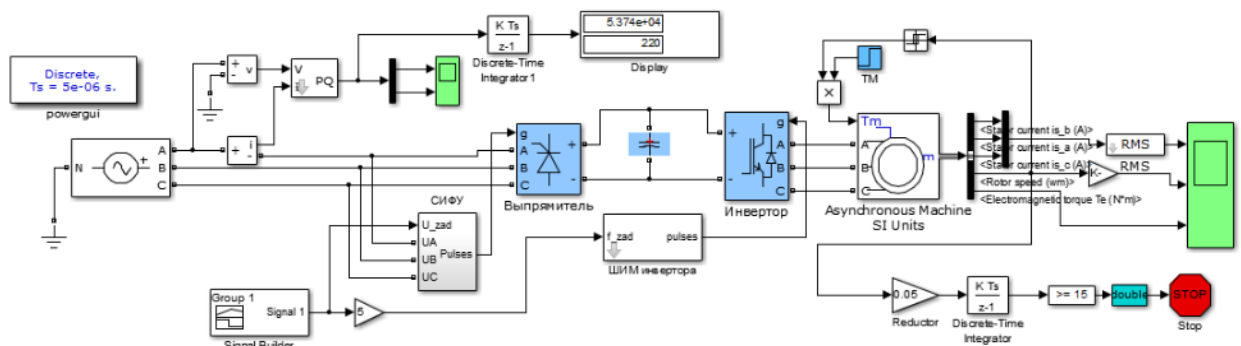
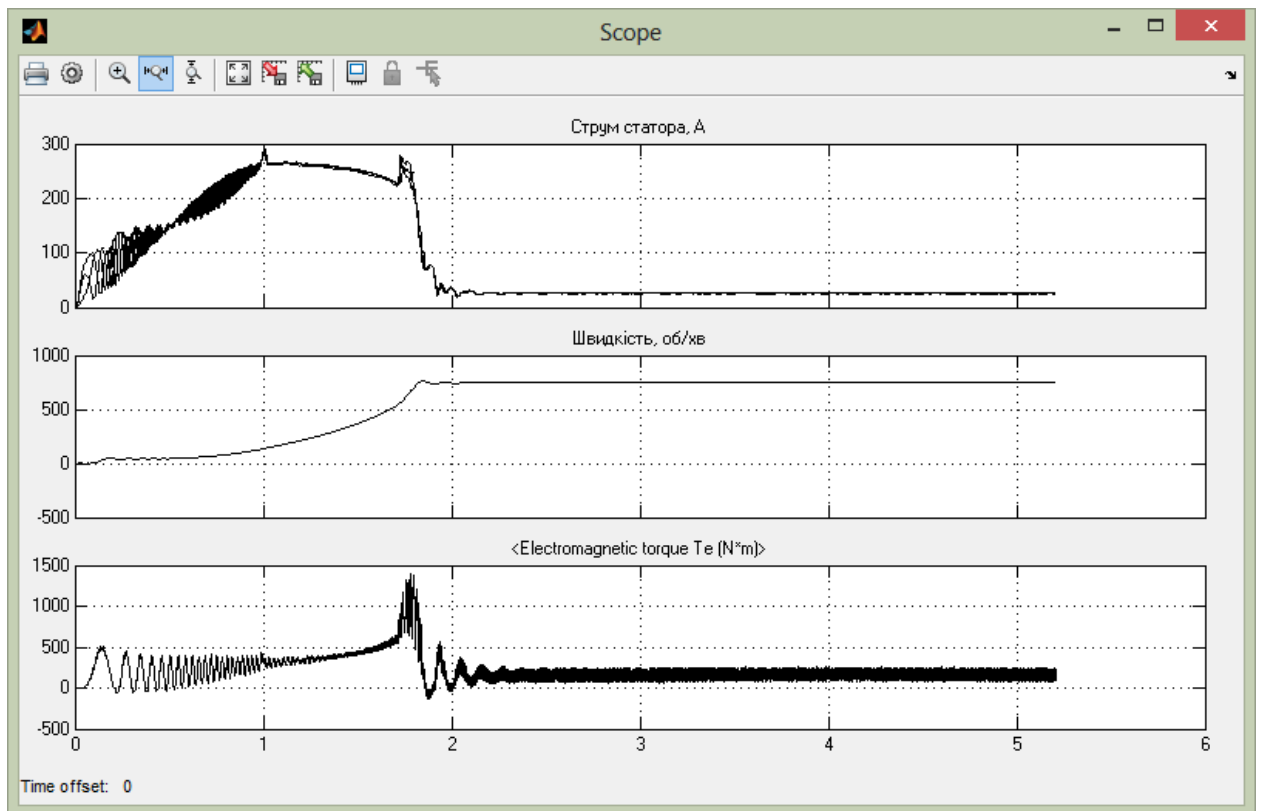


Рисунок 4.7 – Математична модель механізму пересування візка з плавним запуском електроприводу.

На рисунку 4.8 зображені часові діаграми плавного запуску механізму пересування візка та споживання активної потужності з живлячої мережі.



а)



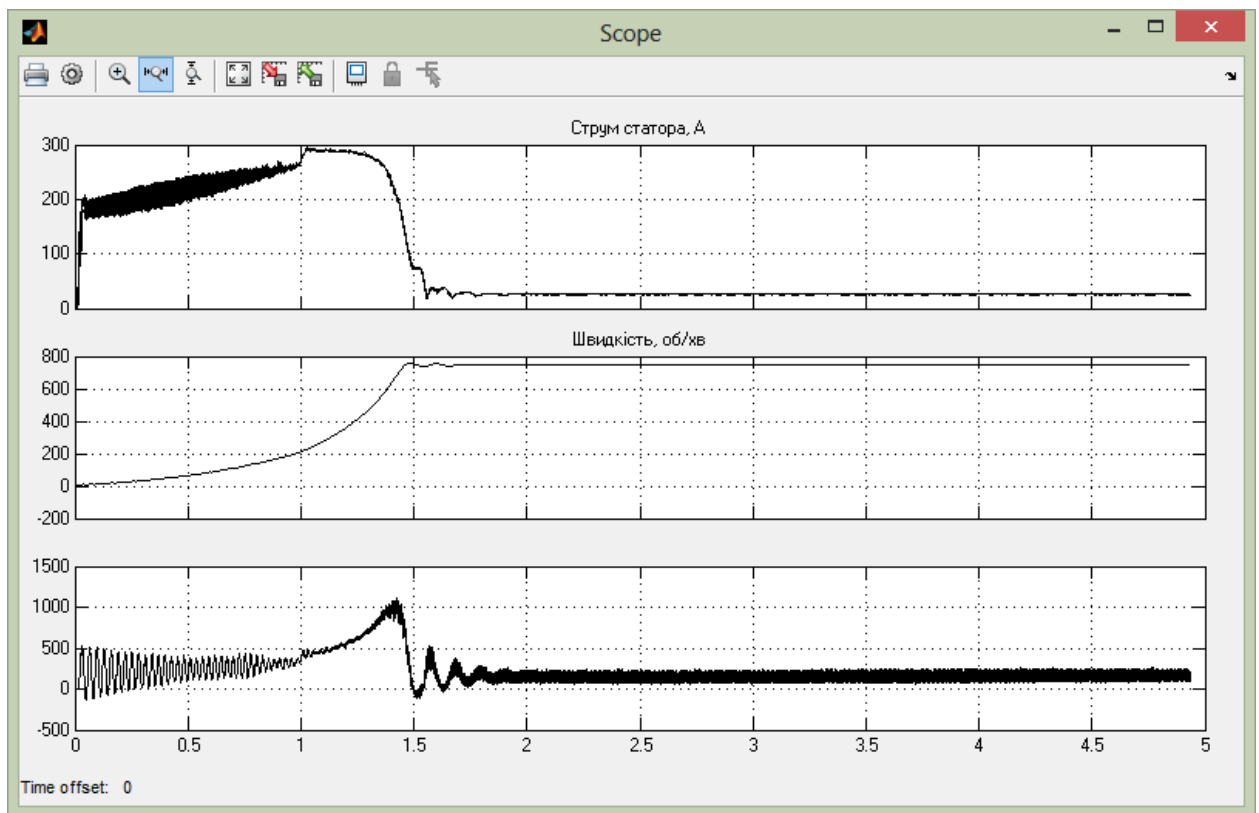
б)

Рисунок 4.8 – Часові діаграми плавного запуску а) та енергоспоживання б) електроприводу пересування візка при  $U_{z0} = 0$  В

З отриманих графіків видно, що візок починає рухатись з деяким запізненням відносно моменту включення, тому що при низьких напругах електромагнітний момент приводного двигуна виявляється замалим. Отож рух починається тільки тоді, коли напруга зростає до необхідного порогового значення.

На рис.4.9 наведено часові діаграми плавного запуску механізму пересування візка та споживання активної потужності з живлячої мережі за умови,

коли початкове значення керуючої напруги перетворювача частоти становить 6 В ( на рис.4.8 це значення складало 0 В).



а)



б)

Рисунок 4.9 – Часові діаграми плавного запуску а) та енергоспоживання б) електроприводу пересування візка при  $U_{z0} = 6$  В

З наведених діаграм видно, що за рахунок збільшення початкового значення керуючої напруги вдалося зменшити час запуску з 1.8 с до 1.5 с, а також зменшити енергоспоживання електроприводу пересування візка на 1,5 %.

### **Висновки до четвертого розділу**

У четвертому розділі приведено теоретичні відомості про математичне моделювання асинхронного двигуна у ортогональній системі координат -« $\alpha$ ,  $\beta$ , 0», непорушної відносно статора,  $\omega_k = 0$ . За допомогою програми Matlab/Simulink розроблено віртуальну модель асинхронного двигуна, виконано дослідження типових електромеханічних процесів запуску та збільшення навантаження. Розроблено віртуальну модель частотно-керованого асинхронного електропривода з дворівневим автономним інвертором напруги. Досліджено експлуатаційні режими електроприводу пересування візка при прямому та плавному запуску з лінійно зростаючою керуючою напругою. Для покращення експлуатаційних та енергетичних характеристик необхідно задавати ненульове значення початкової напруги керування перетворювачем частоти.