

**РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
Частина 1**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Частина 1

**Електронний навчальний посібник
комбінованого (локального та мережного) використання**

Вінниця
ВНТУ
2022

УДК [621.316.925:621.313.3.027.3](075.8)
Р36

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 31.03.2022 р.)

Автори:

Тептя В. В., Комар В. О., Лесько В. О., Бурикін О. Б.

Рецензенти:

Черкашина В. В., доктор технічних наук, доцент

Лисенко О. В., доктор технічних наук, доцент

Розводюк М. П., кандидат технічних наук, доцент

Релейний захист високовольтних електродвигунів. Ч. 1 :
Р36 електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / В. В. Тептя, В. О. Комар, В. О. Лесько, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 137 с.

В посібнику розглянуто питання релейного захисту високовольтних електричних двигунів. Викладено загальні технічні вимоги до релейного захисту, розглянуто основні елементи пристроїв релейного захисту. Висвітлено питання, присвячені основним характеристикам і режимам електродвигунів.

Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів електроенергетичних спеціальностей, які вивчають питання релейного захисту й автоматики електричних станцій та мереж.

УДК [621.316.925:621.313.3.027.3](075.8)

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	4
ПЕРЕДМОВА	5
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В	7
1.1 Сфери застосування та умови експлуатації	7
1.2 Характеристики механізмів	10
1.3 Пристрої збудження синхронних електродвигунів	11
1.4 Експлуатаційні перехідні режими електродвигунів.....	17
2 ПОШКОДЖЕННЯ ТА НЕНОРМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	31
2.1 Аналіз пошкодженості високовольтних електродвигунів.....	31
2.2 Однофазні замикання на землю (корпус).....	35
2.3 Багатофазні та виткові КЗ в обмотці статора.....	38
2.4 Нагрівання електродвигунів під час перевантаження.....	42
2.5 Несиметричні режими роботи	44
2.6 Втрата живлення	49
2.7 Асинхронний режим синхронного електродвигуна.....	56
2.8 Аварійні режими пристроїв збудження	59
3 ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	61
3.1 Структурні схеми релейного захисту	61
3.2 Вимірювальні трансформатори струму та їх характеристики	63
3.3 Трансформатори струму нульової послідовності.....	64
3.4 Вимірювальні органи захисту.....	71
3.5 Елементи логічної частини захистів	73
3.6 Сигнальні органи захистів електродвигунів	74
3.7 Пристрої оперативного струму.....	74
4 ВИКОНАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	78
4.1 Загальні технічні вимоги	78
4.2 Захист від замикання на землю (корпус) в обмотці статора	79
4.3 Захист від багатофазних замикань в обмотці статора.....	83
5 ЗАХИСТ ЕЛЕКТОДВИГУНІВ ВІД ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ	96
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	109
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	111
ДОДАТКИ	112
Додаток А Схеми захистів електродвигунів.....	113
Додаток Б Технічні дані електродвигунів 6 кВ власних потреб електростанцій	123

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АБ – акумуляторна батарея;
АВР – автоматичне введення резерву;
АД – асинхронний двигун;
АПВ – автоматичне повторне вмикання;
АР – асинхронний режим;
АРЗ – автоматичне регулювання збудження, автоматичний регулятор збудження;
БПЗ – безщітковий пристрій збудження;
ВО – вимірювальний орган;
ВП – власні потреби;
ЕД – електродвигун;
ЕРС – електрорушійна сила;
КЗ – коротке замикання;
КРУ – комплектна розподільна установка;
МРС – магніторушійна сила;
МСЗ – максимальний струмовий захист;
ОЗЗ – однофазне замикання на землю;
ПЗП – підзарядний пристрій;
ПО – пусковий орган;
ПП – пункт перемикання;
ПС – підстанція;
ПУЕ – правила улаштування електроустановок;
РЗ – релейний захист;
РЗА – релейний захист та автоматика;
РП – розподільний пункт;
РУ – розподільна установка оперативного струму;
СВС – система випрямленого оперативного струму;
СД – синхронний двигун;
СНП – струм нульової послідовності;
ТВП – трансформатор власних потреб;
ТН – трансформатор напруги;
ТНП – трансформатор струму нульової послідовності з підмагнічуванням;
ТПЗ – тиристорний пристрій збудження;
ТС – трансформатор струму;
ТСНП – трансформатор струму нульової послідовності;
ЦАП – цифровий аналоговий перетворювач;

ПЕРЕДМОВА

Розвиток та вдосконалення технології різних виробництв обумовлюють впровадження в електроустановках двигунів напругою вище 1 кВ. Тенденція до збільшення одиничної потужності електродвигунів в поєднанні з ускладненням конструкцій електричних машин з метою отримання більш високих техніко-економічних показників, робота електродвигунів в умовах, які негативно впливають на електричну ізоляцію, часто в екстремальних режимах за навантаженням – все це висуває підвищені вимоги до релейного захисту електродвигунів.

Для збереження безперервності технологічного процесу більшості сучасних виробництв, для запобігання виникнення та розвитку системних аварій, які стосуються елементів систем електропостачання до електростанцій, релейний захист електродвигунів має своєчасно ліквідувати пошкодження в них, реагувати на аварії у відповідних вузлах електричного навантаження, узгоджено діяти з пристроями релейного захисту й автоматики електроустановок [1, 2].

Релейний захист електродвигунів має реагувати на внутрішні пошкодження та небезпечні ненормальні режими. Особливе місце серед електродвигунів займають електродвигуни механізмів власних потреб електростанцій. Їх вимикання через неправильну дію захисту може порушити нормальну роботу електростанції, тому захист електродвигунів відповідальних механізмів станцій має мати особливу надійність.

У промисловості та в установках власних потреб електростанцій найбільш широко використовують прості та надійні в експлуатації асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором. На потужних теплових електростанціях застосовують крупні асинхронні електродвигуни від 200 до 8000 кВт з номінальною напругою 6 кВ.

Велике значення для безперервної роботи промислових підприємств та особливо власних потреб електростанцій має самозапуск електродвигунів.

У зв'язку з цим захист електродвигунів має забезпечувати можливість їх самозапуску, тобто він не має передчасно вимикати їх як під час зниження напруги, так і за її відновлення.

Електродвигуни напругою вище 1 кВ мають у своєму складі комплект релейного захисту від пошкоджень та аномальних режимів, які виконано на основі окремих електромеханічних, напівпровідникових і мікропроцесорних реле, які мають певні переваги та недоліки.

В навчальному посібнику розглядаються питання релейного захисту високовольтних електродвигунів, які охоплюють умови їх експлуатації, характеристики механізмів, основні елементи конструкції та експлуатаційні перехідні режими електродвигунів.

Посібник складається з двох частин.

Проведено аналіз пошкоджень двигунів, наведено структурні схеми релейного захисту та опис елементів, з яких він складається, пристрої оперативного струму.

Викладено загальні технічні вимоги до релейного захисту, описані усі види захистів: захист від замикань на землю (корпус) обмотки статора, захист від багатофазних коротких замикань, перевантаження, асинхронного режиму для синхронних двигунів, втрати живлення та несиметричних і виткових замикань.

Наведено схеми захисту електричних двигунів різної потужності та типів, з розвантаженням перед самозапуском, реакторним пуском, різкозмінним навантаженням на валу та динамічним гальмуванням, а також схеми захисту на змінному оперативному струмі.

Для розглянутих захистів електродвигунів наведені методики вибору уставок:

- від замикань на землю;
- струмової відсічки;
- диференціального струмового захисту;
- максимального струмового захисту;
- від струмів перевантаження;
- від асинхронного режиму;
- від втрати живлення.

Наведено приклади мікропроцесорних захистів високовольтних електродвигунів.

Посібник призначено для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка й електромеханіка» денної та заочної форм навчання. Зміст навчального посібника відповідає робочим навчальним програмам дисциплін «Основи релейного захисту» та «Релейний захист та автоматика електричних систем». Матеріал посібника може бути корисний студентам при підготовці до курсового і дипломного проектування, а також для виконання кваліфікаційних бакалаврських і магістерських робіт.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ НАПРУГОЮ ВИЩЕ 1000 В

1.1 Сфери застосування та умови експлуатації

Серед електроприймачів промислових підприємств та електричних станцій значне місце займають асинхронні (АД) та синхронні (СД) двигуни.

Найбільше розповсюдження отримали дешеві, прості за конструкцією та надійні асинхронні двигуни, які використовуються для приводів різного роду вентиляторів, насосів, транспортерів, конвеєрів, димотягів, перетворювальних агрегатів тощо.

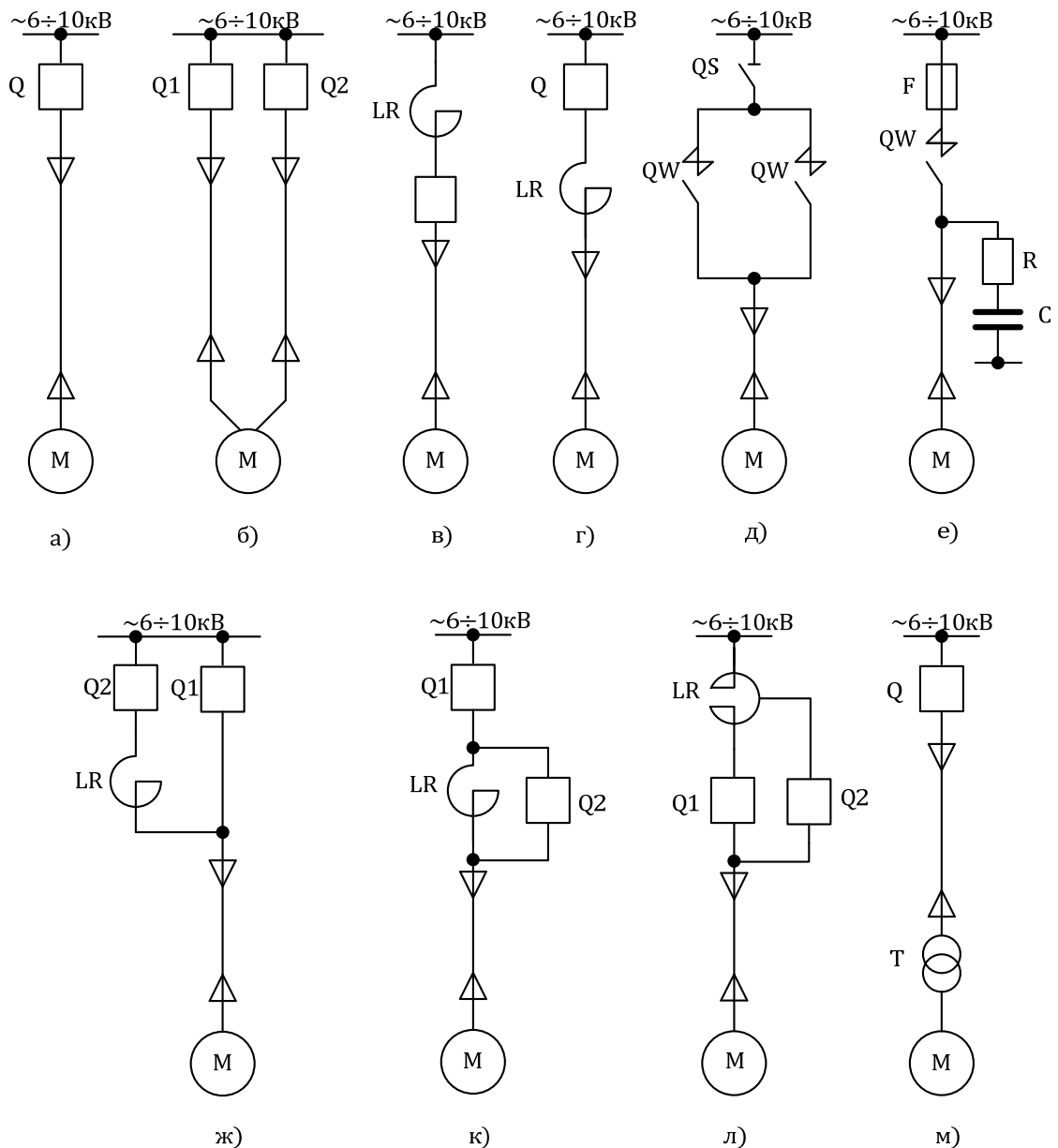
Синхронні двигуни, які відрізняються високою перевантажувальною спроможністю та підвищеною стійкістю при зниженні напруги в мережі, успішно працюють в потужних установках як тривалого режиму, так і при різкозмінних циклічних навантаженнях. Вони застосовуються для приводу механізмів з постійним моментом обертання: двигун-генератори, газові компресори, ексгаустери, повітродувки, млини, насоси водопостачання тощо.

Діапазон номінальних потужностей електродвигунів (ЕД) напругою вище 1 кВ складає від декількох сотень до одиниць та десятків мегават.

Умови експлуатації суттєво залежать від особливостей технологічного процесу виробництва та від того місця, яке займає в ньому цей механізм. Значна частина електродвигунів в різних галузях промисловості працює у важких кліматичних і технологічних умовах.

Електродвигуни напругою вище 1 кВ підключаються до розподільних установок (РУ) підстанцій (ПС), розподільних (РП) та перемикальних (ПП) пунктів одним з нижченаведених способів [1, 7].

Безпосереднє підключення кабельною лінією до вимикача розподільної установки (рис. 1.1, а)). Довжина кабельної лінії звичайно не перевищує 300÷400 м, а кількість та переріз кабелів визначаються потужністю електродвигунів та – в низці випадків – рівнем струмів короткого замикання (КЗ) в мережі. Двошвидкісні електродвигуни підключаються таким чином, що для обмотки кожної швидкості передбачається свій вимикач (рис. 1.1, б)). Схема з постійно ввімкненим реактором (рис. 1.1, в)) застосовується за необхідності суттєвого обмеження струмів КЗ до значень, які дорівнюють номінальним струмам вимикання серійних вимикачів комплектних розподільних установок (КРУ): 20; 31,5; 40 кА. За конструктивними міркуваннями, залежно від виду КРУ та рівнів струмів короткого замикання, реактор може бути встановлено не тільки до, а й за вимикачем розподільної установки, а кабельна лінія підключена до реактора (рис. 1.1, г)).



а), б) – безпосереднє підключення; в), г) – безпосереднє підключення з постійно ввімкненим реактором LR; д), е) – підключення за допомогою контактора QW; ж), к), л) – схеми підключення з реакторним пуском; м) – блок трансформатор-електродвигун

Рисунок 1.1 – Підключення електродвигунів до мережі живлення

Підключення кабельної лінії до контактора (QW на рис. 1.1, д), е)) широко використовується в даних установках. Контактор служить для ввімкнення та вимикання електродвигунів в нормальних експлуатаційних режимах, а також при пошкодженнях, які супроводжуються проходженням струму, що не перевищує значення номінального струму вимикання (для контактора КВМ-400/30 $I_{\text{ном.вим.}} = 4,97$ кА). За кордоном лінії до електродвигуна часто підключаються до мережі за допомогою контакторів,

які мають, завдяки швидкому (менше ніж за період струму) часу гасіння дуги у вакуумі, великий ресурс комутаційних операцій (50 тис. і більше ввімкнень). Схеми з такими апаратами стають економічно доцільними, наприклад, для електродвигунів приводів стрічкових конвеєрів, які за умовами технологічного процесу працюють в режимі частих увімкнень–вимикань (див. рис. 1.1,)). Для запобігання перенапруг в колі електродвигуна встановлюють RC-демпфер. Потрібно відмітити, що за кордоном захист електродвигунів від коротких замикань часто здійснюється запобіжниками (F див. рис. 1.1, е)), а від перевантажень та несиметричних режимів – релейними захистами, які діють на вимикання контактора.

Схема з пусковим реактором має два вимикачі, один з яких шунтує реактор в момент закінчення процесу пуску електродвигуна. Реактор служить для обмеження зниження напруги на збірних шинах та (або) для забезпечення необхідного рівня напруги на лінійних виводах електродвигуна під час пуску. Внаслідок відсутності реакторів, які випускаються промисловістю для пуску електродвигунів, пускові реактори вибираються з числа струмообмежувальних. Залежно від конкретних умов конструктивного компанування РУ та реактора використовується схема з одним (див. рис. 1.1, ж)) або з двома (див. рис. 1.1, к)) вимикачами в колі електродвигуна в тривалому режимі його роботи. В першому випадку пуск електродвигуна здійснюється ввімкненням вимикача Q2, який вимикається після ввімкнення вимикача Q1 основного живлення. У другому випадку електродвигун запускається ввімкненням вимикача Q1 при відключеному Q2. Після закінчення пуску вимикач Q2 шунтує реактор і, таким чином, основне живлення електродвигуна здійснюється по колу: шини – Q1 – Q2 – лінія.

Схема з подвійним реактором (див. рис. 1.1, л)) використовується, коли крім необхідності забезпечення потрібного рівня напруги при пуску, є також потреба обмеження струму КЗ. При пуску обидві вітки реактора виявляються ввімкненими послідовно (вимикач Q2 відключено). Після закінчення пуску одна з віток реактора шунтується ввімкненням Q2. Таким чином, в обмеженні струму КЗ бере участь тільки одна вітка подвійного реактора. Конструктивно схема стає громіздкою, потребує перевірки електродинамічної стійкості реактора при КЗ. Однак для потужних ЕД, для яких звичайно необхідно значне зниження напруги на лінійних виводах при пуску, така схема, як правило, є техніко- та економічно доцільною.

Схема блоку трансформатор – електродвигун. В наш час ще не всі типи ЕД випускаються промисловістю на номінальну напругу 10 кВ. Тому для підключення окремого ЕД на номінальну напругу 6 кВ до основної розподільної мережі електропостачання напругою 10 кВ використовують індивідуальний трансформатор 10/6 кВ (Т, див. рис. 1.1, м)).

1.2 Характеристики механізмів

Залежно від призначення та ролі в технологічному процесі механізми поділяють на відповідальні та невідповідальні [15]. До відповідальних механізмів власних потреб (ВП) електростанцій відносять ті, зупинка яких викликає або зниження навантаження, або зупинку котлів та турбін. Це – дуттєві вентилятори, димотяги, живильний та циркуляційний насоси тощо. На промислових підприємствах до відповідальних відносять ті механізми, раптова зупинка яких призводить до появи небезпеки для життя людини, пошкодження дорогого та унікального технологічного обладнання, до тривалих простоїв виробництва і значного недовідпуску продукції.

До невідповідальних механізмів відносять такі, нетривала зупинка яких не порушує нормального технологічного процесу виробництва. Це, наприклад, механізми хімоводоочищення, паливоподачі та попіловидалення на електростанціях, дроблення руди, екскаватори та стрічкові транспортери в гірничій промисловості тощо.

За ступенем відповідальності механізмів електродвигуни також називають відповідальними або невідповідальними. Відповідальні аззвичай відносять до електроприймачів I, рідко – II категорій надійності електропостачання, невідповідальні – до електроприймачів III, в деяких випадках – II категорій.

Вплив механізму на навантажений електродвигун, прийнято характеризувати моментом опору M_O . Момент опору в загальному випадку визначається початковим статичним моментом $M_{O,поч}$ при зрушуванні з місця та змінюванням M_O в функції частоти обертання n вала електродвигуна. Залежно від характеристики $M_O(n)$ всі механізми можуть бути поділені на дві групи [15]. В першу групу входять ті, моменти опору яких практично не залежать від частоти обертання n вала електродвигуна. Це – кульові млини, головні приводи прокатних станів, конвеєри, поршневі компресори тощо. Згідно з конкретними умовами роботи момент опору механізмів цієї групи може приймати будь-які значення. Зазвичай для механізмів з тривалим режимом безперервної роботи момент $M_O = (0,8 \div 0,9) M_{ном}$, де $M_{ном}$ – момент, який відповідає номінальній потужності та номінальній частоті обертання електродвигуна, а при різко змінному, ударному циклічному навантаженні значення M_O можуть досягати $(2 \div 2,5) M_{ном}$.

Другу групу створюють механізми з вентиляторним моментом опору, який можна навести у вигляді [15]

$$M_O = M_{O,поч} + (M_{O,ном} - M_{O,поч}) \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^p. \quad (1.1)$$

Приймаючи $M_{O*} = M_O / M_{O,поч}$ та $M_{O,поч*} = M_{O,поч} / M_{O,ном}$, отримаємо

$$M_{O*} = M_{O.пoch*} + (1 - M_{O.пoch*}) \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^p, \quad (1.2)$$

де $M_{O.пoch}$ – початковий момент опору механізму без урахування моменту тертя спокою;

$M_{O.ном}$ – номінальний момент опору механізму;

p – показник ступеня, $p \neq 0$;

$n_{ном}$ – номінальна частота обертання, об/хв., при якій момент опору дорівнює номінальному.

Для вентиляторів, димотягів та газодувок середнє значення $M_{O.пoch} = 0,15$, $p = 2$. При цьому з (1.2) отримаємо

$$M_{O*} = 0,15 + 0,85 \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^2. \quad (1.3)$$

Для поршневих компресорів середнє значення $M_{O.пoch*} = 0,25$, а $p = 2$, як і для вентиляторів.

Центробіжні насоси мають в середньому $M_{O.пoch} = 0,15$, а показник ступеня p може змінюватися в широких межах залежно від характеру роботи насоса. Зі збільшенням статичної складової в загальному тиску величина p може досягти $5 \div 6$.

На рисунку 1.2 наведено характеристики $M_{C*} \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)$ для різних механізмів промислових підприємств та власних потреб електричних станцій.

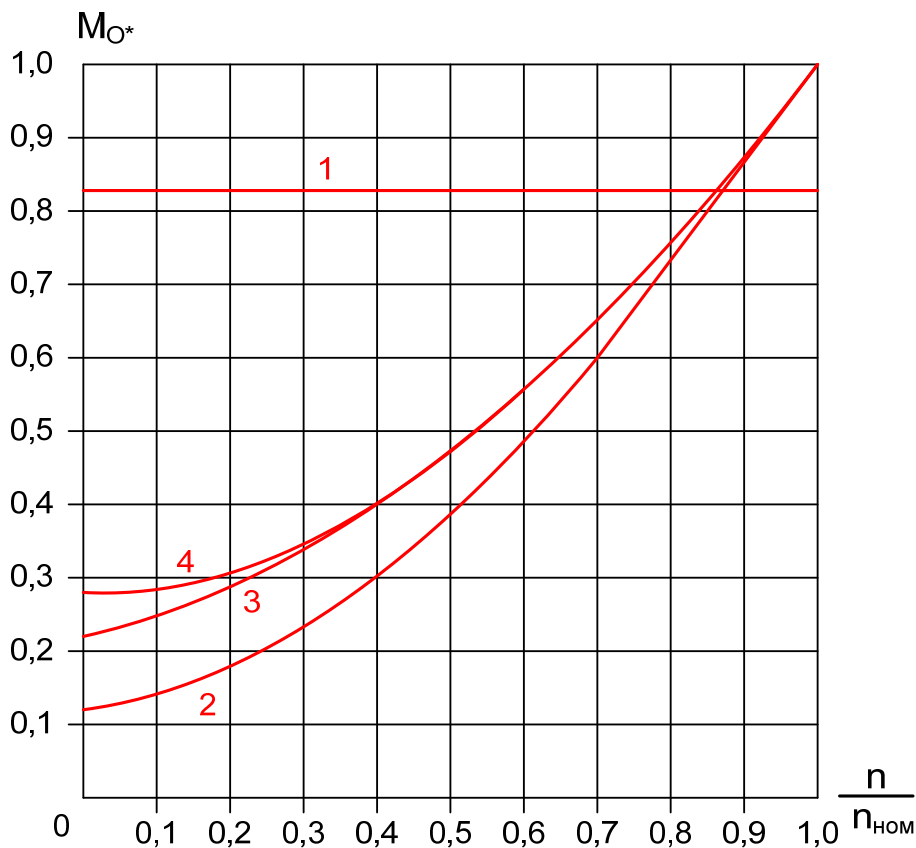
1.3 Пристрої збудження синхронних електродвигунів

Сучасні синхронні двигуни можуть мати електромашинні збудники (ЕМЗ) або тиристорні (ТПЗ) і безшунтові (БПЗ) пристрої збудження.

Електромашинний збудник є генератором постійного струму з самозбудженням, ротор якого, як правило, розташовується на одному валі з електродвигуном. Основними перевагами електромашинних збудників вважається простота схеми керування та мала залежність їх роботи від рівня напруги на виводах обмотки статора.

Принципова схема пристрою збудження синхронного двигуна наведена на рисунку 1.3. Вона має обмотку збудження LM електродвигуна, яка підключена до збудника ME через контакти контактора збудження KM, і пусковий опір $R_{п}$. Ручне регулювання збудження здійснюється шунтовим реостатом R в колі обмотки збудження збудника LME. Автоматичне регулювання виконується автоматичним регулятором збудження (АРЗ), який, залежно від прийнятого закону регулювання, забезпечує збільшення

або зменшення струму в обмотці збудження. Форсування збудження здійснюється шунтуванням реостата R контактами контактора форсування КМЕ, який в більшості випадків керується реле мінімальної напруги.



1 – стержневий млин; 2 – димтяг; 3 – дроблення вугілля;
4 – поршневий компресор

Рисунок 1.2 – Криві моментів опору різних механізмів

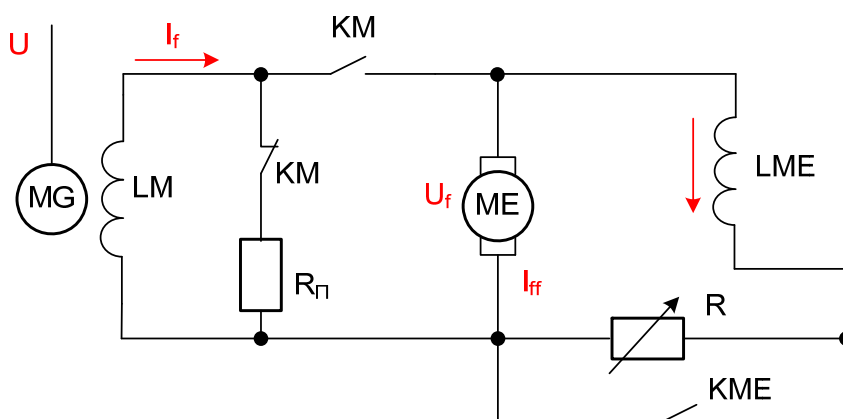


Рисунок 1.3 – Схема електромашинного збудника синхронного двигуна

Характеристика холостого ходу електромашинного збудника може бути визначена формулою

$$U_f = \frac{1,4 \cdot I_{ff}}{1 + 0,4 \cdot I_{ff}} \cdot \omega_3, \quad (1.4)$$

де U_f – напруга збудника;

I_{ff} – струм в обмотці збудження збудника;

ω_3 – кутова швидкість збудника.

Оскільки збудник і ротор синхронних двигунів обертаються з однаковою кутовою швидкістю ω , опір якоря збудника невеликий, то навантажувальна характеристика збудника має вигляд

$$U_f = \frac{1,4 \cdot I_{ff}}{1 + 0,4 \cdot I_{ff}} \cdot \omega. \quad (1.5)$$

В схемі рисунку 1.3 струм збудника пов'язаний з напругою лінійною залежністю

$$I_{ff} = U_f / R,$$

що дозволяє, прийнявши параметри режиму збудження в номінальному режимі за базові, вважати, що у відносних одиницях $I_{ff} = U_f$.

Використовуючи це співвідношення, з (1.5) отримуємо залежність напруги збудника в номінальному режимі ЕД від кутової швидкості

$$U_f = 3,5 \cdot \omega - 2,5. \quad (1.6)$$

Значення U_f , як випливає з (1.6), позитивне при визначених значеннях кутової швидкості: $\omega > \omega_{кр} = 0,714$. При менших швидкостях приймається $U_f = 0$.

Якщо режим електродвигуна відрізняється від номінального, наприклад, в частині коефіцієнта завантаження або $\cos\varphi$, то напруга на обмотці збудження зображається системою

$$U_f = \begin{cases} 3,5 \cdot \omega + U_{f,ном} - 3,5 & \text{при } \omega > \omega'_{кр}; \\ 0 & \text{при } \omega < \omega'_{кр}, \end{cases} \quad (1.7)$$

де $U_{f,ном}$ – напруга на обмотці збудження в початковому режимі при $\omega = 1$; $U_{f,ном} \equiv 1/R$; $\omega'_{кр} = 1 - U_{f,ном} / 3,5$.

Всі величини в (1.6) та (1.7) наведені у відносних одиницях.

Залежність напруги U_f від рівня напруги U на виводах синхронного двигуна визначається дією форсування збудження. При напрузі, більшій уставки спрацювання $U_{ср.ф}$ реле форсування, U_f змінюється згідно з (1.7), а при роботі форсування – за законом $U'_f = U_f \cdot K_f$, де K_f – кратність форсування збудження.

Головна особливість *безщіткових пристроїв збудження* полягає в безконтактній передачі потужності збудження на ротор синхронного двигуна за повної відсутності контактних пристроїв в колі збудження. Це полегшує процес керування та підвищує надійність роботи двигунів.

Пристрої серії БПЗ відносять до типу безщіткових систем збудження з синхронним збудником та некерованим обертовим випрямлячем. Керування струмом збудження здійснюється через розташовану на статорі збудника обмотку LME (рис. 1.4).

Через конструктивні особливості безщітковий пристрій збудження наразі використовується тільки для синхронних двигунів серії СТД номінальною потужністю від 630 до 12500 кВт напругою 6 та 10 кВ.

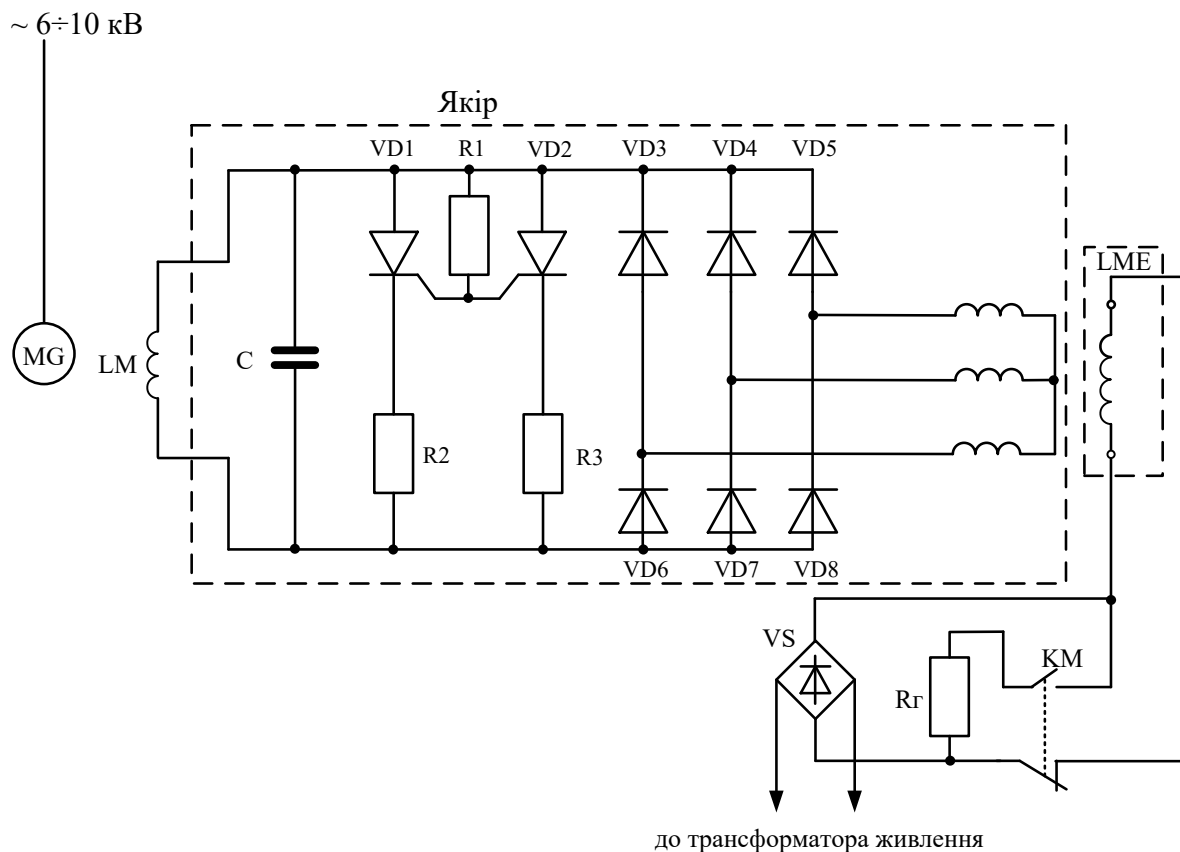


Рисунок 1.4 – Схема безщіткового пристрою збудження

Збудник являє собою обернений трифазний синхронний генератор частотою 400 Гц, обертовий якір якого закріплено на консольному кінці вала двигуна і через центральний отвір вала пов'язаний електрично шинами з обмоткою збудження двигуна, а охоплюючий його статор з

обмоткою збудження самого збудника розташовується на фундаментній плиті. Якір збудника поєднує в одній конструкції осердя з обмоткою та випрямлювач, який ізольовано як від осердя якоря, так і від вала. Статор збудника являє собою 16-типолюсну конструкцію, яка є звичайною для машин постійного струму. Кінці обмотки статора підключаються до станції керування. Живлення обмотки збудження збудника подається тільки при синхронізації синхронного двигуна та його роботі в синхронному режимі. Таким чином, в якорі збудника наводиться змінна ЕРС, яка зумовлює протікання в обмотці збудження LM постійного, точніше, випрямленого за допомогою діодів VD3÷VD8 струму. Струм збудження, а отже, і напруга на обмотці збудження при незмінному опорі обмотки збудження є прямо пропорційним струму збудження збудника I_{ff} . Це пояснюється відсутністю насичення збудника в діапазоні струмів, які не перевищують номінального. Паралельні тиристори VD1 та VD2 служать для захисту діодного перетворювача від перенапруг, які виникають на обмотці збудження при пуску, та забезпечення самого пуску в зв'язку з односторонньою провідністю перетворювача. Поріг відкривання тиристорів анодною напругою, яка наводиться в обмотці збудження, задається резистором R1 так, щоб повністю унеможливити відкривання захисного кола в будь-якому з асинхронних режимів з малим ковзанням, яке відповідає навантаженню двигуна в діапазоні від нуля до номінального, і при всіх можливих кратностях форсування збудження.

Оскільки збудник розташовано на одному валі з ротором синхронного двигуна, то напруга на обмотці збудження пропорційна кутовій частоті ротора

$$U_f = K \cdot \omega \cdot I_{ff},$$

де K – коефіцієнт пропорційності.

Якщо живлення статора збудника здійснюється від секції шин розподільної установки, до якої підключено синхронний двигун, то напругу на обмотці збудження, в.о., можна виразити формулою

$$U_f = U_{f,ном} \cdot \omega \cdot U.$$

Така залежність має місце в діапазоні $U_{с.ф} < U \leq U_{ном}$ (де $U_{с.ф}$ – напруга спрацювання форсування збудження), що у відносних одиницях відповідає рівню напруги на виводах синхронного двигуна

$$0,8 \leq U \leq 1.$$

На інтервалі $0,5 \leq U \leq 0,8$ дію форсування збудження забезпечить

$$U_f = K_\phi \cdot U_{f,ном} \cdot \omega \cdot U,$$

а при $U < 0,5$ можна вважати, що $U_f = 0$.

Гасіння поля в безщіткових пристроях збудження здійснюється розриванням кола збудження збудника та замиканням виходу випрямлювального містка на гасильний опір R_g . При цьому обмотка збудження синхронного двигуна стає замкненою накоротко.

Тиристорні пристрої збудження (ТПЗ) відносять до статичних систем збудження, які засновано на використанні за збудника керованого тиристорного перетворювача ТП (рис. 1.5).

Живлення перетворювача здійснюється від мережі змінного струму через силовий трансформатор ТН. Паралельно обмотці збудження синхронного електродвигуна МГ через тиристорний ключ VD підключено пусковий опір R1, який призначено для асинхронного пуску та зниження до допустимого значення перенапруг на перетворювачі, що виникають в обмотці ротора при пуску. Керування тиристором перетворювача здійснюється імпульсами, які надходять з фазоімпульсного пристрою ФІП, що пов'язаний з блоком уставок та обмежень БУО. На вхід БУО надходять сигнали від пристрою пуску П, форсування Ф, інвертування Інв, системи обмеження струму ротора ОСР та захистів, які вбудовано у збуджувач. В режимі автоматичного керування до них додаються вихідні сигнали пристрою автоматичного регулювання збудження АРЗ за напругою та коефіцієнтом потужності вузла навантаження або самого синхронного двигуна.

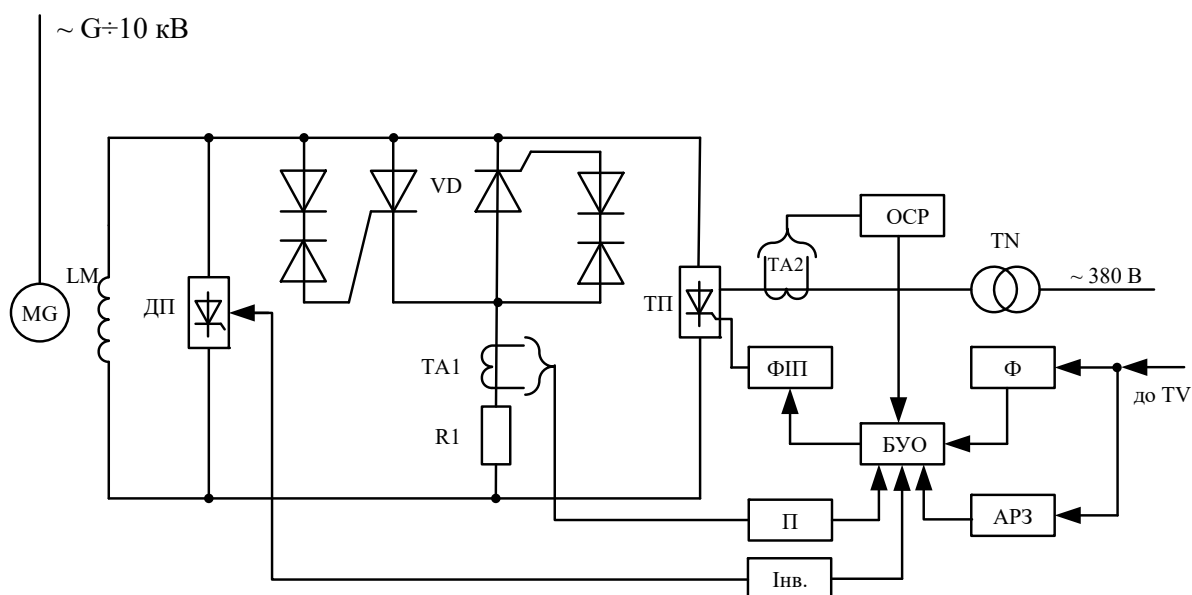


Рисунок 1.5 – Схема тиристорного пристрою збудження

Пристрій форсування Φ призначено для переведення синхронного двигуна в режим форсування збудження при зниженні напруги U мережі живлення.

Для здійснення гасіння поля ротора при вимиканні синхронного двигуна оператором тиристорний перетворювач ТП за допомогою схеми Інв. переводиться в режим інвертування. Тим самим енергія поля ротора передається в мережу через узгоджувальний трансформатор ТН.

В режимах, де потребується форсоване гасіння поля, після переведення ТП в режим інвертування здійснюється реверс струму перетворювача, для чого в складі збуджувача передбачено додатковий тиристорний перетворювач ДП.

Напруга на обмотці збудження головним чином визначається рівнем напруги мережі, кутом відкриття тиристорів α , а отже, залежністю похибок реалізації прийнятого закону регулювання від рівня напруги живлення та частоти мережі і кратності форсування збудження.

Тому функція виявляється достатньо складною і виглядає так [7]:

$$U_f = \begin{cases} U_{\text{фнн}} \cdot U & \text{при } U > 0,5; \\ \frac{K_1 \cdot U}{1 + K_2} & \text{при } U > 0,5 \text{ та увімкненому форсуванні збудження;} \\ 0 & \text{при } U \leq 0,5; \\ K_1 \cdot U \cdot \cos \frac{\pi \cdot \alpha}{180} - E_q \cdot K_2 & \text{при обмотці збудження, яка підключається} \\ & \text{до збуджувача в режимі інвертування.} \end{cases}$$

1.4 Експлуатаційні перехідні режими електродвигунів

Серед перехідних режимів роботи електродвигунів, які відрізняються за своїм характером від номінальних режимів роботи, можна виділити ті, які є для електродвигунів природними експлуатаційними режимами. До них, в першу чергу, відносять пуск, самозапуск та динамічне гальмування. З точки зору релейного захисту необхідно прослідкувати, які параметри цих режимів змінюються і за якими законами проходять зміни. Такий аналіз дозволить забезпечити неспрацювання пристроїв захисту, а також виявити, в яких випадках перехідний процес стає небезпечним для електродвигуна.

Пуск електродвигунів. Динаміка. Основні величини. Основними способами пуску є прямий та реакторний. В першому випадку на електродвигун увімкненням вимикача подається напруга шин, до яких він підключений, а в другому ця напруга подається на пусковий реактор, який вибрано за умовою найбільш сприятливого протікання електромеханічних процесів в електродвигуні та мережі. В останньому випадку за рахунок

падіння напруги від пускових струмів в реакторі напруга на виводах електродвигуна протягом майже всього пуску виявляється зниженою.

Пуск синхронних двигунів відрізняється від пуску асинхронних необхідністю синхронізації синхронного двигуна з мережею. Сучасними пристроями збудження ця операція виконується автоматично.

Загальною для всіх електродвигунів є динаміка пуску, тобто безпосередньо сам процес розгону від нерухомого стану до кінцевої швидкості. Відомо, що усталений тривалий робочий режим електродвигуна характеризується рівністю електромагнітного моменту M_a , який розвивається електродвигуном, і моментом опору M_o механізму. При $M_a > M_o$, відповідно до рівняння

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{над}}}{J} = \frac{M_a - M_o}{J}, \quad (1.8)$$

кутова швидкість ω електродвигуна починає зростати. При асинхронному пуску M_a – асинхронний електромагнітний момент. Величина J характеризує інерційні властивості агрегата (ротор електродвигуна плюс механізм) і має назву його моменту інерції

$$J = GD^2 / 4,$$

де GD^2 – приведений до номінальної кутової швидкості ротора електродвигуна маховий момент механізму і двигуна.

Розв'язування рівняння (1.8) відносно t з урахуванням переходу від іменованих одиниць до відносних дає можливість визначити час пуску двигуна від нерухомого стану до номінальної кутової швидкості $\omega_{\text{ном}}$

$$t_{\text{п}} = \tau_J \int_0^1 \frac{dS}{M_{\text{над}}^*}, \quad (1.9)$$

де $M_{\text{над}}^* = M_{\text{над}}/M_{\text{ном}}$; $S = 1 - \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}$ – ковзання;

$\omega_{\text{ном}}$ – номінальне значення кутової швидкості;

τ_J – час прискорення агрегата, с, який дорівнює часу пуску електродвигуна при $M_{\text{над}}^* = 1$.

Значення τ_J звичайно складає десятки, рідко одиниці, секунд. В практичних розрахунках часу пуску електродвигуна доцільно користуватися спрощеною формулою, яка справедлива при $M_{o^*} = \text{const}$ [16],

$$t_{\text{п}} = \frac{\tau_J}{M_{o^*}} \left[\frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \cdot S_{\phi} \cdot \ln \frac{S_{\phi} - S_y - 0,01}{S_{\phi} - 1} + S_y \cdot \ln 100(1 - S_y) - (1 - S_y) \right],$$

де $b_c = b/M_{0*}$ – кратність максимального моменту (b) відносно моменту опору;

$$S_{\phi} = S_k (b_c + \sqrt{b_c^2 - 1});$$

$$S_y = \frac{S_k}{b_c + \sqrt{b_c^2 - 1}};$$

S_k – критичне ковзання;

$$b = b_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ш}}^2;$$

$b_{\text{ном}}$ – кратність максимального моменту при номінальних напрузі та частоті;

$U_{\text{ш}}$ – напруга на виводах електродвигуна під час пуску, в.о.

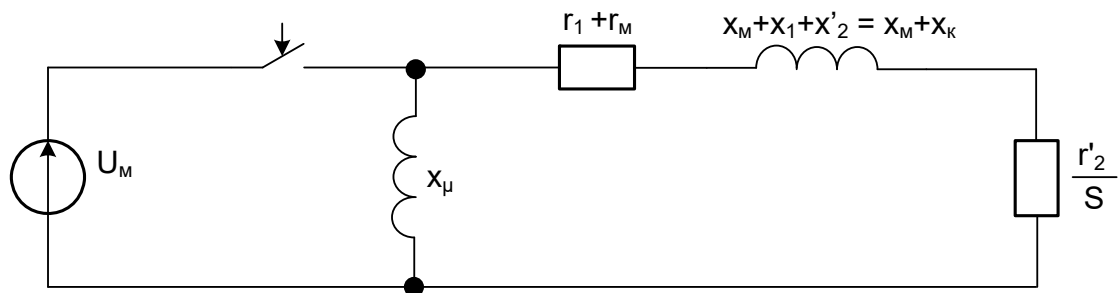
Пуск асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в перший момент, поки частоту обертання ротора можна вважати близькою до нуля, являє собою трансформатор із закороченою вторинною обмоткою. Відповідно до цього струм $i_{\text{п}}$ в первинній обмотці – статорі електродвигуна буде складатися з вимушеної складової $i_{\text{в}}$ та двох вільних (i' та i'') складових

$$i_{\text{п}} = i_{\text{в}} + i' + i''.$$

Складова $i_{\text{в}}$ є гармонічною функцією часу та визначається напругою мережі $U_{\text{м}}$, початковою фазою ввімкнення напруги α та опорамі x_{Σ} і r_{Σ} , які містять в собі активні та реактивні опори мережі (від точки з напругою $U_{\text{м}}$ до виводів АД) та електродвигуна (рис. 1.6).

$$i_{\text{в}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}} \cdot \sin\left(\omega t + \alpha - \arctg \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}\right),$$

де $I_{\text{п}} = U_{\text{м}} / Z_{\Sigma}; \quad Z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2}.$



$r_{\text{м}}, x_{\text{м}}$ – опори мережі; r_1, x_1 – опори обмотки статора; x_{μ} – опір вітки намагнічування; r_2', x_2' – опори кола ротора, які приведені до статора;
 S – ковзання

Рисунок 1.6 – Заступна схема мережі та електродвигуна

Вільні складові – повільно згасаючий струм i' та швидко згасаючий струм i'' – зумовлені взаємним впливом полей ротора та статора. Струм i' пов'язаний з наявністю перехідних поточкозчеплень в обмотці ротора, які з'являються через те, що усталений струм не може виникнути в роторі миттєво. Тому повільно згасаюча складова i' залежить від вільного струму ротора, частоти обертання та параметрів x_{Σ} і r_{Σ} . Загальну залежність $i'(t)$ можна виразити наближеною формулою

$$i' = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\omega_2 \cdot t}{2} + \alpha - \operatorname{arctg} \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau'}},$$

де $\omega_2 = (1-S) \cdot \omega$ – кутова швидкість ротора;

S – ковзання;

τ' – постійна часу згасання струму i' ;

$K = 0,1 \div 0,15$ – коефіцієнт, який дорівнює відношенню амплітуд струмів i' та i .

Постійна часу τ' може бути визначена за формулою $\tau' = 2 \cdot x_{\mu} / r_1$.

Величина τ' складає приблизно $2 \div 3$ с.

В розрахунках найбільших значень пускового струму в колі статора складову i' , внаслідок її малості, можна не враховувати, вважаючи, що

$$i_{\pi} = i_{\nu} + i''.$$

При $i' = 0$ складова i'' , яка згасає з постійною часу T_a , може бути записана у вигляді

$$i'' = -\sqrt{2} \cdot I_{\pi} \cdot \sin\left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}.$$

З достатньо точним наближенням вважається, що $T_a = x_{\Sigma} / r_{\Sigma}$.

На практиці величина T_a для АД напругою вище 1 кВ знаходиться в межах $0,01 \div 0,04$ с. Амплітуда складової i'' дорівнює амплітуді вимушеного струму i_{ν} . Сукупність цих обставин обумовлює те, що крива пускового струму, принаймні в двох фазах з трьох, має чітко виражений максимум. В одній з них, якщо фаза ввімкнення $\alpha=0$ приблизно через півперіоду після ввімкнення буде мати місце найбільше з можливих значень – ударне значення пускового струму

$$i_{\pi.\max} = \sqrt{2} \cdot I_{\pi} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}\right).$$

При середньому значенні $T_a = 0,03$ с значення

$$K_{y \pi} = \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,03}} \right) = 1,7.$$

Найбільше діюче значення пускового струму при цьому складає

$$I_{\pi, \max} = \sqrt{I_{\pi}^2 + (I'')^2} \approx 1,4 \cdot I_{\pi}.$$

В практичних розрахунках періодична складова фазного струму статора може бути визначена як

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\frac{r_2}{S} + jx_k},$$

де x_j – індуктивний опір асинхронного двигуна при пуску. Діюче значення фазного струму при $S=1$ складає

$$I_{\pi} = \frac{U}{\sqrt{(r_2')^2 + x_k^2}}.$$

Враховуючи, що r_2' приблизно на порядок менше x_k , отримуємо

$$I_{\pi} = U/x_k. \quad (1.10)$$

В каталогах на асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором наводиться значення кратності пускового струму при пуску від $U=1$

$$K_{\pi} = I_{\pi} / I_{\text{ном}}, \quad (1.11)$$

тому $I_{\pi} = K_{\pi} \cdot I_{\text{ном}}$, а $x_k = 1 / K_{\pi}$.

Наявність передувімкненого опору призводить до зниження пускового струму. Так, при пуску асинхронного двигуна без увімкненого паралельно будь-якого навантаження та з опором x_m від точки з напругою U_m до лінійних виводів АД

$$I_{\pi} = \frac{U_m}{x_m + x_k} = \frac{U_m}{x_m + 1/K_{\pi}}. \quad (1.12)$$

Наявність увімкненого паралельно з асинхронним двигуном навантаження, якщо відсутні синхронні двигуни, дещо знижує пусковий струм, і тому, з точки зору налаштування релейного захисту

електродвигуна, такий режим не є розрахунковим. Якщо асинхронний двигун пускається від шин, до яких підключені синхронні двигуни, їх потрібно враховувати при визначенні пускового струму. Синхронні двигуни, які мають діюче при пуску асинхронного двигуна форсування збудження, вводяться в розрахункову схему надперехідною ЕРС $E_q'' \approx U_M$ та надперехідним опором x_d'' . При цьому провідності всіх синхронних двигунів складаються одна з одною з провідністю мережі $1/x_{M1}$ до шин, від яких пускається двигун.

Повний опір при пуску, таким чином, складає

$$x_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{di}''} + \frac{1}{x_{M1}}} + \frac{1}{K_{\Pi}}.$$

Значення пускового струму в цьому випадку дорівнює

$$I_{\Pi} = U_M / x_{\Sigma}.$$

Як показано в [16], в процесі пуску опір асинхронного двигуна та струм статора не залишаються незмінними. Зі зменшенням ковзання опори $r_g = R_e Z$ та $x_g = I_m Z$ електродвигуна зростають, причому активний опір після досягнення максимального значення

$$r_{\max} = r_1 + \frac{x_{\mu}^2}{2(x_{\mu} + x_2)},$$

або при $r_1 \approx 0$ $r_{\max} = \frac{x_{\mu}^2}{2(x_{\mu} + x_2)}$ знижується, індуктивний опір продовжує зростати.

Відповідно до такого характеру змінювання опорів струм статора з підвищенням частоти обертання зменшується. Однак це зменшення стає суттєвим тільки при малих ковзаннях.

Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором зазвичай проходить при ввімкнених в коло ротора пускових опорах, значення яких визначаються вимогами до пускових моментних характеристик. В процесі пуску опір кола ротора зменшується ступінчасто так, що перехідний процес, який виникає при цьому, кожний раз призводить до кидків струму статора.

Збільшення, порівняно з короткозамкненим асинхронним двигуном опору кола ротора, призводить до суттєвого зменшення I_{Π} . Діюче значення пускового струму звичайно не перевищує $(2 \div 3)I_{\text{ном}}$.

Постійні часу τ' та T_a в перший момент пуску, коли в коло ротора ввімкнено найбільший опір, стають майже на порядок менші, ніж при пуску електродвигуна з короткозамкненим ротором, а ударний коефіцієнт наближається до значення $K_{уп} = 1$. Цьому відповідає найбільше діюче значення пускового струму $I_{п.мах} = (2 \div 3) \cdot I_{ном}$.

Пуск синхронного електродвигуна. Процес пуску незбудженого синхронного двигуна можна розбити на три етапи [7, 16]:

- перший, який характеризується подачею напруги мережі на обмотку статора при повністю зупиненому роторі;
- другий, який пов'язано зі збільшенням частоти обертання ротора до підсинхронної;
- третій – подача збудження в обмотку збудження.

На першому етапі, поки ротор можна вважати нерухомим, струм статора має, як і при пуску асинхронного двигуна, вимушену періодичну складову та декілька аперіодичних, що зумовлені взаємодією полів, наведених в демпферній обмотці та обмотці збудження полем статора. Аперіодичні складові згасають з різними постійними часу. Взаємний вплив різних експоненціальних процесів і наявність, як правило, пускового опору в колі обмотки збудження призводять до того, що синхронний двигун практично миттєво досягає усталеного періодичного режиму. Найбільший вплив на характер змінювання струму в перший момент пуску має складова i_a , яка згасає з постійною часу $T_a = x_2/r_1$, де x_2 – опір оберненої послідовності синхронного двигуна. Для явнополюсних електродвигунів з демпферними обмотками x_2 приймається рівним надперехідному опору x''_d статора $x_2 = x''_d$, а для турбодвигунів $x_2 = 1,22 \cdot x''_d$. Значення постійної часу T_a для електродвигунів серії СТМ складає приблизно 0,09 с, а для синхронних двигунів серії СТД коливаються від 0,035 до 0,09 с залежно від номінальної потужності та номінальної напруги. Найбільше діюче значення пускового струму при цьому визначається за формулою

$$I_{п.мах} = \sqrt{I_{п.в}^2 + I_a^2} = 1,6 \cdot I_{п}.$$

На другому етапі після згасання складової i_a в процесі подальшого розвороту електродвигуна струм статора являє собою суму двох періодичних функцій [16]

$$i_{п} = i_{п1} + i_{п2}. \quad (1.13)$$

Перша складова

$$i_{п1} = A_1(S) \cdot \cos(\omega t - \varphi), \quad (1.13. a)$$

де φ – початкова фаза, основна. Вона має частоту мережі $f_{\text{ном}}$, а вплив збільшення частоти обертання ротора відбивається тільки на амплітуді $A_1(S)$.

Друга складова

$$i_{\text{п2}} = A_2(S) \cdot \cos[(2S - 1)\omega t + \xi_1], \quad (1.13. б)$$

де ξ_1 – початкова фаза для $i_{\text{п2}}$, яка являє собою гармоніку частоти $|(2S - 1) \cdot \omega|$.

Підсумкова дія обох складових зумовлює коливання струму статора з подвійною частотою ковзання

$$f_s = 2 \cdot S \cdot f_{\text{ном}},$$

Або, при $f_{\text{ном}} = 50$ Гц, $f_s = 100 \cdot S = S\%$.

Під час пуску, поки присутнє ковзання S , в обмотці збудження протікає струм частоти $f_f = S \cdot f_{\text{ном}}$. Для забезпечення протікання цього струму в безщіткових системах збудження (див. рис. 1.4) є захисне коло, яке складається з тиристорів VD1 та VD2 і резисторів R1÷R3. Тиристиори відкриваються наведеною при пуску напругою. Таким чином, протягом одного півперіоду змінної напруги в колі збудження ЕД обмотка збудження замкнена накоротко через обертовий випрямлювальний місток, а протягом другого – через тиристиори на паралельно з'єднані резистори R2 та R3.

Окрім вказаних струмів в колах статора та обмотки збудження при обертанні ротора з ковзанням S в демпферній обмотці також з'являється струм, який при $S \approx 1$ суттєво більший струму в обмотці збудження. Тому при тривалих та частих пусках є небезпека перегріву демпферної обмотки.

Після розгону синхронного двигуна до підсинхронної швидкості при $S = 1 \div 5\%$ схемою автоматичного пуску здійснюється підключення обмотки збудження до джерела постійної (випрямленої) напруги. Відбувається відкриття тиристорів в тиристорних пристроях збудження (див. рис. 1.5) та закриття тиристорів з наступним увімкненням контактора КМ в безщіткових пристроях збудження (див. рис. 1.4).

Таким чином починається наступна фаза пуску: втягування в синхронізм. На цьому етапі, завдяки наведенню в статорі ЕРС з частотою $(1-S)f_{\text{ном}}$, в струмі статора з'являється ще одна складова

$$i_{\text{п3}} = -\frac{E_q}{X_d} \cdot \cos[(1 - S)\omega t + \xi_2], \quad (1.14)$$

де ξ_2 – початкова фаза для $i_{\text{п3}}$;
 E_q – ЕРС двигуна по поперечній осі;
 X_d – опір двигуна по поздовжній осі.

Проведення практичних розрахунків пускового струму за формулами (1.13) та (1.14) важко. Експериментальним даним добре відповідають розрахунки, які виконані для початкового етапу пуску без врахування активних опорів електродвигунів та мережі. В цьому випадку для пуску одиничного електродвигуна від шин з незмінною фазною напругою U

$$I_{\Pi} = U/x_{\text{д}}, \quad (1.15)$$

де $x_{\text{д}} = x_{\text{м}} + \frac{x_{\text{д}}'' + x_{\text{q}}''}{2};$

$x_{\text{м}}$ – опір від точки з напругою U до лінійних виводів обмотки статора;

$x_{\text{д}}''$ та x_{q}'' – надперехідні опори електродвигуна по поздовжній та поперечній осях відповідно.

За наявності вже підключених до шин синхронних двигунів, які чинять вплив на струм в синхронному двигуні, що запускається, пусковий струм визначається за (1.15) з урахуванням

$$x_{\text{д}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{\text{д}i}''} + \frac{1}{x_{\text{м}}}} + x_{\text{д}}''. \quad (1.16)$$

Як і у випадку асинхронних двигунів, опір синхронних двигунів, який вимірюється зі сторони його лінійних виводів, в процесі пуску збільшується. Залежність $Z_{\text{д}}$ від ковзання можна знайти за допомогою годографів індуктивних опорів $x_{\text{д}}$ та x_{q} , які відображають достатньо складний зв'язок $x_{\text{д}}$ і x_{q} з ковзанням S . Менш точно залежність $Z_{\text{д}}(S)$ виявляється узагальненими кривими, які отримані дослідним шляхом. З достатньою для практичних розрахунків точністю вважають, що

$$Z_{\text{д}}(S) = x_{\text{д}}(S).$$

Самозапуск електродвигунів. Важливим експлуатаційним перехідним режимом, який забезпечує безперервність технологічного процесу, є самозапуск електродвигунів [7, 15, 16] – режим, за якого двигуни, що не зупинилися при значному зниженні напруги або в результаті короткочасного відключення джерела електропостачання, не відключаються від мережі, а при відновленні живлення розгортаються знову до номінальної частоти обертання. Власне самозапуском є друга стадія процесу – розгін електродвигуна, якому передує перша – режим втрати живлення.

Якщо перша стадія, під час якої здійснюється вибіг електродвигуна, є ненормальним режимом, на який мають реагувати пристрої релейного захисту (РЗ), то друга, яка стосується тільки електродвигунів, які самозапускаються, є для них передбаченим експлуатаційним режимом, для задовільного завершення якого потрібна бездіяльність РЗ. Тому розглянемо змінювання електричних параметрів в режимі розгону, який починається безпосередньо після подавання напруги мережі на електродвигуни, які втратили живлення, в той момент, коли кожен з двигунів має кутову швидкість ротора $(1 - S_i) \cdot \omega$ та ЕРС E_i , причому $E_i = -K_{E_i} \cdot U_m$, де $0 \leq K_{E_i} \leq 1$ – коефіцієнт, що враховує зменшення ЕРС електродвигуна в процесі вибігу та зниження напруги. В більшості випадків самозапуск починається з несинхронного ввімкнення – короткочасного перехідного процесу, який складається в підключенні електродвигуна з непогашеним полем до джерела електропостачання при зсуві фаз між E_i та U_m , який відрізняється від нуля. Значення струмів та моментів, які при цьому виникають, можуть перевищувати номінальні та являти собою небезпеку для електродвигуна.

Несинхронне ввімкнення потрібно розглядати тільки для електродвигунів, які самозапускаються. Максимальне значення струму несинхронного ввімкнення, який протікає в обмотці статора двигуна, буде мати місце при куті зсуву фаз між E_i та U_m 180° (рис. 1.7)

$$I_{\text{нс}} = \frac{U_m (X_{\text{сд}} + X_{\text{ад}}) + E_{\text{ад}} \cdot X_{\text{сд}} + E_{\text{сд}} \cdot X_{\text{ад}}}{X_m \cdot X_{\text{сд}} + X_m \cdot X_{\text{ад}} + X_{\text{сд}} \cdot X_{\text{ад}}}. \quad (1.17)$$

З (1.17) можна зробити висновок, що значення струму несинхронного ввімкнення $I_{\text{нс}}$ визначається значеннями ЕРС та опорів відносно моменту ввімкнення джерела електропостачання. В розрахунках опори асинхронних двигунів приймаються рівними x_k , а синхронних двигунів – рівними $(x_d'' + x_q'')/2 \approx x_d''$. ЕРС електродвигунів мають відповідати режиму, який безпосередньо передував увімкненню.

За розрахункове значення струму $I_{\text{нсi}}$ зазвичай приймається струм, який виникає після перерви в електропостачанні, оскільки струм несинхронного ввімкнення після вимикання зовнішнього короткого замикання менший і, як правило, не є небезпечним для електродвигунів.

У тих випадках, коли асинхронних двигунів немає або ними можна нехтувати, формула (1.17) суттєво спрощується

$$I_{\text{нс}} = \frac{U_m + E_{\text{сд}}}{X_{\text{сд}} + X_m}.$$

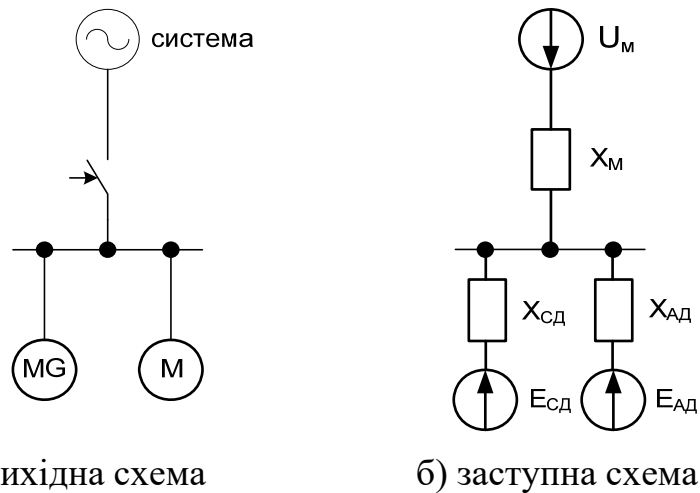


Рисунок 1.7 – Визначення струму несинхронного увімкнення

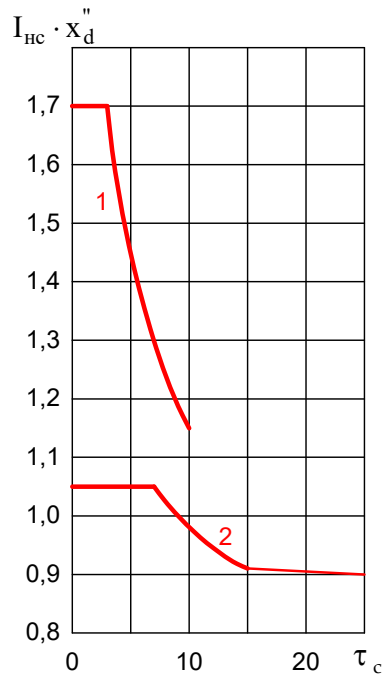
Під час визначення $E_{CД}$, виходячи з попереднього режиму втрати живлення, потрібно мати на увазі нижченаведене. Якщо потужність асинхронних двигунів перевищує 50% потужності всіх електродвигунів, які беруть участь в самозапуску, а перерва в живленні складає більше 2÷3 с, то через лавину напруги, яка виникає, можна вважати $E_{CД} = 0$. Аналогічно потрібно вчиняти й у випадку, коли потужність асинхронних двигунів: $P_{AД} \geq (\Sigma P_{AД} + \Sigma P_{CД}) \cdot 0,2$, а втрата живлення пов'язана з трифазним КЗ. Потрібно також враховувати, що при виникненні режиму втрати живлення сучасними схемами захисту та автоматики передбачається розбудження синхронних двигунів. У кожному з синхронному двигуні буде протікати струм

$$I_{nci} = I_{nc} \cdot X_{CД} / X_{di}''$$

Зрозуміло, що чим більше електродвигунів одночасно підключаються до мережі, тим менше значення струму I_{nci} . Тому при визначенні I_{nci} потрібно виходити з найменшої реальної кількості електродвигунів, які самозапускаються. Граничне значення струму статора синхронного двигуна, при якому несинхронне ввімкнення є допустимим з точки зору динамічного впливу на обмотки та валопровід, визначається залежно від результуючої постійної часу кола статора τ_c за умови

$$I_{ncгр} = \frac{[I_{nc} \cdot X_d'']_{доп} \cdot (\tau_c)}{X_{di}''},$$

де $[I_{nc} \cdot X_d'']_{доп} \cdot (\tau_c)$ знаходиться за допомогою рис. 1.8 для відповідного значення τ_c .



- 1 – для синхронних двигунів, які допускають пуск від повної напруги та номінальної потужності $P_{ном} \leq 2000$ кВт;
 2 – для синхронних двигунів, які не допускають пуск від повної напруги та номінальної потужності $P_{ном} > 2000$ кВт

Рисунок 1.8 – Криві допустимої кратності несинхронного ввімкнення

Після закінчення перехідного режиму несинхронного ввімкнення самозапуск електродвигунів продовжується при менших струмах статора, однак таких, що перевищують номінальні значення. Для знаходження струмів, які протікають в кожному електродвигуні при самозапуску, та початкового рівня напруги допустимо користуватися спрощеною заступною схемою, в якій всі двигуни, що самозапускаються, зображені реактивними опорами $x_i(S)$, що відповідають ковзанню, яке кожний з них має до моменту підключення джерела електропостачання. Періодична складова струму самозапуску розраховується як початкове діюче значення періодичної складової струму системи електропостачання при трифазному КЗ за загальним опором усіх електродвигунів

$$I_c = \frac{1,05 \cdot U_{ф.ном}}{x_c + x_{\Sigma d}}. \quad (1.18)$$

Напруга на загальних шинах при цьому $U_{ш.м} = I_c \cdot x_{\Sigma d}$, а струм в кожному електродвигуні $I_i = U_{ш.м} / x_i$.

Розгін двигуна від деякої початкової кутової швидкості $\omega_{1*} = 1 - S_1$, яку має ротор на початок самозапуску, до нормальної $\omega_{y*} = 1 - S_y$ відбувається

під дією надлишкового моменту $M_{\text{над}} = M_a(S, U_{\text{ш.м}}) - M_O$, де $M_a(S, U_{\text{ш.м}})$ – асинхронний електромагнітний момент електродвигуна, який відповідає напрузі $U_{\text{ш.м}}$ на його виводах та ковзанню S в даний момент часу.

Рівняння руху у відносних одиницях можна навести у вигляді

$$M_{\text{над}*} = -\tau_J \cdot \frac{dS}{dt}. \quad (1.19)$$

Рішення (1.19) відносно t дає

$$t_c = -\tau_J \int_{S_1}^{S_y} \frac{dS}{M_{\text{над}*}}. \quad (1.20)$$

Приймаючи $M_O = \text{const}$, $U_{\text{ш.м}} = \text{const} = I_c \cdot x_{\Sigma d}$, а $M_{a*} = \frac{2b}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}$, де

$b = b_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ш.м}}^2$, можна грубо оцінити час, протягом якого буде продовжуватися самозапуск [16],

$$t_{\text{сзп}} = \frac{\tau_J}{M_{O*}} \left\{ \frac{b_c}{\sqrt{b_c^2 - 1}} \cdot \left[S_\phi \ln \frac{S_\phi - S_y - 0,01}{S_\phi - S_1} + S_y \cdot \ln 100(S_1 - S_y) \right] - (S_1 - S_y - 0,01) \right\}, \quad (1.21)$$

де $b_c = b/M_{c*} = b_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ш.с}}^2 / M_{c*}$.

У зв'язку з тим, що зі зменшенням ковзання ні $M(S, U_{\text{ш.с}})$, ні $U_{\text{ш.с}}$ не залишаються постійними, а $M_{\text{над}*}$ зростає, час самозапуску буде меншим $t_{\text{сзп}}$, що розраховано за (1.21). Рішення (1.20) для отримання уточненого значення $t_{\text{сзп}}$ доцільно вести методом послідовних інтервалів [15].

Динамічне гальмування. Динамічне, тобто прискорене, гальмування синхронних двигунів застосовується, наприклад, у тих випадках, коли в силу великої інерції приводного механізму вибіг синхронного двигуна під час вимикання продовжується настільки тривало, що такий час зупинки стає неприпустимим за умовами технологічного процесу. Цей режим здійснюється вимиканням обмотки статора від мережі та ввімкненням його на з'єднанні в зірку потужні активні опори (опори динамічного гальмування) при збереженні живлення обмотки збудження. Тим самим синхронний двигун практично переводиться в режим зовнішнього короткого замикання, в якому він, працюючи генератором, розвиває гальмівний момент. Ефективність гальмування виявляється високою, коли струм збудження подається від джерела, яке не пов'язано з валом синхронного двигуна (наприклад, від ТПЗ). Струм, який протікає в колі

статора, як правило, перевищує номінальний і тому враховується при виконанні релейного захисту синхронного двигуна.

Найбільше діюче значення струму динамічного гальмування можна знайти за формулою

$$I_{д.г,маx} = \frac{E_q \cdot \sqrt{R_{с*}^2 + X_q^2}}{R_{с*}^2 + X_q \cdot X_d} \cdot I_{ном}, \quad (1.22)$$

де E_q – ЕРС електродвигуна по поперечній осі, яка визначається за характеристикою холостого ходу при струмі збудження, який відповідає режиму динамічного гальмування, приймається рівною 1,2;

$R_{с*}$ – відносне значення активного опору кола динамічного гальмування, приймається рівним 0,4;

X_q, X_d – синхронні індуктивні опори електродвигуна, відповідно, по поперечній та повздовжній осях;

$I_{ном}$ – номінальний струм електродвигуна.

2 ПОШКОДЖЕННЯ ТА НЕНОРМАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1 Аналіз пошкодженості високовольтних електродвигунів

Щорічно на електродвигуни припадає 25÷30% загальної кількості пошкоджень електрообладнання високої напруги. Механічні пошкодження звичайно складають не більше 5÷15% загальної кількості несправностей двигунів, причому значна їх частина стосується електродвигунів, які працюють з різкозмінним навантаженням на валові, в умовах підвищеної вібрації та тряски, при низьких температурах.

Основним же видом несправності є електричні пошкодження, які пов'язані з порушенням ізоляції обмоток статора і ротора. Найчастіше, у 80÷95% випадків, несправною виявляється обмотка статора, причому біля 70% електричних ушкоджень припадає на пазову та лобову частини обмотки, а інші 25÷30% складають перекриття та пробої ізоляції в коробках вводів [3, 8].

В таблиці 2.1, яка складена за результатами обробки статистичних даних про ушкодження статорів електродвигунів на промислових підприємствах, дається уявлення про найбільш розповсюджені дефекти ізоляції, причини їх виникнення, прояву та розвитку в той або інший вид замикання.

Близько чверті дефектів ізоляції з'являється з причин незадовільно виконаного ремонту електродвигунів; 20÷25% викликано неякісним виготовленням та монтажем. Більше половини (55÷58%) «слабких місць» виникає в ізоляції через несприятливі умови, в яких працюють електродвигуни.

Електричний вплив на ізоляцію обмотки статора виявляється у вигляді різного роду перенапруг. Найбільшу небезпеку створюють внутрішні перенапруги, які виникають при дугових замиканнях на землю та резонансні явища в мережі, до якої підключено електродвигуни, а також при відключенні асинхронних двигунів невеликої потужності.

Негативний вплив перенапруг, які пов'язані з операціями ввімкнення–вимкнення електродвигунів, виявляється часто в зв'язку з підвищенням частоти спрацювань комутаційних апаратів (вимикачів та контакторів) в сучасних технологічних установках. Розрізняють два види небезпечних перенапруг при відключенні електродвигунів: середньочастотні та хвильові.

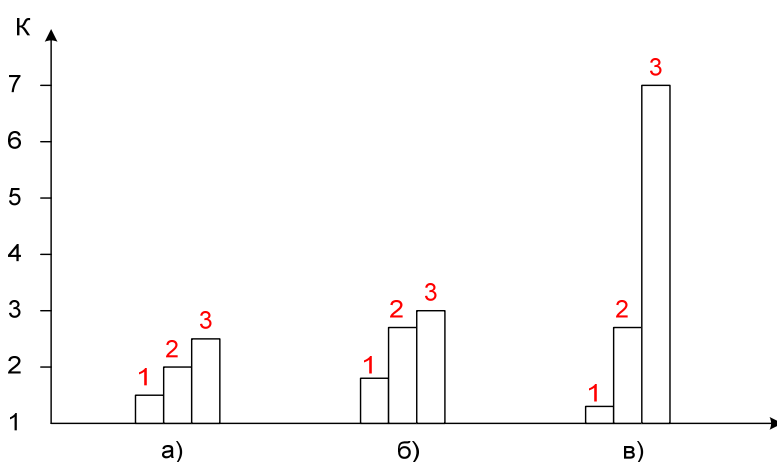
Таблиця 2.1 – Дані про пошкодження статорів електродвигунів на промислових підприємствах

Причина несправності	Супутні обставини	Причини порушення ізоляції	Вид дефекту ізоляції	Прояв дефекту та місце пошкодження	Вид електричного пошкодження
<p>Порушення жорсткості кріплення обмотки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – лобових частин – секцій (пазовими клинами) – виводів 	<p>Часті пуски, вібрація, часті динамічні перевантаження на валу та динамічні навантаження на ізоляцію</p> <p>–</p> <p>Вібрація, наявність вологи, бруду, хімічних відходів та струмопровідного пилу в коробці виводів</p> <p>–</p>	<p>Вібрація лобових частин</p> <p>Вібрація стержня обмотки</p> <p>Наближення виводу до корпусу або торкання виводом обмотки корпусу</p> <p>Торкання виводом обмотки інших виводів або наближення до них</p>	<p>Перетертя</p> <p>Перетертя</p> <p>Зменшення ізоляційного проміжку</p> <p>Зменшення ізоляційного проміжку</p>	<p>Пробої ізоляції на бандажне кільце або на корпус при виході з пазу</p> <p>Пробої ізоляції на корпус в пазу або при виході з пазу</p> <p>Перекриття ізоляції по повітрю на корпус в коробці виводів</p> <p>Перекриття ізоляції по повітрю між фазами в коробці виводів</p>	<p>$K_B^{(1)}, K_3^{(1)}$</p> <p>$K_3^{(1)}$</p> <p>$K_3^{(1)}$</p> <p>$K^{(2)}, K^{(3)}$</p>
<p>Незадовільне кріплення наконечників кабеля живлення та виводів обмотки</p>	<p>Вібрація</p>	<p>Перегрів контактного з'єднання, відгорання виводів, виникнення дуги між наконечником та виводом обмотки</p>	<p>Іонізація ізоляційних проміжків</p>	<p>Перекриття ізоляції по повітрю між фазами в коробці виводів</p>	<p>$K^{(2)}, K^{(3)}$</p>

Продовження таблиці 2.1

Причина несправності	Супутні обставини	Причини порушення ізоляції	Вид дефекту ізоляції	Прояв дефекту та місце пошкодження	Вид електричного пошкодження
Потрапляння в зазор або між лобовими частинами статора та ротора стороннього предмета	–	Механічний вплив стороннього предмета	Перетертя	Багаточисельні пробої ізоляції на корпус. Перекриття ізоляції по повітрю	$K_3^{(1)}$, $K_3^{(2)}$
Тривале перебування вологи в корпусі двигуна	Наявність мілких дефектів ізоляції	Зволоження ізоляції та деталей кріплення	Зниження опору	Перекриття між стержнями різних фаз. Пробій ізоляції на корпус	$K^{(2)}$, $K_3^{(1)}$
Неякісне виготовлення або укладка обмотки	Наявність вологи, забруднень; вібрація, динамічні навантаження на ізоляцію	Вплив згинальних зусиль	Тріщини	Пробій ізоляції на корпус в пазу або при виході з пазу	$K_3^{(1)}$
Часті та тривалі перевантаження	Динамічні навантаження на ізоляцію	Теплове старіння	Розшарування	Пробій ізоляції на корпус в пазу або при виході з пазу	$K_3^{(1)}$
Дефект активної сталі	Вібрація та динамічні навантаження на ізоляцію	Місцевий перегрів	Розшарування	Пробій ізоляції на корпус при виході з пазу	$K_3^{(1)}$
	Вібрація	Механічний вплив уламків активної сталі	Перетертя	Пробій ізоляції на корпус при виході з пазу	$K_3^{(1)}$

Перші пов'язані з перехідним процесом (частота якого лежить в діапазоні $1 \div 10$ кГц), який виникає через обрив в комутаційному апараті індуктивного струму до його природного переходу через нульове значення. Ці перенапруги мають квазістаціонарний характер; всі точки ізоляції обмотки виявляються під впливом напруги, яка в K разів більша, ніж в робочому режимі. Значення K суттєво залежить не тільки від типу комутаційного апарата та способу гасіння в ньому дуги, але й від довжини кабелю, яким двигун підключено до цього апарата, від моменту комутації, а також від номінальної напруги, потужності і режиму роботи електродвигуна. Найбільше значення перенапруги мають місце при зрізанні струму двигуна (що розгортається чи гальмується) невеликої потужності (до 1000 кВт), який підключено до комутаційного апарата кабелем малої довжини (рис. 2.1).



а) холостий хід; б) повне завантаження; в) початковий період пуску;
 $1 \div 3$ – різні способи гасіння

Рисунок 2.1 – Характеристики перенапруг, які виникають в результаті зрізання струму при вимиканні асинхронного двигуна ($P_{\text{ном}} = 210$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; довжина кабелю 350 м):

Під час випробувань електродвигунів номінальною напругою 3 кВ та 6 кВ були зареєстровані семикратні (відносно фазної напруги) перенапруги між початком обмотки статора та корпусом двигуна, а при $U_{\text{ном}} = 6$ кВ значення напруги досягало 34 кВ.

У тих же дослідах було відмічено підвищення міжвиткової напруги також приблизно в сім разів порівняно зі значенням цієї напруги в нормальному режимі. Однак електрична міцність ізоляції провідників достатня для того, щоб витримувати такі напруги. Тому основній небезпеці піддається ізоляція обмотки статора відносно корпусу. За даними експлуатації частка пошкодженої ізоляції при відключеннях електродвигунів під час пуску складає приблизно 16%, з них 2% при вимиканні загальмованих електродвигунів.

Хвильові перенапруги ударного характеру викликаються повторними запалюваннями електричної дуги в комутаційному апараті в процесі вимикання електродвигуна. Ступінь їх впливу на ізоляцію обмотки статора залежить від амплітуди та початкової форми фронту хвилі. Хвилі з крутими фронтами призводять до великих, в окремих випадках до 5-кратних, перенапруг. З віддаленням від початку обмотки крутизна та амплітуда ударної хвилі знижуються, так що вхідні котушки знаходяться під впливом найбільшої напруги. Якщо при стаціонарному розподіленні напруги на кожен котушку припадає тільки біля 6% прикладеної в нормальному режимі, то при впливі хвильових перенапруг на першу котушку припадає більше 50% значення ударної напруги. При тривалості фронту $\tau_f \approx 1$ мкс розподілення напруги по витках першої котушки майже рівномірне, а при більш крутих фронтах найбільше значення напруг припадає не тільки на перші витки, але й на внутрішню частину котушки. Ударні хвилі з коротким фронтом являють собою виключно високе навантаження для виткової та провідникової ізоляції вхідної котушки, яка перевищує в багато разів те, яка має місце в нормальному режимі.

Ізоляція електродвигунів підлягає також впливу перенапруг, які виникають при замиканнях на землю в мережі. Значення перенапруг залежить від того, ізольована нейтраль мережі або заземлена через дугогасильний реактор, від ступеня неналаштованості компенсації ємнісних струмів замикання на землю, характеру замикання (дугове або металеве), а також значення струму замикання на землю. В мережах з ізольованою або компенсованою нейтраллю, але неналаштованою більше ніж на 5%, перенапруги на непошкоджених фазах можуть перевищувати $2,75U_\phi$, а при резонансних налаштуваннях та близьких до них складають біля $2,5U_\phi$. У окремих випадках перенапруги можуть сягати значень порядку $3U_\phi$, однак імовірність їх невелика і складає всього 0,5%.

Перенапруги на нейтралі при дугових замиканнях на землю можуть виявитися двократними відносно фазної напруги.

Сполучення нелінійних ферорезонансних коливань з повторними запалюваннями заземлювальних дуг зумовлює появу перенапруг на фазах $2,75U_\phi$, тобто на рівні випробувальної напруги ізоляції двигунів при капітальному ремонті, при цьому імовірність таких перенапруг досягає 10%.

2.2 Однофазні замикання на землю (корпус)

Більшість пошкоджень ізоляції обмотки статора призводить до замикання однієї з фаз на корпус електродвигуна, який заземлено з метою безпеки персоналу. З таблиці 2.1 видно, що існують такі шляхи, які ведуть від пошкоджень ізоляції до однофазного замикання на корпус. Перший пов'язаний з поступовим погіршенням ізоляції (наприклад, через тертя), яке продовжується до тих пір, поки під впливом нормальної робочої

напруги не настає пробій. Сюди можуть бути віднесені замикання на корпус, які виникають при дії нормальної напруги в місцях виходу провідників з послабленою ізоляцією з пазу, або в коробці виводів, коли через вібрації стержень або вивід обмотки виявляється в безпосередній близькості або прямо торкається заземлених частин статора. Другий шлях – пробій в результаті комутаційних або інших перенапруг ізоляції, яка хоч і має незначні дефекти, але задовільно працює в нормальному робочому режимі.

Ступінь небезпеки замикання на корпус оцінюють за об'ємом виплавленої активної сталі статора, можливості швидкого усунення пошкодження простими засобами, імовірності та часу переходу однофазного замикання в інші, більш важкі види пошкоджень, наприклад, виткові або багатофазні КЗ. Ці фактори залежать від характеру протікання процесу, який, у свою чергу, визначається місцем розташування замикання, видом пробою, властивостями ізоляції, значенням і тривалістю протікання струму в місці пошкодження, наявністю та налаштуванням пристрою компенсації ємнісного струму – дугогасильних реакторів.

Як правило, замикання фази на корпус здійснюється через дугу. На першому етапі свого існування воно є переміжним, тобто має характер пробоїв ізоляції, що настають один за одним, які супроводжуються більш або менш тривалим горінням заземлювальної дуги. Залежно від місця, де виникло замикання, горіння дуги відбувається або у вузькому каналі, що проходить усередині ізоляційного покриття провідників обмотки, або в повітрі. Перше звичайно має місце при замиканні на корпус провідників фази усередині паза статора. Процес супроводжується випаровуванням та розкладанням складових ізоляційного матеріалу, виділенням деіонізуючих газів. Чим більший струм замикання на корпус, тим більш значуще руйнування ізоляції та електродів (мідь, сталь) в місці пошкодження. Пошкодження дуги спочатку виникає при кожному переході струму в дузі через нуль або близько до цього моменту, а потім, з розігрівом електродів, при третьому та четвертому переходах через нуль. При обриві дуги може відбутися заплавлення провідного каналу. Особливо це характерно для ізоляції на основі компаунда. Якщо місце навколо пошкодження не забруднено продуктами горіння дуги, то ізоляційна міцність проміжку фаза–корпус може виявитися достатньою для запобігання наступного пробою. Проведені дослідження дають підставу вважати, що таке самоусунення замикання виникає при струмах в дузі, які не перевищують 10 А протягом перших 0,2 с після виникнення. Потім імовірність самоусунення замикання стає низькою, зокрема, через розігрів електродів.

В мережах з ізолюваною нейтраллю на пошкодженій фазі повторні запалювання дуги можуть повторюватися кожний півперіод промислової частоти, а в мережах з компенсацією ємнісного струму – замикання на землю, особливо при близькому до резонансного налаштування дугогасильних реакторів, повторні запалювання в каналі якщо і

виникають, то дуже рідко – через $5 \div 10$ півперіодів і більше. З погіршенням ізоляційних властивостей каналу інтервали між повторними запалюваннями скорочуються, і дуга починає горіти стійко (безперервно). При цьому, оскільки дуга горить в закритому каналі, тиск газів в ньому різко зростає і, зазвичай, виникає вибух, який супроводжується викидом іскор. Потім, завдяки появі в провідному каналі значної кількості міді та сталі, дугове замикання може перейти в металеве.

Замикання на корпус при виході провідників з пазу, в лобових частинах і в коробці виводів обмотки статора мають дуговий характер. Якщо при замиканнях в пазу статора довжина дуги практично не змінюється, то тут дуга може розтягуватися тепловими та повітряними потоками. Простір, який охоплює дугу, швидко іонізується. Дуга може перекинутися на відстані, які в багато разів перевищують довжину повітряного проміжку, що пробивається, пошкодити ізоляцію інших частин обмотки статора та призвести до виткового або міжфазного коротких замикань. Горіння дуги в коробці виводів, як правило, закінчується (якщо своєчасно не відключити двигун) міжфазним або однофазним КЗ нейтралі. Час безперервного існування дугового замикання, незалежно від способу заземлення нейтралі, може досягати декількох хвилин.

Небезпека для електродвигуна струму замикання на землю оцінюється об'ємом пошкодження активної сталі статора та можливістю усунення його простими засобами, наприклад, без перешихтування. Прийнято вважати небезпечним для електродвигунів струм, який більше або рівний 5 А. При менших значеннях струму виплавляння заліза за час $0,4 \div 4$ с малоймовірно.

Разом з тим тривале (порядку $30 \div 40$ хв і більше) протікання в місці замикання струмів, навіть суттєво менших $4 \div 5$ А, викликає значний місцевий розігрів, обвуглювання та руйнування ізоляції, що може призвести до переходу однофазного замикання на корпус у виткове замикання провідників, які знаходяться в тому ж пазу, що і пошкоджений стержень.

Перехідний процес замикання на корпус в обмотці статора зазвичай поділяють на дві стадії. Перша полягає в розгляді ємностей пошкодженої фази електродвигуна і мережі на землю і перезарядженні ємностей між непошкодженими фазами та їх ємностей відносно землі. Частота хвильових коливань при замиканнях на корпус поблизу лінійного виводу фазної обмотки коливається від 1 МГц до $3 \div 5$ кГц. З переміщенням точки замикання в середину обмотки частота розрядних коливань суттєво знижується і визначається вже не стільки хвильовими параметрами мережі, скільки значеннями ємності та індуктивності пошкодженої фази. Час згасання цієї стадії процесу складає декілька мікросекунд. Друга – середньочастотна стадія, яка протікає з власною частотою процесу $500 \div 3000$ Гц, охоплює дозарядження ємностей непошкоджених фаз та

компенсацію усталеної складової струму замикання на землю. Час існування цих процесів – декілька мікросекунд.

Наявність дугогасильного реактора ніяк не відображається на характері перехідного процесу.

Особливості процесів, які відбуваються при замиканнях на землю, та мають враховуватися при виконанні захисту електродвигунів [1, 7, 16]:

1. Амплітуди струмів перехідного процесу, які протікають по всіх елементах мережі та обмотках електродвигунів, суттєво залежать від моменту пробією ізоляції. Замикання, які збігаються за часом з максимумом напруги пошкодженої фази, супроводжуються максимальними кидками струму, на один–два порядки вищі амплітуди усталеного струму. Найменші перехідні струми мають місце при настанні пробією в момент близької до нуля напруги пошкодженої фази та мінімум в 1,5 раза перевищують амплітуду усталеного струму замикання на корпус;
2. Найбільший кидок струму має місце на пошкодженому приєднанні. Амплітуди перехідних струмів в непошкоджених приєднаннях пропорційні ємностям їх фаз відносно землі;
3. Крива струму дугового замикання на землю в усталеному режимі має вищі гармоніки;
4. Знаки перших півхвиль розрядних струмів на пошкодженому та непошкодженому приєднаннях протилежні;
5. В першому півперіоді перехідного процесу півхвилі струму в пошкодженому приєднанні та напруги $3U_0$ збігаються, а в непошкодженому приєднанні – ні.

2.3 Багатофазні та виткові короткі замикання в обмотці статора

До багатофазних коротких замикань відносять замикання між двома та трьома фазами обмотки статора та подвійні замикання на землю, коли одне замикання виникло в фазній обмотці статора, а друге – в іншій фазі або електродвигуна, або мережі, до якої він підключений. Виткові замикання охоплюють один або декілька витків однієї фази. Міжфазні та виткові пошкодження зустрічаються досить рідко, і якщо вони не пов'язані з пошкодженнями ізоляції стороннім предметом (внаслідок тертя), то, як правило, є результатом розвитку замикання на корпус, місцевих перегрівів ізоляції, дефектів активної сталі статора або наслідком пробією фази статора на корпус. Подвійне замикання звичайно виникає при вже існуючому замиканні на землю в мережі, при цьому другий пробій часто виникає в коробці виводів або на перших витках обмотки.

Багатофазні КЗ можуть мати місце і на виводах статорної обмотки, і всередині електродвигуна, а виткові КЗ тільки в корпусі електродвигуна. Внутрішні короткі замикання можна поділити на дві групи: трифазні КЗ з однаковим числом короткозамкнених витків в кожній фазі (симетричні КЗ)

та несиметричні КЗ з неоднаковим числом короткозамкнених витків в кожній фазі. До другої групи відносять замикання всіх або частини витків однієї фази, трифазні та двофазні короткі замикання з неоднаковим числом короткозамкнених витків у фазах.

Небезпека внутрішніх коротких замикань в тому, що струми в місці пошкодження багатократно перевищують струми в обмотці статора при пошкодженні на лінійних виводах. В синхронних двигунах під час багатофазних коротких замикань усередині обмотки в двох утворених контурах струми направлені зустрічно. При цьому струми в стержнях фазної обмотки, які лежать в одному пазу, можуть мати різний напрямок, внаслідок чого знижуються взаємні індуктивності. Струми КЗ можуть викликати зусилля, які призводять до пошкодження пазових клинів і деформації обмотки. Потужна дуга, яка виникає на місці короткого замикання, зазвичай призводить до пожежі в електродвигуні, що знищує значну частину обмотки статора, а якщо коротке замикання виникло в пазовій частині обмотки – виплавляє великі об'єми активної сталі. Окрім руйнувань дугою при багатофазних КЗ можуть мати місце суттєві деформації обмотки статора, особливо її лобових частин, через значні механічні зусилля, які зумовлені дією ударного струму. При інших рівних умовах об'єм пошкоджень синхронного двигуна з непогашеним полем завжди більший, ніж асинхронного або синхронного без збудження. Наслідки багатофазних коротких замикань настільки важкі, що ремонт електродвигуна зазвичай не проводиться без перешихтування осердя статора та заміни частини, а іноді і всієї обмотки статора.

Багатофазні КЗ, які виникають поблизу лінійних виводів статорної обмотки, викликають також різке зниження напруги на затискачах усіх електроприймачів, які безпосередньо пов'язані зі збірними шинами, від яких живиться пошкоджений електродвигун, і значні (через різке зростання струмів в обмотках) динамічні зусилля на лобові та пазові частини обмоток статора непошкоджених електричних машин.

Релейний захист електродвигунів має з достатньою чутливістю і швидкодією реагувати на внутрішні пошкодження. Оскільки, зазвичай, захист реагує на параметри струму, який підводиться, то потрібно мати надійні методи розрахунку струмів в електричних двигунах, значень симетричних складових струмів залежно від місця та виду короткого замикання, опору живлячої системи та перехідного опору в місці КЗ, параметрів двигуна тощо [4, 8, 13]. Отримані значення струмів дають можливість провести аналіз різних принципів виконання пристроїв РЗ двигунів та визначити їх уставки і час спрацювання [2, 5].

Найпростіше розраховується струм міжфазного (дво- та трифазного) короткого замикання на лінійних виводах обмотки статора. Зі сторони джерела – системи електропостачання – до точки КЗ проходить струм, який зумовлений ЕРС системи та опором між ЕРС і виводами електродвигуна. При визначенні початкового значення періодичної

складової струму короткого замикання надперехідну ЕРС системи приймають рівною $1,05U_{\text{ном}}$. Враховуючи, що значення струму на виводах обмотки потрібно для оцінювання чутливості захисту від багатозафазних КЗ, режим системи живлення та мережі приймається таким, який забезпечує протікання в місці встановлення захисту мінімально можливого струму. Для схеми електропостачання, яка наведена на рис. 2.2, опори заступної схеми зручно виразити в іменованих одиницях нижченаведеними формулами [1, 7, 8]:

– для системи, Ом

$$X_c = U_{\text{ср.ном}}^2 / S_{\text{к.мін}}$$

де $U_{\text{ср.ном}}$ – середня номінальна напруга сторони високої напруги (ВН) силового трансформатора Т, кВ;

$S_{\text{к.мін}}$ – найменше значення потужності КЗ на шинах підстанції живлення, МВА;

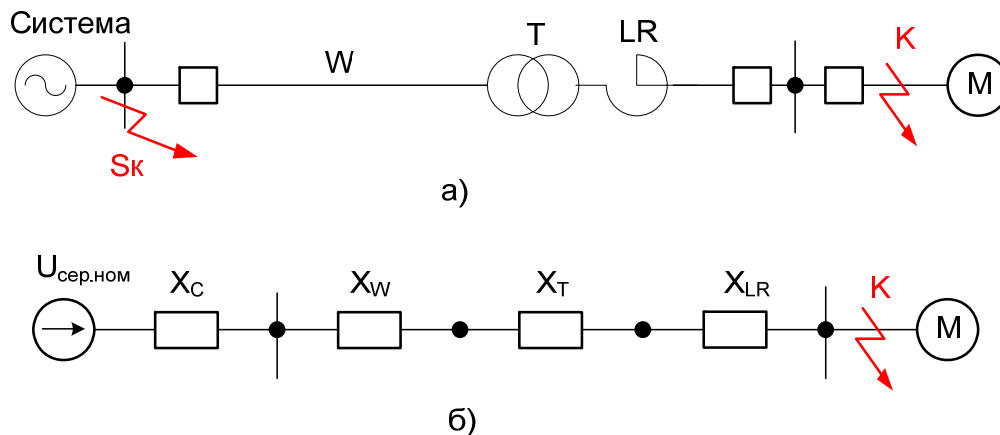


Рисунок 2.2 – Схема електропостачання електричного двигуна промислового підприємства (а) та заступна схема (б) для розрахунку струмів короткого замикання

– для ліній електропередачі w, Ом

$$X_w = X_{\text{пит}} \cdot l,$$

де $X_{\text{пит}}$ – питомий опір лінії, Ом/км;

l – довжина лінії, км;

– для силового трансформатора Т без регулювання коефіцієнта трансформації під навантаженням, Ом

$$X_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$$

Для силового трансформатора з пристроєм РПН потрібно враховувати залежність опору від положення регулятора РПН. Розрахунки здійснюються на основі заводських значень напруги КЗ $U_k\%$ при середньому та крайніх положеннях регулятора. Опір трансформатора визначається за виразом

$$X_{Tn} = \frac{U_{kn} \%}{100} \cdot \frac{U_{1n}^2}{S'_{ном}}$$

де $U_{kn}\%$ – напруга КЗ;

U_{1n} – значення регульованої напруги, яке відповідає відгалуженню n обмотки ВН трансформатора.

Опір реактора LR приводиться до сторони ВН силового трансформатора за формулою

$$X_{LR} = X_{LR.ном} \cdot K^2,$$

де K – дійсний коефіцієнт трансформації силового трансформатора, $K=U_{1n}/U_{Hn}$;

$X_{LR.ном}$ – номінальний опір реактора, Ом.

Струм трифазного КЗ на виводах електродвигуна знаходиться за формулою

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{ср.ном} \cdot K}{\sqrt{3}(X_C + X_w + X_{T,n} + X_{LR})},$$

а двофазного КЗ – за формулою

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_K^{(3)} = \frac{U_{ср.ном} \cdot K}{2 \cdot (X_C + X_w + X_{T,n} + X_{LR})}.$$

Струм, який приходить до місця короткого замикання зі сторони нульових виводів обмотки статора, зумовлений електрорушійною силою електродвигуна та надперехідними опорами X''_d для синхронних і X_K – для асинхронних двигунів. Розрахунок цього струму може бути виконано так, як і при зовнішньому короткому замиканні в режимі втрати живлення. При трифазному короткому замиканні, яке виникає при пуску електродвигуна, струм зі сторони нульових виводів може бути відсутнім.

При подвійному замиканні на землю $K^{(1,1)}$ (перше – фази В обмотки статора на корпус поблизу лінійного виводу, а друге, наприклад, фази С в мережі) розрахунок струмів зручніше проводити методом симетричних складових за допомогою відповідних заступних схем прямої, оберненої та нульової послідовностей.

2.4 Нагрівання електродвигунів під час перевантаження

Збільшення струму в обмотках електродвигуна викликає перегрів – додаткове перевищення температури елементів конструкції електродвигунів порівняно з нормальним, який відповідає робочому режиму. Перегреви бувають місцеві та загальні.

Місцеві перегреви у більшості випадків є наслідком локальних дефектів активної сталі або елементарних провідників. До них близькі за характером перегреви ізоляції, які зумовлені витковими замиканнями та однофазними замиканнями обмотки статора на корпус.

Загальні перегреви електродвигунів характеризуються одночасним перевищенням температури в усіх частинах або в більшій частині одного з основних елементів конструкції: обмотки або осердя статора, обмоток, полюсів або осердь ротора – та, звичайно, виникають при зовнішніх і внутрішніх КЗ, в режимах пуску й самозапуску, при несправностях в механічній частині електроприводу або в технологічному устаткуванні. Характер перегріву та його локалізація в конкретних конструкціях електродвигунів залежать від того, якою причиною викликається перегрів. Так, наприклад, при пуску синхронних двигунів перегріву піддаються всі його обмотки та полюси масивного ротора, а при технологічному перевантаженні, як правило, тільки обмотка статора [16].

Реакція на перевищення струму в обмотках електродвигуна визначається тепловою інерцією деталей конструкції. Найбільші значення постійних часу нагріву мають осердя статора і ротора. Суттєво менша інерція у обмоток, по яких проходить збільшений струм.

Швидкий додатковий нагрів обмотки може призвести до небезпечних наслідків через різні коефіцієнти розширення металу обмоток, ізоляції та сталі, шкідливі дії теплових розширень на місцях паяння обмотки, небезпеки деформації витків обмотки ротора тощо. Теплові розширення можуть призвести також до перекриття ізоляції обмотки та появи в ній тріщин.

Термін служби ізоляції залежить, в першу чергу, від її температури, точніше, від співвідношення між фактичною її робочою температурою та гранично допустимою, яка відповідає класу нагрівостійкості ізоляції даного типу. Ізоляція обмоток електродвигунів має клас нагрівостійкості В. Гранично допустима температура v_{\max} , яка визначається сумою допустимого перевищення температури $\Delta v_{\text{доп}}$ та температури 40 °С, яка відповідає граничній температурі газоподібного охолоджувального середовища, згідно зі стандартами складає

$$v_{\max} = \Delta v_{\text{доп}} + 40 \text{ °С} = 120 \text{ °С}.$$

Для грубого оцінювання швидкості старіння можна вважати, що термін служби, наприклад, мікалентної компаундової ізоляції та термореактивної ізоляції змінюється в $2 \div 2,5$ рази зі зміною температури на кожні $20\text{ }^\circ\text{C}$ [7].

Перевантаження за струмом, які викликають перегрів обмоток електродвигунів, розрізняють за тривалістю. Якщо за час дії перевантаження температура обмоток не досягає практично усталеного значення, то перевантаження називається короткочасним, в протилежному випадку його вважають тривалим [16].

За винятком КЗ в мережі та в електродвигунах і асинхронного ходу синхронних двигунів основними причинами виникнення перевантаження за струмом є [7]:

1. Порушення технологічного процесу;
2. Несправність механізму або електродвигуна;

3. Низька якість напруги мережі живлення. Обертовий момент асинхронних двигунів є пропорційним квадрату прикладеної напруги. Тому при зниженні напруги електродвигун переходить на роботу з великим ковзанням, внаслідок чого струм, що ним споживається, збільшується.

Час пуску асинхронного двигуна при зниженій напрузі збільшується порівняно з часом пуску для нормальних умов. Такий режим, зокрема, може мати місце при самозапуску електродвигунів власних потреб електростанцій.

Якщо пуск електродвигуна при зниженій напрузі збігається з несприятливим відхиленням від нормальних умов технологічного процесу, то процес пуску затягується, а в гіршому випадку – двигун може взагалі не запуститися. Аналогічне явище може мати місце при самозапуску відповідальних електродвигунів у випадку відмови в дії захисту мінімальної напруги, який відключає з витримкою часу $0,5\text{ с}$ невідповідальні двигуни. Тоді через підвищене падіння напруги в елементах, які живлять шини власних потреб, напруга, що підводиться до електродвигунів, може бути недостатньою для створення пускового обертового моменту або пуск може недопустимо затягуватися.

У синхронних двигунах обертовий момент є пропорційним прикладеній напрузі. Для його збільшення до потрібного значення при зниженні напруги в пристрій регулювання струму збудження вводиться вузол автоматичного збільшення струму. Внаслідок цього струм статора також зростає, що призводить до підвищеного нагріву синхронного двигуна.

У випадку підвищення напруги струм асинхронного двигуна в загальному випадку знижується. Однак, якщо сталь статора використовується у режимі, який близький до насичування, то при підвищенні напруги різко зростає струм намагнічування і струм статора в цілому. Наприклад, у випадку підвищення напруги до $1,3U_{\text{ном}}$ струм

статора може складати $1,25I_{\text{ном}}$, а при підвищенні напруги до $1,4U_{\text{ном}}$ цей струм зростає до $1,5I_{\text{ном}}$.

Змінювання частоти в нормальних режимах роботи енергосистеми порівняно мало впливає на тепловий режим асинхронних двигунів.

У синхронних двигунах струм статора може збільшитися при зниженні частоти через зростання струму намагнічування [16].

4. Небезпечним перевантаженням є пуск або самозапуск електродвигунів з під'єднаним навантаженим механізмом, якщо двигун на такий режим не розрахований. В цих випадках електричний двигун не може розгорнутися і неминуче буде пошкоджений. Нагрів обмотки виникає не тільки за рахунок втрат від струму в самій обмотці, але й за рахунок втрат в активній сталі статора та нагріву від тертя об повітря. Повне врахування усіх факторів практично неможливе. Тому аналіз нагріву та охолодження обмоток застосовується на низці припущень [7, 16].

2.5 Несиметричні режими роботи

У несиметричному режимі струми статора електродвигуна можна розкласти на симетричні складові прямої та оберненої послідовностей. Струми прямої послідовності створюють магнітне поле, яке обертається з синхронною кутовою швидкістю в ту ж сторону, що і ротор двигуна. Поле оберненої послідовності також обертається з синхронною кутовою швидкістю, але в протилежну сторону.

Поле оберненої послідовності чинить тепловий та механічний вплив на електродвигун. Тепловий вплив зумовлено додатковими втратами в роторі, які особливо сильно виявляються при номінальній частоті обертання ротора. При цьому в замкнених контурах ротора наводяться струми з частотою порядку 100 Гц, які викликають підсилений розігрів елементів на поверхні неявнополюсного ротора (пазові клини, зубці ротора, бандажні кільця, особливо в торцевих зонах, в місцях контакту вказаних елементів). Синхронні двигуни з явнополюсним ротором і асинхронні двигуни (меншою мірою) нагріваються струмами подвійної частоти або через наявність спеціальної обмотки збудження, або через наявність короткозамкненої обмотки на роторі.

Механічний вплив зумовлений появою знакозмінного електромагнітного моменту та проявляється у вигляді підсиленої вібрації елементів статора і ротора. Найбільші механічні вібрації діють на зварні шви, клини кріплення активної сталі до полук корпусу та лобові частини обмотки статора, особливо в місцях їх виходу з пазів.

Несиметричний режим може бути тривалим та короточасним. Стандартом на якість електроенергії встановлено допустиме значення напруги оберненої послідовності в тривалому режимі

$$U_{2*} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \leq 2\%,$$

де U_{2*} – відносна напруга оберненої послідовності, % номінальної;
 U_2 – напруга оберненої послідовності.

Значення U_2 визначається за виразом

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C),$$

де U_A, U_B, U_C – фазні напруги;
 $a = e^{j120^\circ}$ – фазний множник.

Для асинхронних двигунів допустиме значення відносної напруги оберненої послідовності U_{2*} більше 2% і, згідно зі стандартом, має розраховуватися з урахуванням відхилення напруги прямої послідовності, гармонік напруги та коефіцієнта завантаження K_3 . Розрахунок показує, що за відсутності гармонік і відхилень напруги при номінальному навантаженні двигуна допустиме значення U_{2*} складає приблизно 2,3÷4,5% при повільних змінюваннях U_2 та 4,82÷7,8% при швидких змінюваннях U_2 [7].

Допустимість тривалого несиметричного режиму потужних синхронних машин відповідно до практики експлуатації визначається нерівністю струмів у фазах, тобто арифметичною різницею струмів. Явнополюсні машини допускають тривалу несиметрію, якщо струм ні в одній з фаз не перевищує номінального значення, а арифметична різниця 20% номінального струму при повітряному охолодженні обмотки статора. Неявнополюсні машини, наприклад, синхронні турбодвигуни, виходячи з найбільш тривало допустимої температури для сталі зубців ротора, торцевих клинів та обмотки збудження (+130 °C) допускають тривалу роботу при струмі оберненої послідовності $I_2 = 0,08I_{\text{ном}}$ та струмах в фазах, які не перевищують номінального значення.

Асинхронні двигуни допускають приблизно таку ж несиметрію, як і синхронні неявнополюсні машини.

Заслугує уваги зв'язок між струмом оберненої послідовності та нерівністю струмів у фазах ΔI . При несиметричному навантаженні справедлива нерівність

$$I_2 \leq 0,7 \cdot \Delta I,$$

де $\Delta I = |I_{\text{max}}| - |I_{\text{min}}|$;

$|I_{\text{max}}|, |I_{\text{min}}|$ – відповідно, модулі найбільшого та найменшого значень струмів у фазах статора.

Вказаний вираз отримано для окремого випадку, коли у двох фазах струми однакові за значенням і не дорівнюють струму третьої фази. У

загальному випадку несиметричного навантаження зв'язок між I_2 та ΔI залежить від початкових фаз напруг прямої і оберненої послідовностей та співвідношень між опорами електродвигунів для прямої Z_1 та оберненої Z_2 послідовностей.

В нормальних режимах при номінальній частоті обертання або близької до неї електродвигуни мають неоднакові опори струмам прямої та оберненої послідовностей. Так, якщо у асинхронних двигунах для прямої послідовності опір $Z_1 = (1 \div 1/K_{\Pi}) \cdot Z_{\text{ном}}$, то опір оберненої послідовності Z_2 визначається ковзанням $(2-S)$. На рисунку 2.3 наведена заступна схема асинхронного двигуна для оберненої послідовності. Для потужних асинхронних двигунів $x'_2 \geq r'_2 / (2-S)$ і, отже,

$$Z_2 = x_k = Z_{\text{ном}}/K_{\Pi},$$

де x_k – опір асинхронного двигуна при пуску.

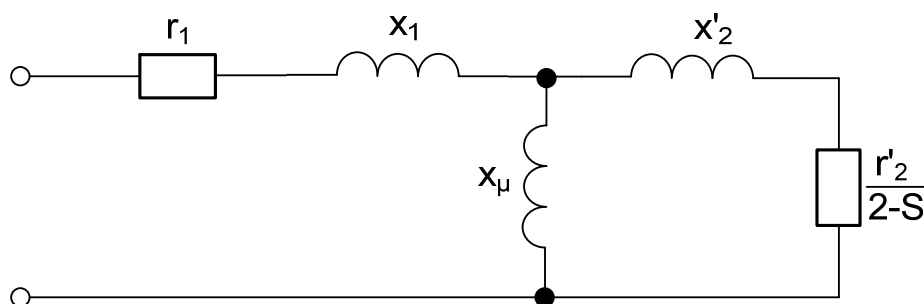


Рисунок 2.3 – Заступна схема асинхронного двигуна для струмів оберненої послідовності

Розрахунок показує, що при $U_{2*} \leq 0,02$ по обмотках статора синхронних двигунів серії СТД проходять струми оберненої послідовності порядку 11÷13% номінального значення. При цьому нерівність струмів в фазах може перевищувати 20% номінального струму статора. Це вказує на те, що незначні відхилення напруги можуть призвести до відчутних наслідків – нагріву електродвигуна.

Одним з найбільш небезпечних несиметричних режимів роботи електродвигунів є неповнофазний режим. Причинами виникнення такого режиму можуть бути: обрив фазного проводу в мережі, обрив в обмотці статора, порушення контакту в коробці виводів тощо. Відомо, що пуск електродвигуна в такому режимі неможливий, і двигун вимикається захистом від перевантаження. Однак якщо неповнофазний режим виникає при роботі електродвигуна, то захист може виявитися неефективним, оскільки при малому завантаженні двигуна струми в обмотках статора можуть виявитися нижчими, ніж уставка захисту від перевантаження.

Комплексна заступна схема асинхронного двигуна в неповнофазному режимі наведена на рисунку 2.4. Додатковий опір Z_{Δ} , який дорівнює опорі асинхронного двигуна струмам оберненої послідовності, в першому наближенні дорівнює x_k .

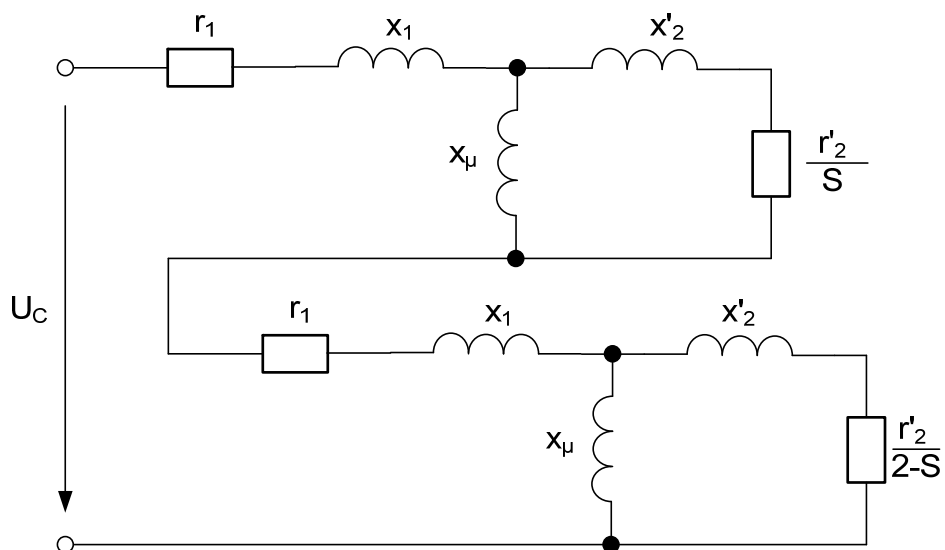


Рисунок 2.4 – Комплексна заступна схема асинхронного двигуна в неповнофазному режимі

На рисунку 2.5 наведені залежності струмів асинхронного двигуна від потужності на його валу P^* в неповнофазному режимі. Очевидно, що двигун перевантажується вже при $P^* > 0,5$. Таким чином, при розробці та проектуванні системи релейного захисту електродвигунів потрібно зважати на можливість його перевантаження за струмом в неповнофазному режимі навіть при $P < P_{\text{ном}}$.

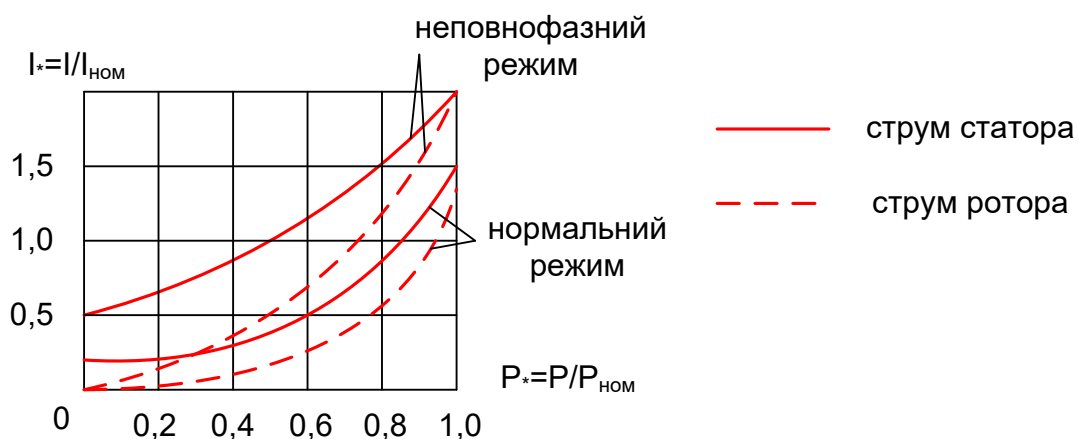


Рисунок 2.5 – Струми статора та ротора асинхронного двигуна в нормальному режимі та за умови обриву фазного проводу при кратності максимального моменту $b = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 2,5$

Оскільки в одній з фаз струм дорівнює нулю, то $I_2 = I_1 = I_A / \sqrt{3}$, де I_A – струм в непошкодженій фазі.

Небезпечним є також неповнофазний режим роботи силового трансформатора зі схемою з'єднань Ун/Д при обриві проводу на стороні ВН (на стороні зірки). Характерним тут є те, що струми у двох фазах двигуна в два рази менші, ніж в третій. Якщо захист від перевантаження не встановлено на всіх трьох фазах, то є можливим вихід з ладу двигуна навіть при повній відповідності характеристик двигуна та захисту. В режимі, який розглядається, струми прямої I_1 та оберненої I_2 послідовностей рівні за значенням і складають

$$I_2 = I_1 = I_A = I_C.$$

Якщо двигун отримує живлення від трансформатора зі схемою Ун/Д, нейтраль якого заземлена і у якого обірвана фаза на стороні ВН, то струм оберненої послідовності наближено визначається за виразом

$$I_2 \approx I_A - I_1; \quad I_1 \approx (I_B + I_C) / 2,$$

де I_A – найбільше значення зі струмів двигуна.

Якщо в схемі, що розглядається, $I_B \approx I_C$ та відношення $I_A/I_B \leq 1,7 \div 1,8$, що зазвичай виконується, то можна використовувати таку формулу

$$I_2 = 0,45(I_A / I_B - 1) \cdot I_A.$$

Для синхронних двигунів може бути небезпечним зовнішнє несиметричне коротке замикання в мережі. При цьому синхронний двигун переходить в режим підживлення точки КЗ зі значними струмами, які викликають підвищені нагріви масивних елементів ротора. Критерій допустимості короткочасного несиметричного перевантаження [4, 7]

$$I_{2*}^2 \cdot t = A = \text{const},$$

де $I_{2*} = I_2/I_{\text{ном}}$ – відносний струм оберненої послідовності I_2 ;

t – час перевантаження;

A – постійна для даної системи охолодження.

Якщо за час t струм I_2 змінюється, то потрібно визначити відносний тепловий імпульс струму оберненої послідовності

$$B_{K2*} = \int_0^{t_{\text{взм}}} I_{2t*}^2 \cdot dt,$$

де $t_{\text{вим}}$ – час з моменту виникнення короткочасного несиметричного режиму до його вимикання;

I_{2t^*} – поточне відносне діюче значення струму I_2 .

Для здійснення повноцінного захисту електродвигунів від перевантаження струмом оберненої послідовності потрібно для асинхронних та, особливо, синхронних двигунів мати дослідні дані щодо критерію $I_{2^*}^2 \cdot t$.

2.6 Втрата живлення

Найчастіше порушення роботи електродвигунів виникає через втрати живлення, коли внаслідок будь-яких відмов у мережі живлення передача активної потужності від джерела електропостачання до електричного двигуна або припиняється повністю, або обмежується настільки, що її виявляється недостатньо для забезпечення повноцінного тривалого функціонування системи електродвигун – механізм. Цей режим впливає на всі електродвигуни, які є у вузлі навантаження, що втрачає живлення. Залежно від місця та характеру відмови електричний зв'язок двигуна з джерелом електропостачання може або припинитися на деякий час, або зберегтися, але при цьому напруга на лінійних виводах електродвигуна виявляється значно зниженою. Згідно з цим розрізняють глибокі зниження напруги та перерви в електропостачанні. Відновлення напруги починається одразу після вимикання пошкодження, тобто через

$$t_U = t_{P3} + t_{BB}, \quad (2.1)$$

де t_{P3} та t_{BB} – час спрацювання релейного захисту та вимикання вимикача, які забезпечують ліквідацію КЗ.

Якщо ввімкнення здійснюється засобами автоматики (АВР, АПВ), то час живлення складає

$$t_{ПЖ} = t_{P3} + t_{BB} + t_{3П} + t_a + t_{УВ},$$

де $t_{3П}$ – час змінювання параметрів, на які реагують пускові органи автоматики, від нормального рівня до уставки спрацювання;

t_a – власний час дії автоматики;

$t_{УВ}$ – час увімкнення вимикача.

Більшість КЗ в мережах 110÷220 кВ однофазні. Вони складають приблизно 75÷85% усіх випадків КЗ. Аналіз показує, що змінювання двох лінійних напруг звичайно дуже незначне і складає приблизно 10%, а третя напруга знижується суттєво – на 50÷70%. За наявності приєднаних до шин підстанції (ПС) синхронних двигунів ці напруги практично залишаються на рівні номінальних або дещо збільшуються за рахунок дії форсування

збудження. Трифазні та двофазні КЗ викликають значно більше зниження напруги на виводах усіх електродвигунів, які отримують живлення від ПС.

Час вимикання розглянутих коротких замикань, які супроводжуються зниженням напруги прямої послідовності на шинах ПС нижче $0,6U_{ном}$, складає не більше $0,15 \div 0,2$ с, оскільки ці пошкодження знаходяться в зоні роботи швидкодійних ступенів захистів елементів мережі $110 \div 220$ кВ.

Подача напруги на шини підстанції зазвичай здійснюється пристроями АПВ, час спрацювання якого $t_{АПВ}$ не менше 0,5 с. Таким чином, мінімальний час, протягом якого електродвигуни зазнають втрату живлення, складає

$$t_{ПЖ} = t_{рз} + t_{ВВ} + t_{АПВ} + t_{УВ} \approx 1,14 \text{ с},$$

де $t_{ВВ} = 0,04$ с; $t_{УВ} = 0,5$ с; $t_{рз} \approx 0,1$ с.

Короткі замикання в баку силового трансформатора рідко бувають багатofазними, а трифазні КЗ практично унеможливлені. Пошкодження такого роду ймовірні на виводах низької напруги трансформатора або поблизу цих виводів. При цьому напруга в мережі $6 \div 10$ кВ різко знижується. Вимикання КЗ здійснюється, як правило, з часом дії основного захисту трансформатора плюс власний час вимикача: $t_U \approx 0,15$ с. подача живлення на електродвигун виконується ввімкненням за допомогою пристрою АВР вимикача. Мінімальний час втрати живлення складає

$$t_{ПЖ} = t_U + t_{УВ} = 0,45 \text{ с},$$

де $t_{УВ} = 0,3$ с – час увімкнення вимикачів $6 \div 10$ кВ.

Пошкодження збірних шин КРУ, як і короткі замикання на обладнанні усередині КРУ, призводять до важких наслідків і тому вимикаються швидкодійними пристроями релейного захисту за час не більше $0,2 \div 0,25$ с.

Робота АВР при КЗ на шинах звичайно не передбачається. Тому для електродвигунів, які приєднані до цих шин, втрата живлення виявляється тривалою – на весь час відновлення пошкодженого КРУ. Час втрати живлення в цьому випадку може бути знайдений з виразу

$$t_{ПЖ} = t_{АВР} + t_{УВ},$$

де $t_{АВР}$ – час дії АВР на секційному вимикачі.

Короткі замикання на стороні вищої напруги трансформатора хоча і супроводжується глибоким зниженням напруги на виводах електродвигунів, але вимикаються швидко – за час порядку 0,15 с, оскільки знаходяться звичайно в зоні спрацювання струмових відсічок на силових трансформаторах. При КЗ за межами цієї зони напруга на збірних шинах виявляється, як правило, не менше $0,6U_{ном}$.

Короткі замикання в системі внутрішнього електропостачання призводять до змінювання напруги на виводах електродвигунів стрибком від $U_{\text{ном}}$ до нуля. При цьому в колі статора двигуна буде протікати струм, який зумовлений їх ЕРС. Початкове значення цих ЕРС, яке визначено за умови, що до короткого замикання ЕД працював в режимі холостого ходу при $S \approx 0$, складає для асинхронних двигунів $E''_{\text{АД}}(0) = 0,95 \div 0,98$, а для синхронних двигунів $E''_{\text{СД}} = 1,05 \div 1,1$.

Якщо до короткого замикання електродвигуни працювали з номінальним навантаженням, то

$$E''_{\text{СД}}(0) = \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{ном}} + (\sin \varphi_{\text{ном}} + x_d'')^2}, \quad (2.2)$$

$$E''_{\text{АД}}(0) = \sqrt{\cos^2 \varphi_{\text{ном}} + (\sin \varphi_{\text{ном}} - x_k')^2}. \quad (2.3)$$

При короткому замиканні поблизу виводів ненавантаженого асинхронного двигуна струм статора можна показати як такий, що складається з згасаючої періодичної $i_{\text{п,к}}$ та аперіодичної $i_{\text{а,к}}$ складових

$$i_{\text{к}} = i_{\text{п,к}} + i_{\text{а,к}}, \quad (2.4)$$

де

$$i_{\text{а,к}} = \sqrt{2} \cdot E''_{\text{АД}}(0) \cdot K_{\text{П}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot e^{-t/T_a} \cdot \sin \alpha;$$

$$i_{\text{п,к}} = -\sqrt{2} \cdot E''_{\text{АД}}(0) \cdot K_{\text{П}} \cdot I_{\text{ном}} (1 - \sigma) \cdot e^{-t/T_2'} \cdot \sin(\omega t + \alpha);$$

$$T_a = x_k'/r_1; \quad T_2' = \sigma(x_2' + x_{\mu}')/r_2';$$

$$\sigma = x_k'/x_{\mu}' = (x_2' + x_1')/x_{\mu}' \approx 0,07 \div 0,08.$$

Підставивши в (2.4) $\sigma = 0,08$ та $E''_{\text{АД}}(0) = 0,98$ та вважаючи це значення ЕРС незмінним хоча б протягом півперіоду КЗ, отримаємо для $t = 1/(2f_{\text{ном}}) = 0,01$ с та $\alpha = \pi/2$ вираз для визначення максимального значення струму $i_{\text{к}}$

$$i_{\text{к,макс}} = \sqrt{2} \cdot 0,98 \cdot I_{\text{п}} \left(e^{-\frac{0,01}{T_a}} + 0,92 \cdot e^{-\frac{0,01}{T_2'}} \right). \quad (2.5)$$

Для реальних значень $T_a \approx T_2' \approx 0,03$ с

$$i_{\text{к,макс}} = 1,32 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}} = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}}.$$

Найбільше діюче значення струму КЗ становить

$$I_{к.маx} = I_{п} \cdot \sqrt{\left(0,98 \cdot 0,92 \cdot e^{\frac{-0,01}{0,03}}\right)^2 + \left(0,98 \cdot \sqrt{2} \cdot e^{\frac{0,01}{0,03}}\right)^2} =$$

$$= 1,16 \cdot I_{п} = 1,16 \cdot K_{п} \cdot I_{ном} = K_{д.у} \cdot I_{п},$$

де K_y – ударний коефіцієнт кола АД;

$K_{д.у}$ – кратність найбільшого діючого значення струму.

Визначимо, при якому значенні t діюче значення струму КЗ буде меншим $I_{ном}$.

З рівняння (2.5) при $T'_2 = T_a$ отримаємо

$$\frac{t}{T_a} > \ln 1,65 \cdot K_{п}, \quad \text{або} \quad t > T_a \ln 1,65 \cdot K_{п}.$$

Якщо прийняти, що $K_{п} = 5$, то при $t > 2,1$ с і $T_a \approx 0,063$ с максимальне діюче значення струму КЗ не перевищить $I_{ном}$.

В таблиці 2.2 наведено значення T_a і T'_2 за даними МЕІ та розрахункові коефіцієнти K_y і $K_{д.у}$ для різних серій асинхронних двигунів [7].

Таблиця 2.2 – Параметри для різних серій асинхронних двигунів

Параметр	Серія електродвигунів					
	А	АО	ДАЗО	АДТ	АТМ	ДАМСО
T'_2	0,04	0,04	0,09	$0,06/S_{ном}$	0,075	0,044
T_a	0,04	0,03	0,02	0,058	0,043	0,035
K_y	1,44	1,37	1,38	–	1,54	1,43
$K_{д.у}$	1,18	1,13	1,19	–	1,26	1,48

В практичних розрахунках ударний коефіцієнт K_y визначається за формулою

$$K_y = 1 + e^{\frac{0,01}{T_a}},$$

а найбільше діюче значення струму КЗ

$$I_{к.маx} = K_{д.у} \cdot I''(0).$$

Значення K_y та $K_{д.у}$ для різних T_a наведені нижче [7]:

$T_a, \text{ с}$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$K_y \dots$	1,61	1,72	1,78	1,82	1,84	1,87	1,88	1,89	1,9
$K_{д.у} \dots$	1,32	1,43	1,49	1,53	1,55	1,58	1,60	1,61	1,62

Окрім максимального значення струму КЗ в режимі, що розглядається, з точки зору релейного захисту виникає інтерес змінювання опору та ЕРС електродвигуна в часі. Ці залежності пов'язані з гальмуванням ротора під час короткого замикання.

При близькому КЗ, яке супроводжується зниженням напруги на виводах електродвигуна практично до нуля, електромагнітний обертовий момент зникає і рівняння руху набуває вигляду

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_O + M_K}{J}, \quad (2.6)$$

що відповідає рівнянню

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{M_{O^*} + M_{K^*}}{\tau_J}. \quad (2.6, a)$$

Величини M_K або M_{K^*} являють собою додатковий момент КЗ, який виникає через перехід ЕД при КЗ в генераторний режим.

Для асинхронних двигунів момент КЗ проявляється тільки в надперехідному режимі та на процес гальмування (вибігу) практично не впливає. У синхронних двигунів врахування M_K при визначенні кутової швидкості ω доцільно враховувати тільки при $\tau_J \leq 1$ с.

Оскільки такі постійні часу зустрічаються не часто, можна прийняти в (2.6) $M_{K^*} = 0$. У цьому випадку вибіг електродвигуна буде вільним, тобто проходити під дією моменту опору M_{O^*} та моменту інерції J агрегата тільки цього двигуна. З урахуванням $M_{K^*} = 0$ рішення рівняння (2.6) відносно ω дає для випадку $M_{O^*} = \text{const}$

$$\omega = \omega_y - M_{O^*} \frac{t}{\tau_J} = 1 - S_y - M_{O^*} \frac{t}{\tau_J} \approx 1 - \frac{K_3 \cdot t}{\tau_J}, \quad (2.7)$$

де $K_3 = M_{O^*} = M_O / M_{\text{НОМ}}$ – коефіцієнт завантаження.

Для агрегатів з моментом опору, який пропорційний кутовій швидкості, рішення (2.6) в спрощеному вигляді

$$\omega = e^{-\frac{t \cdot K_{3, \text{НОМ}}}{\tau_J}}. \quad (2.8)$$

Якщо механізм, який приводить в обертання електродвигун, має вентиляторну характеристику, то з достатньою для практики точністю

$$\omega = \frac{1}{1 + \frac{t \cdot K_{3, \text{НОМ}}}{\tau_J}}. \quad (2.9)$$

В (2.8) та (2.9) $K_{3, \text{НОМ}}$ – коефіцієнт завантаження при номінальній кутовій швидкості.

Враховуючи, що $S = 1 - \omega$ і кут між векторами ЕРС синхронного двигуна та вектором напруги мережі $\delta = \int_0^t S \cdot dt$, з (2.7) отримуємо

$$\delta = \delta_0 + \frac{K_3 \cdot t^2}{2 \cdot \tau_J}, \quad (2.10)$$

де δ, δ_0, t і τ_J – в радіанах.

Якщо при цьому виявляється, що за час існування КЗ t_k ковзання синхронного двигуна не перевищує критичного S_k , то динамічна стійкість їх забезпечується, і після відновлення живлення вони повернуться до усталеного режиму з синхронною кутовою швидкістю. Для цього має забезпечуватися

$$t_k \leq \frac{1,05}{K_3} \cdot \sqrt{M_{e,max} \cdot \tau_J}, \quad (2.11)$$

де $M_{e,max}$ – максимальне значення електромагнітного моменту.

Значення опорів електродвигунів також змінюється в процесі вибігу. Для асинхронних двигунів [7]

$$X_{AD}(S) = \frac{X_x}{1 + \frac{X_x - X_k}{X_k} \cdot S^{-1/\ln S_k}}.$$

Враховуючи, що $X_k/X_x = \sigma$; $X_x = X_\mu + X_1$, після перетворень отримуємо

$$X_{AD}(S) \approx \frac{X_k}{\sigma + (1 - \sigma) \cdot S^{-1/\ln S_k}}. \quad (2.12)$$

Для синхронних двигунів

$$X_{CD}(S) \approx \frac{X_d}{1 + \frac{X_d - X_d''}{X_d''} \cdot S^k}, \quad (2.13)$$

де $k = \frac{X_d'(X_d - X_d'')}{X_d''(X_d - X_d')} : \ln \tau_d''.$

При середніх значеннях параметрів синхронних двигунів, які вказані в таблиці 2.3, формула (2.13) має вигляд:

– для явнополюсних синхронних двигунів

$$X_{CD}(S) \approx \frac{1,15}{1 + 3,8 \cdot S^{2,05}}; \quad (2.14)$$

– для неявнополюсних синхронних двигунів

$$X_{CD}(S) \approx \frac{1,3}{1 + 13,4 \cdot S^{3,58}}. \quad (2.15)$$

Таблиця 2.3 – Параметри синхронних двигунів [7]

Параметр	Неявнополносні СД	Явнополносні СД
x_d''	0,09	0,24
x_d'	0,13	0,37
x_d	1,3	1,15
x_q	1,3	0,7
x_2	x_d''	0,25
τ_{d0}, c	5,0	2,7
τ_d'' , c	0,035	0,01
τ_d' , c	0,45	0,51

Змінювання ЕРС асинхронних двигунів при КЗ на його виводах проходить за експоненціальним законом

$$E_{AD}(t) = E_{AD}(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}},$$

де τ_d' – постійна часу аперіодичної складової струму ротора при короткозамкненому роторі, яка пов'язана з постійною часу τ_{d0} аперіодичної складової струму ротора при розімкненій обмотці статора співвідношенням: $\tau_d' = \sigma \cdot \tau_{d0}$.

Для електродвигуна типу АТД-8000 значення $\tau_{d0} = 0,83$ с. Отже, згасання ЕРС при КЗ буде проходити з постійною часу

$$\tau_d' = \sigma \cdot \tau_{d0} = 0,08 \cdot 0,83 = 0,066 \text{ с.}$$

Оскільки вимикання близьких КЗ в мережі проходить з часом, не меншим 0,1 с, то можна вважати, що до моменту вимикання КЗ ЕРС асинхронного двигуна повністю згасає.

Значення ЕРС синхронного двигуна в процесі вибігу на КЗ визначається реакцією на цей режим пристрою збудження та параметрами кіл ротора при замкненій обмотці статора. З достатньою для практики точністю вважають

$$E_{CD}(t) = E_q''(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}}, \quad (2.16)$$

де $\tau_d' = 0,3 \div 1,4$ с – постійна часу згасання перехідних складових поздовжніх струмів.

Вплив АРЗ (форсування збудження) на ЕРС та на струм, який посиляє електродвигун до місця КЗ, проявляється тільки за електромашинних пристроїв збудження. У цьому випадку до значень струму статора та ЕРС потрібно додати відповідні значення Δi та ΔE , які визначаються за відповідними формулами. Розрахунок за (2.16) показує, що до моменту усунення КЗ захистами, які діють без витримки часу ($t = 0,15$ с), у неявнополюсних ЕД значення $E_{сд}(0,15) = 0,77$ при $E''(0) = 1,1$ та $\tau'_d = 0,45$ с, а $E_{сд}(0,5) = 0,4$ і $E_{сд}(1) = 0,12$.

2.7 Асинхронний режим синхронного електродвигуна

Суть будь-якого асинхронного режиму (ходу) полягає в асинхронному обертанні ротора з кутовою швидкістю $\omega_s = \omega(1 - S) \neq 2\pi f_1 / p$, в той час як поле статора обертається з частотою, яка визначається частотою мережі живлення. Такий режим може бути навмисним: асинхронний пуск, ресинхронізація тощо. В цьому випадку, якщо параметри режиму і, зокрема, його тривалість не перевищують розрахункові, він не є небезпечним і може бути віднесений до нормального. Інше діло, якщо асинхронний хід виникає раптово, коли під впливом технологічного перевантаження, тривалого або короткочасного, качань, які викликані аварійними ситуаціями в системі зовнішнього електропостачання, короткочасних перерв живлення та КЗ електродвигун виходить з синхронізму і більш або менш тривалий час працює в такому режимі.

Під час асинхронного ходу синхронний двигун не тільки втрачає свої техніко-економічні переваги над асинхронним, але й опиняється в умовах, які сприяють перегріву його обмоток, порушенню конструкційної жорсткості їх кріплень, вібрації.

Тривалий асинхронний режим синхронного двигуна номінальною потужністю 10÷20 МВт і вище може призвести до качань в мережі, а в несприятливих випадках і до виходу з синхронізму інших синхронних двигунів.

Найчастіше асинхронний режим настає через втрати збудження, які пов'язані з пошкодженнями в колі ротора або пристрою збудження, а при безщіткових та тиристорних системах збудження – усякий раз, коли знижується більше ніж на $0,5U_{ном}$ напруга на збірних шинах, від яких живляться БПЗ та ТПЗ. Під асинхронним режимом незбудженого синхронного двигуна розуміється такий режим, в якому обмотка збудження замкнена накоротко або на гасильний опір.

В нормальному синхронному режимі обертовий момент зображується двома складовими: першою, яка залежить від збудження $\frac{E_q \cdot U}{x_d} \cdot \sin \delta$, і

другою, яка зумовлена несиметрією ротора, $\frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\delta$.

При втраті збудження магнітний потік, створений струмом ротора, буде згасати, в результаті чого синхронний двигун, який працює звичайно з перезбудженням, переходить в режим споживання реактивної потужності з мережі. Електромагнітний момент (його перша складова) почне зменшуватися одночасно зі зниженням ЕРС. При деякому значенні E_q обертовий момент стає нижчим моменту опору і електродвигун випадає з синхронізму. Уповільнення обертання ротора виникає завдяки дії потоку, що створений струмом намагнічування статора, появи в роторних контурах струмів, які мають частоту ковзання. Їх взаємодія з полем статора, як і в асинхронному двигуні, призведе до появи асинхронного моменту, який заважає збільшенню ковзання.

Періодична складова асинхронного моменту подвійної частоти ковзання робить $M_a(S)$ не постійним, а таким, що коливається біля середнього значення [7],

$$M_{a,cp} = \frac{U^2}{2} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \frac{S \cdot \tau'_d}{1 + (S \cdot \tau'_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot \frac{S \cdot \tau''_d}{1 + (S \cdot \tau''_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \cdot \frac{S \cdot \tau''_q}{1 + (S \cdot \tau''_q)^2} \right].$$

Внаслідок цього рівність обертового моменту $M_a^*(S)$ та моменту опору, якщо вона настає, носить динамічний характер: робоча точка здійснює деякі коливання біля точки перетину характеристик $M_{a,cp}(S)$ та $M_O(s)$. Ковзання, яке відповідає вказаному перетину, називають усталеним ковзанням асинхронного ходу S_a (рис. 2.6).

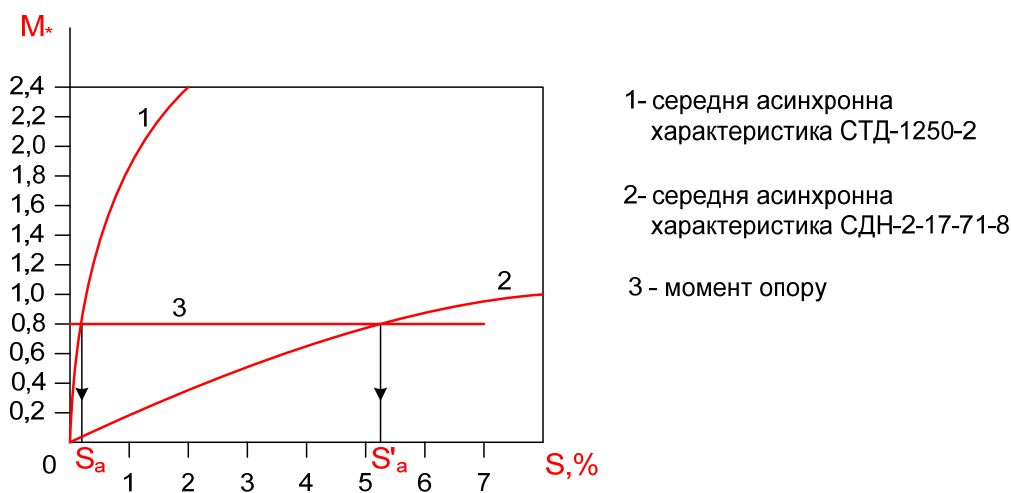


Рисунок 2.6 – Наближене визначення усталеного ковзання асинхронного ходу

Чим більш жорсткою є характеристика $M_{a,cp}(S)$, тим менша величина S_a . Неявнополюсні синхронні двигуни мають на ділянці малих ковзань дуже жорстку характеристику і можуть працювати в асинхронному режимі тривало з $S_a = 0,3 \div 0,5\%$. При менш жорсткій характеристиці динамічна

рівновага може настати при суттєво більших S_a , які вимірюються одиницями, а то і десятками відсотків, однак самі коливання ковзання та моменту біля середніх значень менші, ніж у першому випадку.

Якщо припустити, що асинхронний хід протікає при постійному ковзанні S_a , то кут навантаження δ в усталеному режимі можна записати у вигляді

$$\delta(t) = \delta_0 + S_a \cdot \omega t = \frac{\pi}{2} - \gamma_0 + S'_a \cdot \omega t.$$

Струм статора синхронного двигуна в асинхронному режимі без збудження має дві складові

$$i_a = i_s + i_\Delta.$$

Перша складова зумовлена впливом несиметричної системи роторних контурів, а друга залежить від несиметрії синхронного двигуна по повздовжній та поперечній осях.

Середнє значення струму статора з достатньою для практики точністю можна визначити за формулою

$$I_1 = U \sqrt{K_3^2 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{ном}} + \frac{\text{ВКЗ}}{0,75} + \frac{K_3^2 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{ном}} \left(\frac{1}{x_d} - \text{ВКЗ} \right)}{\left(\frac{1}{x_d} - \text{ВКЗ} \right)^2 - K_3^2 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{ном}}}}, \quad (2.17)$$

де U – напруга при асинхронному ході, звичайно приймається рівною 1;
 K_3 – коефіцієнт завантаження синхронного двигуна

$$K_3 \approx M_c / M_{\text{ном}} = M_{c*};$$

ВКЗ – відношення короткого замикання

$$\text{ВКЗ} = \frac{1,05 - 1,15}{x_d} \approx \frac{1,1}{x_d}.$$

Це ж значення можна визначити з виразу

$$I_1 = U / X(S_a), \quad (2.18)$$

де $X(S_a)$ – наближене значення індуктивного опору синхронного двигуна, яке виміряне зі сторони лінійних виводів обмотки статора, відповідає усталеному ковзанню S_a , визначається з рисунка 2.6.

Час повного коливання струму статора

$$\tau_s = \frac{1}{2 \cdot S'_a \cdot f_{\text{ном}}} = \frac{1}{100 \cdot S_a} = \frac{1}{S_a \%}.$$

Струм в обмотці збудження I_f пропорційний струму I_d і змінюється відповідно до частоти ковзання.

Час повного коливання струму ротора

$$\tau_p = 1/(S \cdot f_{\text{ном}}) = 2\tau_s.$$

Математичний опис асинхронного режиму збудженого синхронного двигуна є складним, тому його розглядають як суму двох режимів: асинхронного ходу без збудження та живлення обмотки збудження від збудника з напругою U_f при замкненій на опір мережі обмотці статора – своєрідному різновиді режиму динамічного гальмування.

Допустимий час $t_{\text{доп}}$ перебування синхронного двигуна в асинхронному режимі визначається нагрівом ротора та статора і для незбудженого синхронного двигуна, який працює при $K_z = 0,9$, орієнтовно складає від 30 с до кількох хвилин. Для турбодвигунів, які мають великі індуктивні опори, він, в основному, зумовлений нагрівом ротора струмами, які індукуються в пазових клинах і провідному шарі бочки. Допустиме навантаження в асинхронному режимі орієнтовно може бути знайдене, виходячи з умови, що втрати в роторі не перевищують номінальну потужність збудження

$$M_{\text{ном}} \cdot S \cdot \omega < P_{f,\text{ном}}.$$

Для явнополюсних синхронних двигунів тривалість роботи в асинхронному режимі визначається, як правило, нагрівом обмотки статора і легко піддається визначенню.

2.8 Аварійні режими пристроїв збудження

Основні аварійні режими безщіткових та тиристорних пристроїв збудження зводяться до нижчевикладеного [4, 7]: внутрішні КЗ, які зумовлені пробоями діодів (тиристорів) силового випрямляча; зовнішні КЗ на виводах силового випрямляча та пошкодження пускозахисного пристрою, які призводять до тривалого протікання струму через пускові опори. Пошкодження безщіткових пристроїв збудження відрізняються особливостями, які пов'язані з підвищеними реактивностями контурів КЗ та відсутністю прямого доступу до кіл якоря і силового випрямляча.

При виході з ладу в результаті КЗ або обриву діода фази силового випрямляча збудник переходить в несиметричний режим, який викликає небезпеку як для генератора безщіткового пристрою збудження, так і для силового трансформатора тиристорного пристрою збудження через перегрів елементів кріплення обмоток, що призводить до розпаювання та до виткових і інших видів замикань.

Характерним пошкодженням БПЗ є пробій тиристора пускозахисного пристрою. При цьому збільшення струму збудника невелике, а швидкість зростання температури пускового опору може досягати 100 °C/с і більше. В цьому випадку виникає руйнування пускового опору або вузла його кріплення. Пуск синхронного двигуна після цього здійснюється при частково або повністю розімкненій обмотці збудження, що призводить до розвитку аварії – пробією діодів силового випрямляча.

3 ЕЛЕМЕНТИ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

3.1 Структурні схеми релейного захисту

Пристрої релейного захисту електродвигунів поділяються на індивідуальні та групові. Індивідуальний захист, як правило, контролює режим роботи тільки одного електродвигуна та здійснює в аварійній ситуації керування пристроєм збудження (для синхронних двигунів), комутаційними апаратами та, за необхідності, технологічною установкою і механізмом, який пов'язаний з двигуном, що захищається. На рисунку 3.1, а наведена структурна схема індивідуального захисту синхронного двигуна, який ввімкнено в мережу через вимикач Q, і показана взаємодія його з первинним та допоміжним електротехнічним і технологічним устаткуванням. Через вимірювальний орган 2.1 релейний захист отримує інформацію від трансформаторів струму ТА1, ТА2, ТА3, які встановлено в колі статора електродвигуна, трансформатора напруги TV секції шин 6÷10 кВ, а також пристрою збудження 1. Залежно від типу захисту за інформацію про стан двигуна використовуються фазний струм статора I_{ϕ} , різниця струмів двох фаз, потрійний струм нульової послідовності $3I_0$, сполучення струмів в колі статора і напруг на секції лінійних та потрійного нульової послідовності $3U_0$, струм збудження тощо. Вимірювальний орган виявляє аварійний або небезпечний аномальний режим звичайно шляхом порівняння поточного значення параметра, який контролюється, з заданим та видає логічний сигнал (0 або 1) на один зі входів логічної частини захисту 2.2. Спрацювання вимірювального органу в загальному випадку завжди означає настання нового режиму, який або є, або може виявитися небезпечним для ЕД. На інші входи 2.2 можуть надходити сигнали від пристрою збудження 1, схеми 4 керування вимикачем Q, схеми 5 автоматики пуску, схеми АВР. Логічна частина 2.2 на основі інформації, яка надходить на її входи, формує і спільно з вихідним органом захисту 2.3 видає керувальні дії в схемі керування вимикачем, пускової та технологічної автоматики і в пристрій збудження.

Одночасно за допомогою сигнального органу 2.4 здійснюється фіксація спрацювання того або іншого захисту та передача інформації оперативному персоналу. Останнє має особливе значення, оскільки раптове, без чіткої ідентифікації причин, вимикання електродвигуна може бути прийняте оператором технологічного процесу як помилкове, що призведе до повторного ввімкнення пошкодженого двигуна в мережу.

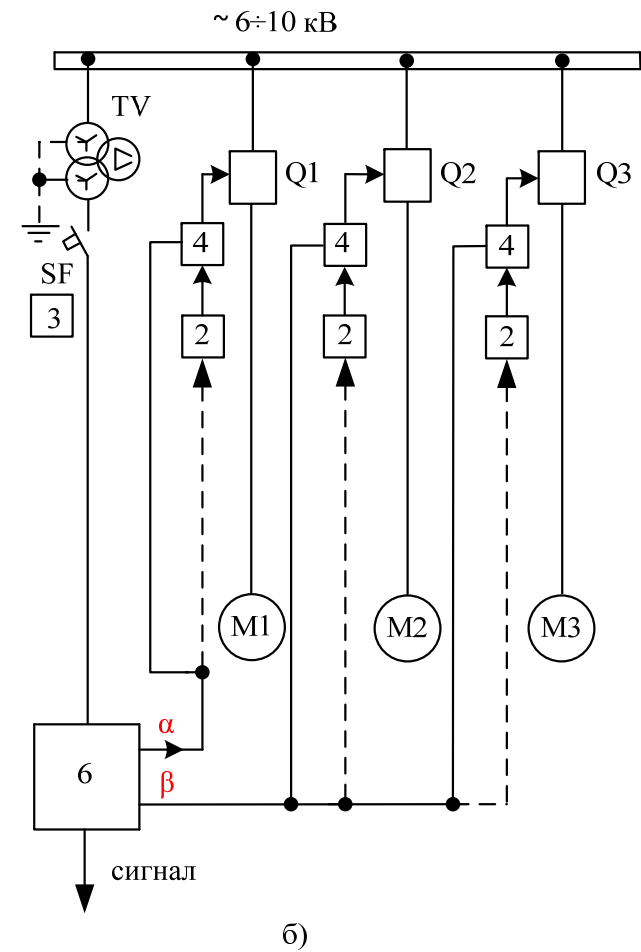
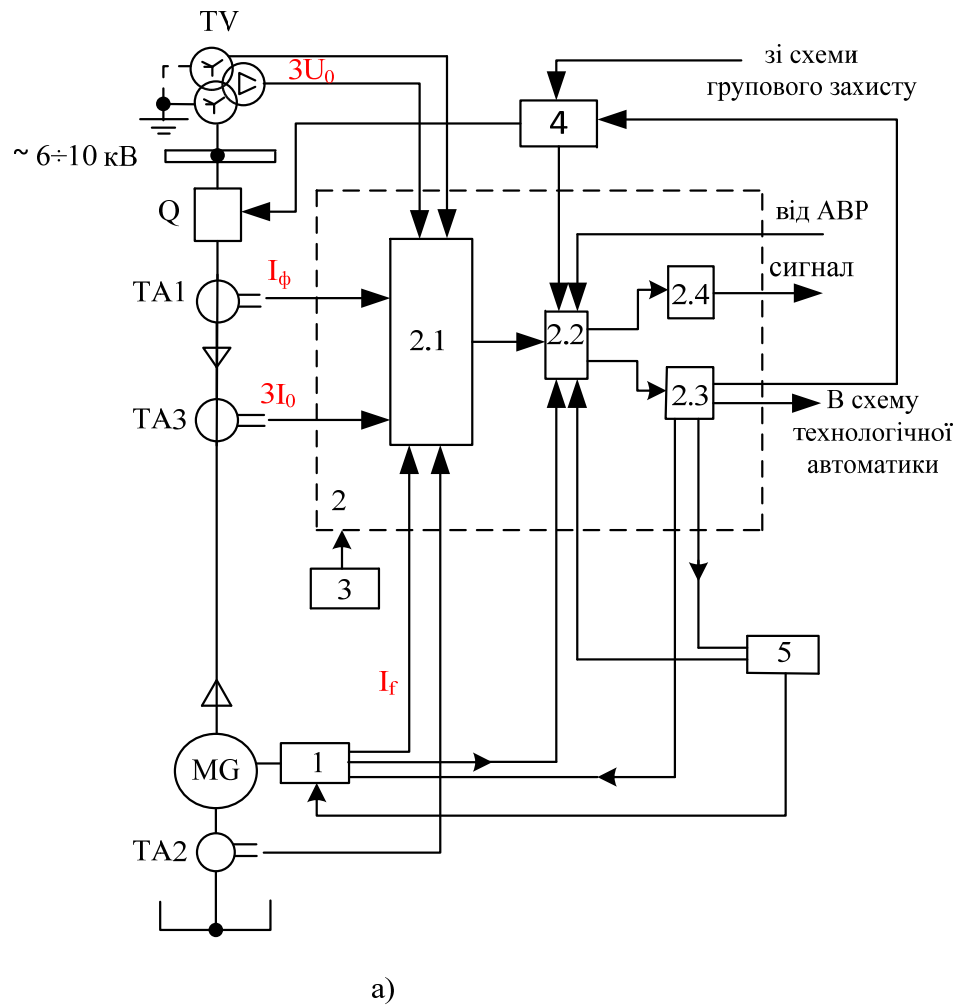


Рисунок 3.1 – Структурні схеми релейного захисту електродвигунів

Для роботи пристрою захисту потрібно мати джерело оперативного струму 3, як таке можна використовувати [1, 2, 4]: трансформатори струму захищеного приєднання та трансформатори напруги і власних потреб (змінний оперативний струм); групові блоки живлення та попередньо заряджені конденсатори, що підключені до трансформаторів струму, трансформаторів напруги та трансформаторів власних потреб РУ, від яких отримує живлення двигун (випрямлений оперативний струм); або акумуляторна батарея.

Груповий захист 6 (див. рис. 3.1, б) контролює такі параметри мережі (наприклад, напругу, частоту, напрямок потужності), які дозволяють робити висновки про небезпеку того чи іншого режиму для групи електродвигунів, що приєднані зазвичай до одної секції збірних шин. В аварійній ситуації груповий захист, як правило, керує всією групою електродвигунів або окремими її підгрупами. Керувальні дії α та β здійснюють гасіння поля синхронного двигуна, вимикання всіх або частини електродвигунів від мережі, використовуючи кола індивідуальних захистів 2 або схеми керування 4 вимикачами Q1, Q2, Q3.

3.2 Вимірювальні трансформатори струму та їх характеристики

Трансформатори струму (ТС) ізолюють релейний захист електродвигунів від кіл високої напруги та знижують первинний струм до значень, зручних для вимірювання.

В електроустановках 6÷10 кВ, зокрема і на приєднаннях електродвигунів, трансформатори струму встановлюються, як правило, в комплектних розподільних установках (КРУ), що зумовлює незначну (порядку 2÷5 м) довжину з'єднувальних проводів від ТС до реле захисту [1, 3]. Трансформатори струму, які призначені для диференціального захисту електродвигунів (на рис. 3.1, а) плече від ТА2 зі сторони нульових виводів обмотки статора), розташовуються в безпосередній близькості від електродвигунів на шинах, які з'єднують обмотку статора в зірку або трикутник. Відстань від цих трансформаторів струму до реле захисту, які розташовані в КРУ, суттєво більша; вона може досягати 200÷500 м. В окремих випадках для підключення захистів електродвигунів використовуються трансформатори струму, які вбудовано в статор. У вітчизняних КРУ встановлюються ТС типів ТПЛ-10, ТПЛУ-10, ТЛК-10, ТВЛМ-10, ТПОЛ-10, ТПЛК-10, ТПЛМ-10 [5, 6].

Похибки трансформаторів струму впливають на роботу захистів електродвигунів, можуть знижувати їх швидкодію. Особливо великі похибки ТС в перехідних режимах, коли в первинному струмі є аперіодична складова. Розрахунок показує, що постійна часу згасання вказаної складової становить в середньому 0,05 с, а у потужних електродвигунах досягає 0,1 с. В цих умовах час існування підвищених похибок перехідного режиму може бути 0,15÷0,3 с, що набагато перевищує

час спрацювання пристроїв релейного захисту. Таким чином, потрібно враховувати похибки трансформаторів струму в усталених та перехідних режимах, причому доцільно мати або відносно прості аналітичні залежності, або графіки [2].

Розрахунками за довідниковими даними сучасних трансформаторів струму встановлено, що в умовах повної похибки $\varepsilon = 10\%$ при синусоїдальному первинному струмі в діапазоні крайностей первинного струму, який відповідає опорам навантаження $Z_H = 0,2 \div 5$ Ом при номінальному вторинному струмі ТС $I_{2ном} = 5$ А, магнітні індукції напруженості магнітного поля можуть знаходитися як вище коліна характеристики намагнічування, так і нижче нього.

3.3 Трансформатори струму нульової послідовності

Інформацію про струм нульової послідовності в первинній мережі, яка потрібна для захисту ЕД від замикань на землю в обмотці статора, можна отримати двома способами [1, 2, 7].

Перший полягає в тому, що спочатку фазні струми, які протікають в колі статора, трансформуються за допомогою звичайних трансформаторів струму у вторинне коло, а потім геометрично додаються (рис. 3.2). Таким чином, струм в реле КА стає рівним

$$\underline{I}_p = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \frac{I_A}{n_c} + \frac{I_B}{n_c} + \frac{I_C}{n_c} + I_{2нб},$$

де n_c – коефіцієнт трансформації трансформаторів струму, що створюють фільтр струмів нульової послідовності;

$I_{2нб}$ – вторинний струм небалансу, що зумовлений неідентичністю трансформаторів струму.

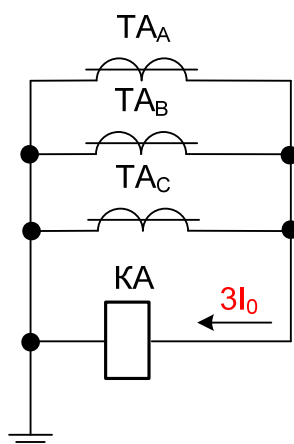


Рисунок 3.2 – Тритрансформаторний фільтр струмів нульової послідовності

В режимах пуску, самозапуску або зовнішнього короткого замикання, коли допускається робота фазних трансформаторів струму з похибкою $\varepsilon = 10\%$, в реле буде протікати струм

$$I_{2\text{нб}} = \frac{I_{\text{max}}'' \cdot \varepsilon}{100 \cdot n_c} = \frac{0,1 \cdot I_{\text{max}}''}{n_c}.$$

Відповідне значення первинного струму $I_{1\text{нб}}$, з урахуванням якого захист має бути налаштований, складе

$$I_{1\text{нб}} = I_{2\text{нб}} \cdot n_c = 0,1 \cdot I_{\text{max}}''.$$

Для синхронних двигунів типу СТД-1250-2 ($U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$) значення $I_{1\text{нб}}$ при зовнішньому трифазному короткому замиканні дорівнює:\

$$I_{1\text{нб}} \approx \frac{1,1 \cdot I_{\text{ном}}''}{x_d''} \cdot 0,1 = \frac{1,1 \cdot 139 \cdot 0,1}{0,138} = 110 \text{ А}.$$

Зрозуміло, що отримати первинний струм спрацювання захисту $I_{\text{сз}} < 5 \text{ А}$, який складає одиниці та частки відсотка фазного струму електродвигуна, за допомогою фільтра струмів нульової послідовності (СНП), який складається з трьох ТС, практично неможливо. З цієї причини визначення струму нульової послідовності розглянутим способом отримало розповсюдження тільки в схемах захисту від замикань на землю електродвигунів, які працюють в мережах з нейтраллю, що заземлена через резистор або наглухо.

Другий спосіб засновано на використанні трансформатора струму нульової послідовності (ТСНП), який являє собою замкнений магнітопровід з намотаною на ньому вторинною обмоткою. Первинною обмоткою є три фази одного або декількох кабелів, які проходять через вікно магнітопроводу. Магнітні потоки Φ_A , Φ_B і Φ_C , які зумовлені струмами фаз I_A , I_B та I_C , наводять ЕРС у вторинній обмотці ТСНП.

Залежно від кількості кабелів, які живлять електродвигун, і типу реле захисту від замикань на землю встановлюється один або декілька однокабельних ТСНП або один ТСНП з підмагнічуванням змінним струмом (ТНП).

Однокабельні ТСНП, які розраховані на охоплення магнітопроводом тільки одного кабелю діаметром до 75 мм, залежно від конструктивного виконання, поділяються на нероз'ємні (типів ТЗЛ і ТЗЛМ) та роз'ємні (типу ТЗРЛ). Останні за рахунок роз'ємного осердя дозволяють здійснювати монтажні операції з ТСНП та кабелями без демонтажу кабельної воронки.

Незважаючи на те, що трансформатор струму нульової послідовності є дуже добрим фільтром струмів нульової послідовності, в ньому має місце

небаланс, який не перевищує $0,3 \div 1$ А первинних. Струми небалансу, що протікають по вторинній обмотці трансформатора струму нульової послідовності, в умовах коли $I_A + I_B + I_C = 0$, виникають завдяки різній взаємоіндукції між кожним фазним проводом кабелю та вторинною обмоткою. Деякий вплив чинить магнітна несиметрія осердя та несиметрія геометричного взаєморозташування фаз відносно вторинної обмотки ТСНП. За відсутності замикання на землю ЕРС, яка наводиться у вторинній обмотці ТСНП, зумовлена підсумковим потоком розсіювання, що замикається через повітря та зчіплюється зі вторинною обмоткою.

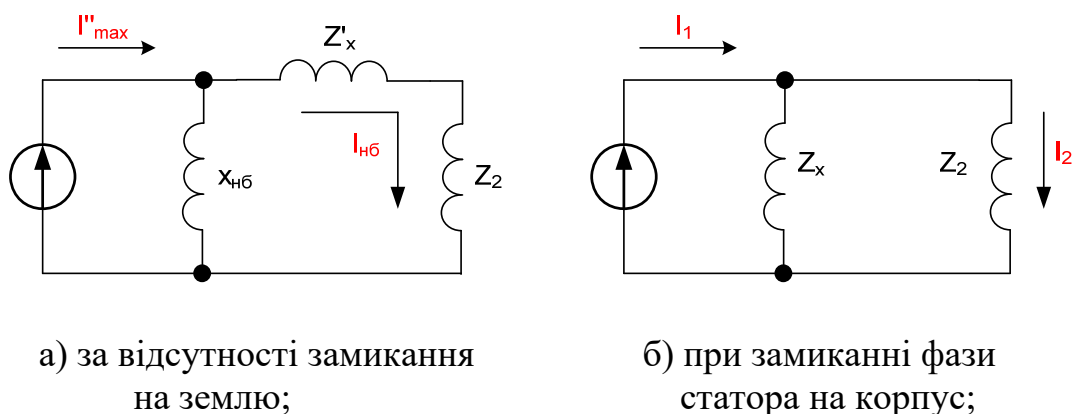


Рисунок 3.3 – Заступна схема трансформатора струму нульової послідовності

Відповідний опір в заступній схемі (рис. 3.3, а) позначено $x_{нб}$. Потік, який повністю замикається по осердю трансформатора струму нульової послідовності, зчеплений тільки зі вторинною обмоткою і тому зумовлений ним опір холостого ходу Z'_x є опором самоіндукції цієї обмотки і відіграє роль навантаження трансформатора струму нульової послідовності. Таким чином, вторинне коло з заступної схеми зображається сумарним опором Z'_2 , який складається з опору Z'_x і опору реле та з'єднувальних проводів Z_2 . Відсутність в заступній схемі опору первинної обмотки пояснюється тим, що трансформатор струму нульової послідовності підключено до джерела струму з надто значним внутрішнім опором. Значення вторинного струму небалансу з достатньою точністю визначається за виразом [7]

$$I_{2нб} = \frac{I''_{max} \cdot x_{нб}}{Z'_x + Z_2 + x_{нб}} \approx \frac{I''_{max} \cdot x_{нб}}{Z'_x + Z_2}. \quad (3.1)$$

Мінімальне значення небалансу на виході трансформатора струму нульової послідовності та задовільна передача інформації про струм замикання на землю можуть мати місце тільки при ретельному монтажі ТСНП, який має відповідати двом основним вимогам:

1) вплив кожної складової суми струмів трьох фаз приєднання має бути рівноцінним;

2) унеможливити вплив сторонніх струмів, якщо їх значення сумірне зі струмом нульової послідовності приєднання.

Кабельні трансформатори струму нульової послідовності мають магнітопровід, форма якого така, що поля розсіювання невеликі. Вторинна обмотка секціонована і складається з двох частин, які розташовані на протилежних сторонах магнітопроводу. Розташування струмоведучих жил кабелю відносно вторинної обмотки трансформатора струму нульової послідовності майже симетричне. При встановленні трансформатора струму нульової послідовності на кабель зі сталеву оболонкою заходів з симетрування не потрібно, оскільки ця оболонка виконує функції вирівнювального екрана.

У тих випадках, коли кабелі не мають сталеву оболонку і від захисту потрібна висока чутливість (зокрема, при використанні для захисту від замикань на корпус пристрою типу ЗЗП-1), потрібно екранувати кабель однократним обгортанням його куском жерсті, довжина виступаючої частини якого по сторонах трансформатора струму нульової послідовності має бути не менша 150 мм.

Виконання другої вимоги пов'язано з необхідністю усунення впливу струмів, які протікають по оболонці кабелів (блукаючих струмів в землі), і з захистом від електромагнітних полів струмів, що проходять поблизу місця встановлення трансформатора струму нульової послідовності. Для того, щоб струми в оболонці кабелю не призводили до появи додаткової ЕРС на вторинній обмотці трансформатора струму нульової послідовності, до кабельної воронки, що з'єднана з оболонкою кабелю та ізольована від заземлювальних конструкцій, приєднується ізольований заземлювальний провід, який пропускається через вікно трансформатора струму нульової послідовності, а потім приєднується до заземлювальної конструкції. Найменший вплив електромагнітних полів струмів, зокрема і струмів навантаження, забезпечується вибором місця встановлення ТСНП на відстані не менше 0,5÷1 м від воронки. Однак в більшості серійних КРУ таке взаємне розташування кабельної воронки і трансформатора струму нульової послідовності неможливе. Тому у випадку, коли потрібно забезпечити високу чутливість захисту, доводиться застосовувати екранування.

При замиканні на землю в електродвигунах або в мережі, коли в первинному колі з'являється струм нульової послідовності, заступна схема трансформатора струму нульової послідовності відповідає рисунку 3.3, б. Тут опір намагнічування трансформатора струму нульової послідовності Z_x пропорційний магнітній проникності сталі магнітопроводу і залежить від величини струму нульової послідовності та опору Z_2 .

При малих первинних струмах i , відповідно, малих значеннях індукцій Z_x практично має характер активного опору. Зі зростанням первинного

струму активна та індуктивна складові намагнічування також зростають. Починаючи з деякого значення I_1 (приблизно 10 А), при якому індуктивний опір досягає найбільшого значення, подальше збільшення первинного струму не призводить до зростання активної складової z_x , а індуктивна знову починає зменшуватися.

Трансформатори струму нульової послідовності, які працюють при дуже низьких значеннях індукцій, мають незначну вихідну потужність. При первинних струмах 0,2÷0,5 А серійні трансформатори струму нульової послідовності віддають потужність порядку 10^{-6} ВА. Найбільша вихідна потужність теоретично має місце при $z_x = z_2$. Однак величина $z_x \neq \text{const}$ і суттєво відрізняється на різних екземплярах однотипних трансформаторів струму нульової послідовності. Це призводить до того, що умова видачі максимальної потужності при замиканнях на землю практично не забезпечується, а одному і тому ж самому первинному струму спрацьовування захисту відповідають різні значення струму спрацьовування одних і тих же реле, що підключені до різних ТСНП одного типу.

На багатокабельних лініях до електродвигунів трансформатори струму нульової послідовності під'єднуються послідовно або паралельно. Для захисту типу ЗЗП-1, наприклад, рекомендуються змішані з'єднання, які наведені на рисунку 3.4.

Трансформатори струму нульової послідовності з підмагнічуванням (ТНП) охоплюють всі кабельні лінії до електродвигунів. Через особливості конструкції ТНП не встановлюють в КРУ, а розташовують або в кабельному півповерсі під відповідною коміркою КРУ, або безпосередньо у лінійних виводах електродвигунів. На кожному з двох однакових, шихтованих з електротехнічної сталі, прямокутних осердях розташовані дві пари секцій вторинної обмотки (рис. 3.5, а): $w_B^{(1)}$, $w_B^{(3)}$ і $w_B^{(2)}$, $w_B^{(4)}$, з'єднані послідовно, а пари секцій з'єднані між собою паралельно. Обидві половинки трансформатора струму нульової послідовності з підмагнічуванням розташовані одна під іншою. Така конструкція ТНП забезпечує максимально можливе обмеження струмів небалансу, які виникають через просторові несиметрії магнітних потоків первинного кола, а також під впливом зовнішніх магнітних полів. Незважаючи на це, небаланс трансформаторів струму нульової послідовності з підмагнічуванням суттєво більший, ніж у кабельних ТСНП без намагнічування. Технічні дані трансформаторів струму, які використовуються для захисту електродвигунів, типів ТНП-4 та ТНП-7 наведені в таблиці 3.1.

Використання в цих ТНП підмагнічування магнітопроводу струмом промислової частоти дозволяє збільшити потужність, яку віддає ТНП, і обмежити струми небалансу. Підмагнічування підвищує магнітну проникність сталі магнітопроводу і тим самим збільшує z_x (рис. 3.5, б). З характеристики видно, що без підмагнічування ТНП працює в діапазоні

невеликих індукцій, в початковій частині характеристики, і ЕРС E_2 на вторинній обмотці невелика. Щоб магнітний потік від струму підмагнічування не викликав появи ЕРС на вторинній обмотці, обмотка підмагнічування секціонована, розташована на двох частинах магнітопроводу, причому секції $\omega_{II}^{(1)}$ і $\omega_{II}^{(2)}$, які мають однакову кількість витків, з'єднані послідовно–зустрічно. Створені ними магнітні потоки зрівноважені і не впливають на вторинний струм ТНП. Живлення кіл підмагнічування ТНП здійснюється від трансформатора напруги (ТН) з такого розрахунку, щоб його навантаження не перевищувало допустимого значення.

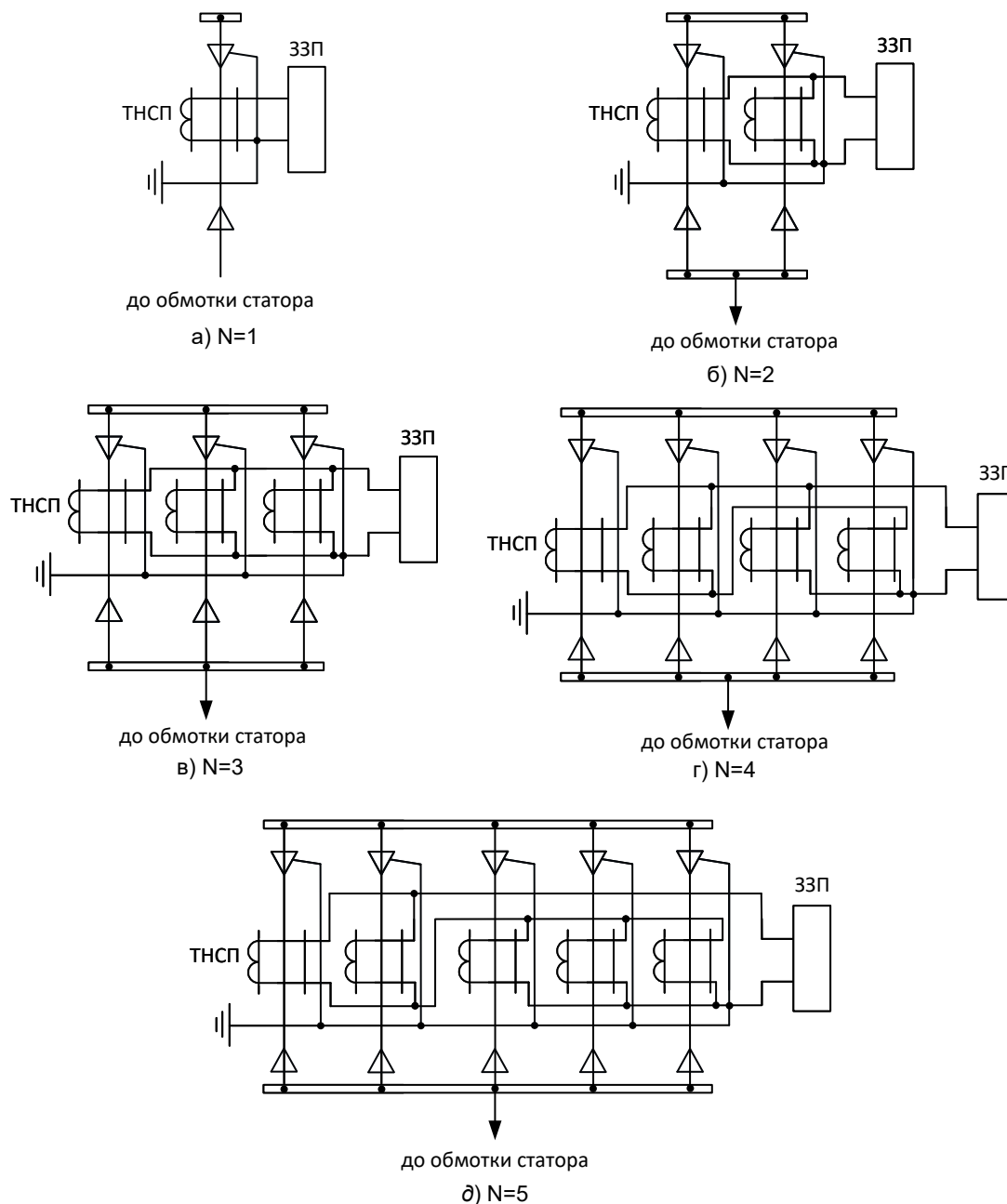
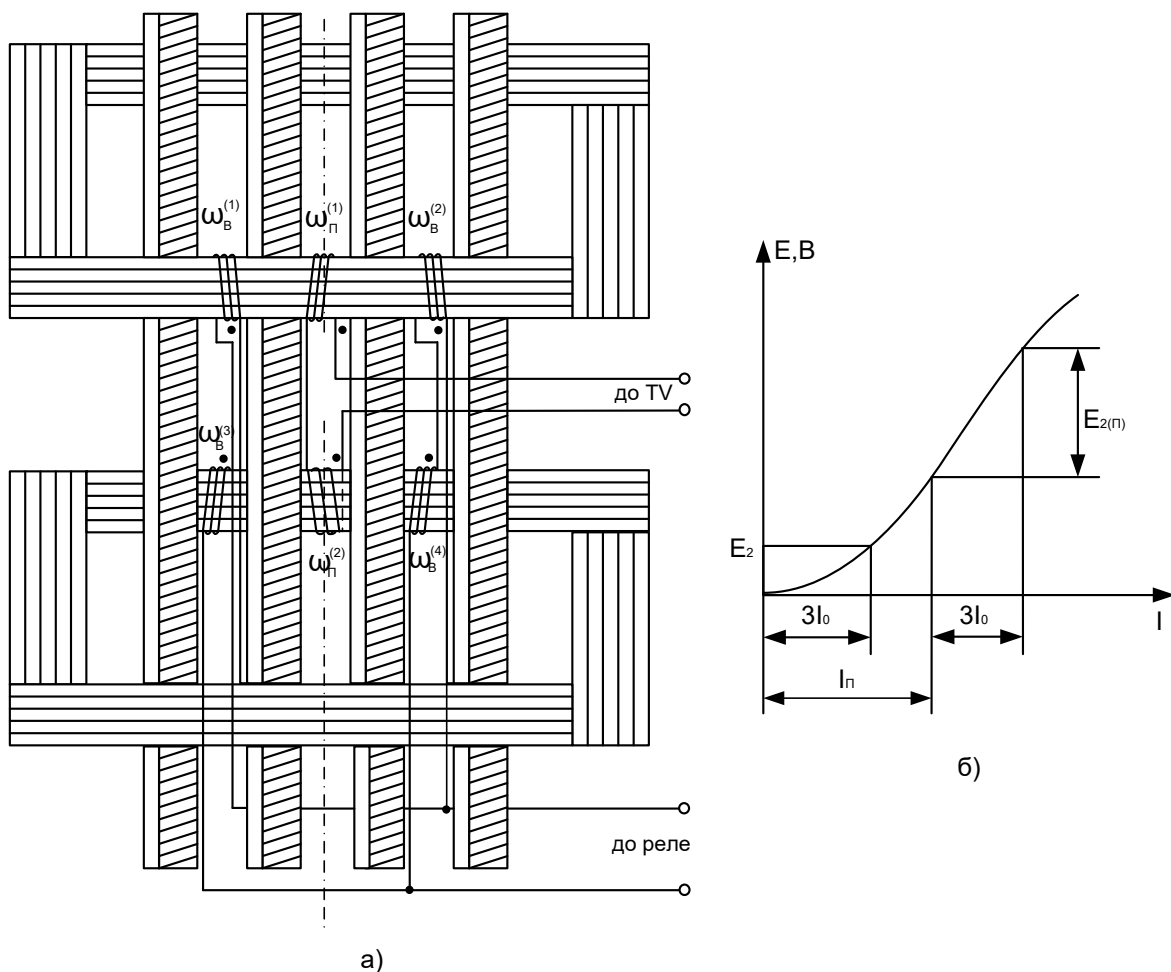


Рисунок 3.4 – Схеми з'єднання трансформаторів струму нульової послідовності для захисту типу ЗЗП-1 при різній кількості N кабелів до електродвигунів



$\omega_B^{(1)}, \omega_B^{(2)}, \omega_B^{(3)}, \omega_B^{(4)}$ – секції вторинної обмотки;
 $\omega_{\Pi}^{(1)}, \omega_{\Pi}^{(2)}$ – секції обмотки підмагнічування;
 I_{Π} – струм підмагнічування;

$E_{2(\Pi)}$ – ЕРС на вторинній обмотці при замиканні на корпус та наявності підмагнічування; E_2 – те ж без підмагнічування

Рисунок 3.5 – Трансформатор струму нульової послідовності з підмагнічуванням (а) та його характеристика намагнічування (б)

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики трансформатора струму нульової послідовності з підмагнічуванням

Тип	Число охоплених кабелів	Коло підмагнічування		ЕРС небалансу у вторинному колі,		Опір намагнічування, який приведено до вторинного кола, $Z_{e.нам}$	Число витків вторинної обмотки w_2
		Номинальна напруга, В	Споживана потужність, ВА	від підмагнічування $E_{нб.підм}$	від несиметричного розташування струмопроводів $E_{нб.нс}$		
ТНП-4	3-4	110	45	130	17	10	20
ТНП-7	5-7	110	50	150	14	10	27

Враховуючи, що обрив цього кола не призводить до неправильної дії захисту, а лише загрубляє його, контроль справності кола підмагнічування з метою спрощення не передбачають.

3.4 Вимірювальні органи захисту

До вимірювальних органів (ВО) захистів електродвигунів висувають такі загальні вимоги [1, 2].

1. *Точність дії*, яка характеризується основною похибкою за параметром спрацьовування. В релейному захисті зазвичай використовують вимірювальні органи з класом точності 5 і 10, що добре узгоджується з класами точності трансформаторів струму та напруги, до яких підключаються захисти електродвигунів. Точність дії впливає на параметри спрацьовування і, в кінцевому рахунку, на чутливість захисту, тому що зі зростанням точності скорочується зона вимірювання контрольованої величини, в якій захист не відрізняє аварійний режим роботи електродвигуна від нормального.

2. *Швидкодія*. Цей параметр особливо важливий для вимірювальних органів захистів від КЗ, що пояснюється загрозою пожежі, руйнуванням електродвигуна електричною дугою тощо. В окремих випадках потрібна висока швидкодія захисту від замикань на землю за умовами стійкості навантаження. Час спрацьовування вимірювального органу нормується при визначених значеннях вхідних сигналів.

3. *Коефіцієнт повернення* є одним з визначальних показників вимірювальних органів захистів, які мають витримку часу та налаштовуються від нормального режиму навантаження: струмових захистів від перевантаження та асинхронного режиму, захисти від втрати живлення.

4. *Споживана потужність* нормується за вхідними колами (струму і напруги) та колами живлення. Зниження споживаної потужності у вхідних колах дозволяє зменшити похибки трансформаторів струму та напруги, спростити кола вимірювальних органів, полегшити конструкцію захисту. Разом з цим підвищення точності дії вимірювального органу у окремих випадках досягається за рахунок збільшення споживаної потужності в колах живлення.

Вимірювальні реле струму. Вимірювальні органи струмових захистів електродвигунів виконуються електромеханічними або безконтактними максимальними реле струму. Реле підключаються безпосередньо в кола вторинних обмоток ТС, встановлених у фазах, – для захистів, які реагують на підвищення струму статора, трансформатора струму нульової послідовності – для захисту від замикання на корпус.

Дія електромеханічних реле заснована на електромагнітному або індукційному принципі [1–4].

Реле напруги. У захисті електродвигунів від втрати живлення, також від зниження напруги, який виконано з електромеханічними реле, застосовуються, в основному, реле мінімальної напруги непрямої дії типу РН-54/160. Реле прямої дії, яке суміщає вимірювальні реле напруги та орган витримки часу серії РНВ (або РНВЛ), має мало придатні для цього характеристики. Воно має тільки одне виконання з часом дії менше чотирьох секунд, похибки за напругою спрацювання та повернення досягають 100%, це реле складне в налагоджуванні та експлуатації. Тому РНВЛ використовується тільки в захисті електродвигунів невідповідальних механізмів.

Реле зниження частоти. Основним вимірювальним реле захисту синхронних двигунів від втрати живлення є напівпровідникове реле зниження частоти типу РЧ-1, яке підключається до трансформатора напруги. Реле зберігає спроможність працювати при змінюванні напруги мережі в діапазоні $(0,2 \div 1,3)U_{\text{ном}}$; частота спрацювання при цьому змінюється на 0,3 Гц.

Реле направлення потужності. Для фіксації припинення подавання до електродвигунів активної потужності зі сторони джерела електропостачання в типовій схемі захисту від втрати живлення використовується реле направлення потужності типу РБМ-171, яке виконано за індукційним принципом.

Реле має дві системи обмоток: струму та напруги, які розташовані на чотирьополісній магнітній системі, в зазорі якої може обертатися легкий алюмінієвий циліндричний ротор. Обертний момент реле [1, 2, 4]

$$M_{\text{об}} = K \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi_p + \alpha) = K \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi - \varphi_{\text{мч}}),$$

де U_p і I_p – напруга та струм, які підводяться до реле;

K – коефіцієнт пропорційності;

$\varphi_{\text{мч}} = -\alpha$ – кут максимальної чутливості реле, який в реле типу РБМ-171/1 може бути встановлено рівним $(-30 \pm 5)^\circ$ або $(-45 \pm 5)^\circ$.

Якщо прийняти $\underline{U}_p = \underline{U}_{\text{вс}}$ та $\underline{I}_p = -\underline{I}_c$, то, з урахуванням $U_{\text{вс}} = \sqrt{3} \cdot U_c$ при $\varphi_{\text{мч}} = -30^\circ$, отримаємо

$$M_{\text{об}} = K \cdot \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I_c \cdot \cos \varphi = K \cdot \sqrt{3} \cdot P.$$

Таким чином, в нормальному режимі роботи мережі, коли електродвигун отримує живлення від джерела, обертний момент реле додатний і контакти реле замкнені. При втраті живлення, наприклад, при вимиканні вимикача Q , активна потужність в контрольованій точці стає

рівною нулю, і реле розмикає свої контакти. Мінімальна потужність спрацювання реле при номінальному струмі складає 3 ВА. Потужність, яка споживається в колах струму, не більше 10 ВА, а в колах напруги – 40 ВА. Реле правильно визначає напрямок потужності при номінальній напрузі та струмі не менше $0,2 I_{\text{ном}}$.

Час розмикання контактів при скиданні до нуля струму або при зміні напрямку потужності не перевищує 0,05 с.

3.5 Елементи логічної частини захистів

Реле часу. Для створення незалежного від значення вхідного сигналу вимірювального органу уповільнення дії захистів електродвигунів в серійних пристроях захисту використовуються електромеханічні реле часу серій РВ-100 та РВ-200, а також напівпровідникові реле типу ВЛ-34.

Реле ВЛ-34 має діапазон витримок часу $1 \div 100$ с, клас точності – 2,5. При знятті напруги вся схема повертається в початковий стан за час, який не перевищує 0,2 с.

Споживана потужність реле на постійному оперативному струмі порядку 8 Вт, а на змінному – не більше 10 ВА.

Проміжні реле. Вони використовуються в типових схемах захистів електродвигунів для передачі команд з одних кіл в інші та комутації кіл з великим споживанням.

Ці реле мають декілька пар контактів, що дає можливість одночасно змінювати стан групи кіл.

Реле типів РП-23 (на постійному оперативному струмі) та РП-25 (на змінному оперативному струмі) виконані на магнітній системі клапанного типу. Реле має чотири замикальних та один розмикальний контакт. Споживана потужність реле типу РП-23 не більше 6 Вт, час спрацювання не перевищує 0,06 с.

Аналогічний принцип дії та призначення має проміжне реле серії РПУ-2, яке заміняє реле типів РП-23 та РП-25. Воно має менше споживання – 4 Вт (для реле постійного струму) і більшу швидкодію – 0,05 с для постійного та 0,038 с для змінного оперативного струму.

Проміжні реле типів РП-251 та РП-252 встановлюють в схемах захистів на постійному та змінному оперативному струмі, де потрібне незначне уповільнення при спрацюванні (РП-251) або поверненні. В конструкції реле розташовані мідні демпферні шайби, які забезпечують потрібну витримку в перемиканні контактів. Змінюванням кількості шайб час уповільнення може регулюватися: від 0,07 с до $0,11 \div 0,14$ с у реле типу РП-251 та від 0,5 с до $1,1 \div 1,4$ с у реле типу РП-252. При спрацюванні реле

споживає потужність $6 \div 8$ Вт. У реле є п'ять контактів. Аналогом реле типу РП-252 на змінному оперативному струмі є реле типу РП-256.

Проміжне реле типу РП-341 використовується в типових схемах захистів ЕД на змінному оперативному струмі там, де необхідне дешунтування електромагніта вимикання вимикача. Реле має два перемикальних контакти, один з яких – підсиленої потужності, що здатний шунтувати та дешунтувати кероване коло ТС при вторинних струмах до 150 А. Тривалий допустимий струм через контакти складає 5 А. Час спрацювання реле при двократному струмі уставки не перевищує 0,06 с.

3.6 Сигнальні органи захистів електродвигунів

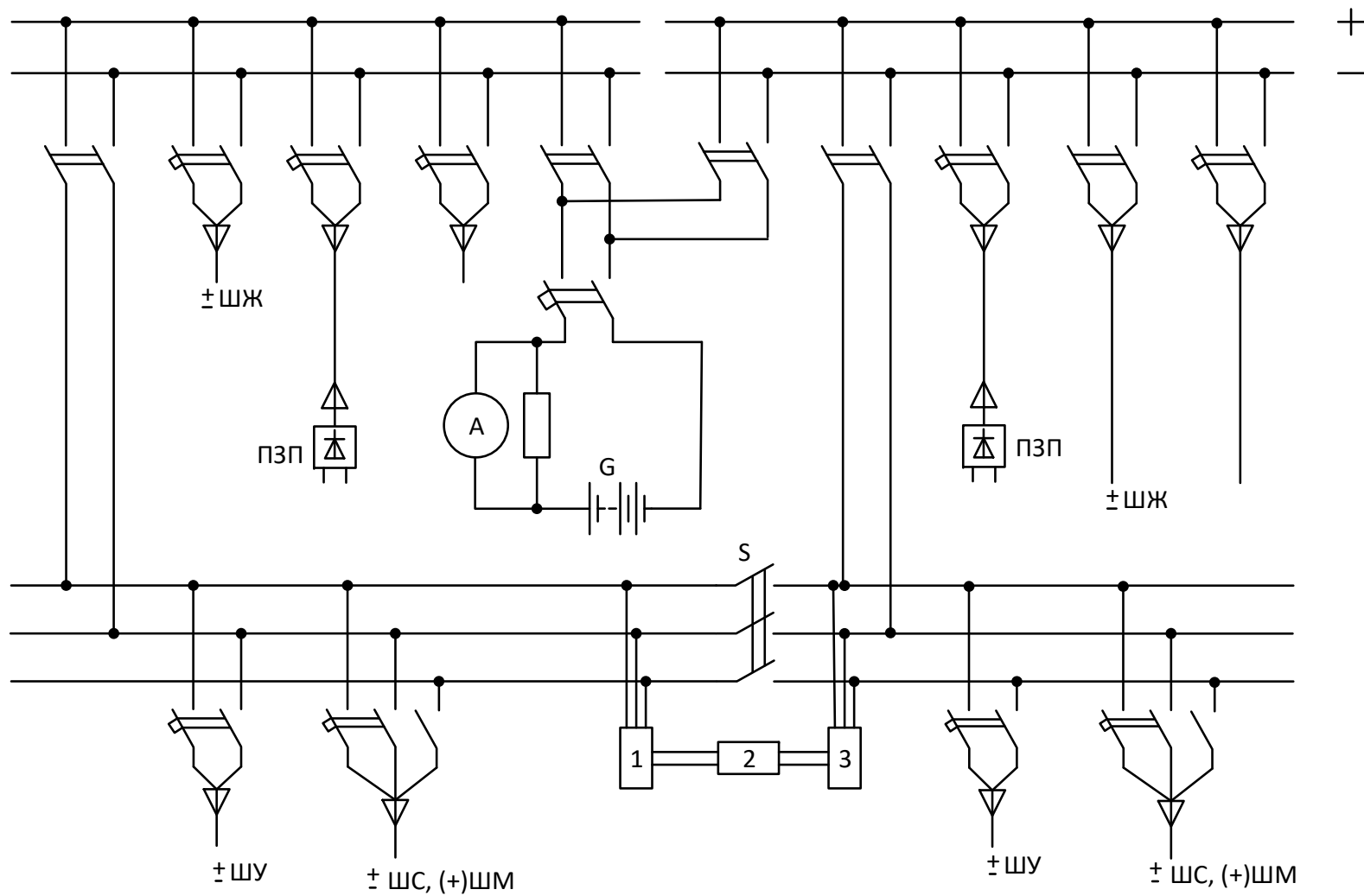
Як сигнальний орган захистів електродвигунів, які виконані на електромагнітних реле, використовується вказівне реле типу РУ-1. Найчастіше в захистах електродвигунів застосовується послідовне увімкнення струмової обмотки реле типу РУ-1 з контактом вимірювального або логічного реле кожного захисту, який діє або безпосередньо на електромагніт вимикання вимикача, або на загальне для усіх захистів вихідне проміжне реле. В захистах, які діють на «сигнал», встановлюють вказівне реле з котушкою напруги.

Реле типу РУ-1 має електромагнітний привод і ручне повернення. Час спрацювання реле складає не більше 0,05 с. Найбільший струм увімкнення та тривало допустимий струм контактів 4 А. Потужність, яка споживається реле при спрацюванні, для реле зі струмовою обмоткою на постійному струмі 0,25 Вт, а з обмоткою напруги 1,75 Вт. Реле можуть працювати в колі як постійного, так і змінного оперативного струму.

3.7 Пристрої оперативного струму

Для живлення кіл захистів електродвигунів на електростанціях використовується постійний оперативний струм від акумуляторної батареї. На підстанціях та розподільних установках промислових підприємств поряд з постійним оперативним струмом широко застосовується система випрямленого оперативного струму (СВС). На міських теплових станціях і на деяких промислових підстанціях захист ЕД здійснюється на змінному оперативному струмі. Найбільш надійно, як показує досвід експлуатації, працюють акумуляторні батареї (АБ) та СВС.

Постійний оперативний струм. Джерелом оперативного струму є зазвичай акумуляторні батареї типу СК, які мають задовільні техніко-економічні показники та довговічність. Мережа оперативного струму спрощено наведена на рис. 3.6.



1, 3 – контроль напруги та пристрій миготливого світла; 2 – вимірювання і контроль ізоляції

Рисунок 3.6 – Спрощена схема мережі постійного струму

В нормальному режимі живлення шинок управління \pm ШУ, шинок сигналізації \pm ШС здійснюється від агрегата ПЗП, який виконує також функції під зарядного пристрою для батарей. Номінальна напруга на загальних шинах щита постійного струму звичайно 220 В. При короткому замиканні в мережі 6÷10 кВ, якщо напруга на виході ПЗП знизилася, кола захисту, управління та сигналізації отримують живлення від акумуляторної батареї.

Система випрямленого оперативного струму (СВС) на підстанціях та розподільних установках з підключеними до шин 6÷10 кВ високовольтними електродвигунами складається з двох частин.

Перша частина являє собою відповідним чином з'єднані між собою випрямні блоки живлення типів БПТ-1002, БПНС-2 і БПН-1002 [2]. На рисунку 3.7 наведена ця частина системи випрямленого оперативного струму для цехової розподільної установки промислового підприємства.

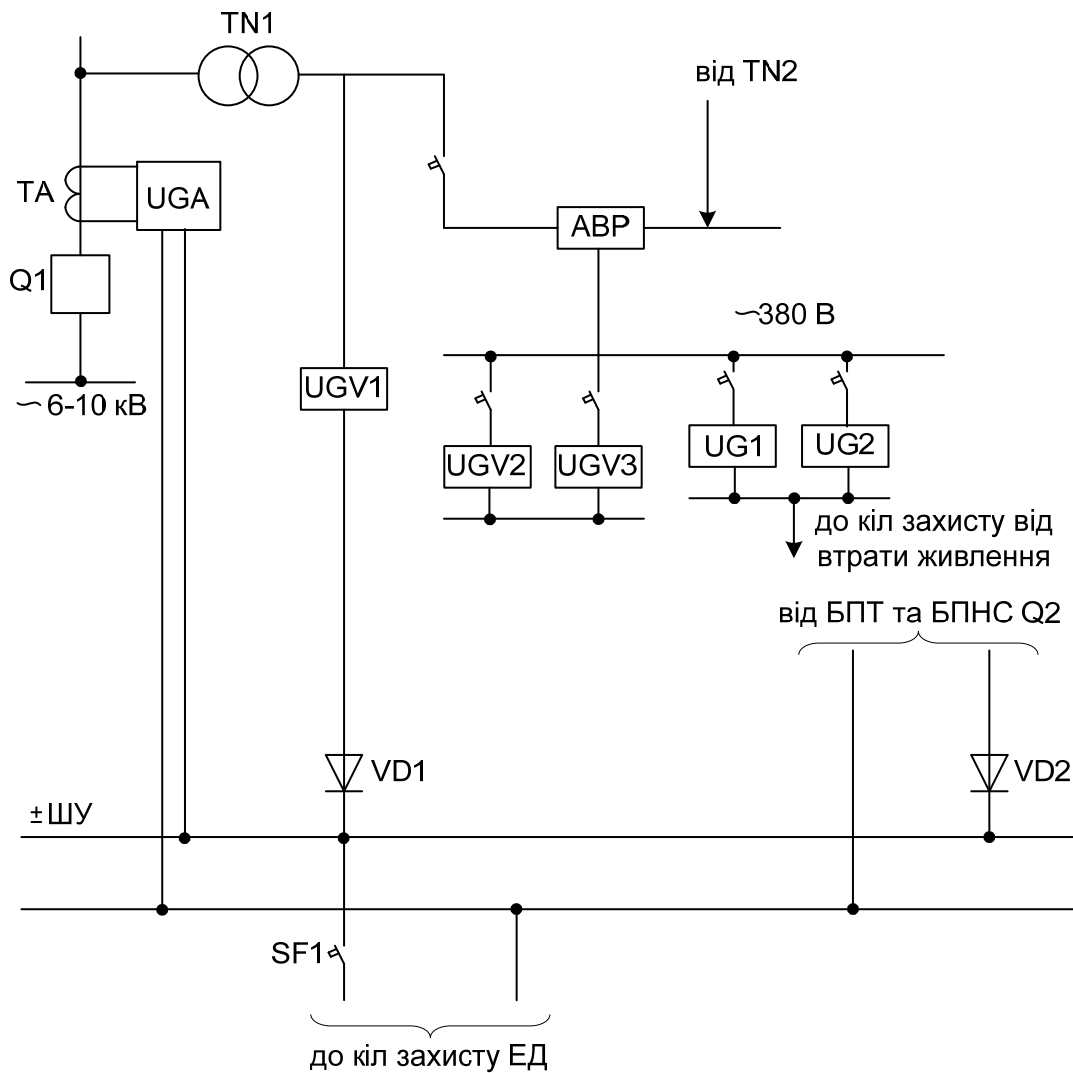
Кола оперативного струму релейного захисту електродвигунів, за винятком захисту від втрати живлення, підключені до шинок \pm ШУ в КРУ через автомат SF1, загальний для кіл захисту та управління. В свою чергу шинки \pm ШУ створюються паралельним з'єднанням двох блоків напруги типу БПНС-2, які отримують живлення від трансформаторів власних потреб TN1, TN2, і струмових блоків типу БПТ-1002, підключених звичайно до вторинної обмотки трансформатора струму фази В, який встановлено в комірці вимикача вводу на секцію шин. Діоди VD1 і VD2 служать для розділення кіл блоків БПНС-2 для уникнення підживлення пошкодженого блока зі сторони непошкодженого. Створений таким чином груповий комбінований блок (БПТ+БПНС) забезпечує надійне живлення оперативних кіл захисту електродвигунів при всіх несиметричних КЗ (від блоків БПНС-2) і тих трифазних КЗ, які супроводжуються протіканням через первинну обмотку трансформатора струму, більшого, ніж струм надійної роботи $I_{н.р.}$ блока БПТ-1002.

Друга частина призначена для підключення кіл захисту від втрати живлення, в яку входять попередньо заряджені від блока живлення та заряду типу БПЗ-401 конденсатори типу МГБП, що входять в блок типу БК-400. Блок живлення та заряду підключається до загальних шин 380 В власних потреб.

Найбільш економічним, але і менш надійним з точки зору забезпечення живлення захисту електродвигунів є змінний оперативний струм. Не враховуючи схеми захисту електродвигунів від багатofазних КЗ з реле прямої дії, які не вимагають ніяких пристроїв оперативного струму, пристрої захисту виконуються [2, 4, 7] з:

- застосуванням дешунтування електромагнітів вимикання вимикачів (захисти від міжфазних КЗ);
- живленням від шинок 1ШУ, 2ШУ, які створено вихідними колами трансформаторів власних потреб (захисти від замикань на корпус, від перевантаження та асинхронного режиму);

– живленням від шинок ШМН, які створено вихідними колами шинних трансформаторів напруги (захист мінімальної напруги).



- Q1 – вимикач;
- TM1 – трансформатор власних потреб;
- ТАВ – трансформатор фази В;
- АВР – пристрій автоматичного введення резерву;
- UGA – блок живлення типу БПТ – 1002;
- UGV1 – блок живлення типу БПНС – 2;
- UGV2, UGV3 – блоки живлення типу БПН – 1002;
- UG1, UG2 – блоки живлення та заряджання типу БПЗ – 401

Рисунок 3.7 – Спрощена схема системи випрямленого оперативного струму

4 ВИКОНАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

4.1 Загальні технічні вимоги

Основними задачами релейного захисту електродвигунів є [1, 2]:

- своєчасне виявлення електричних пошкоджень (бажано на ранніх стадіях їх виникнення і розвитку) в електричних двигунах та пусковій апаратурі, а також небезпечних для них ненормальних режимів;
- формування і видача керувальних впливів на комутаційні апарати, систему збудження, приводні механізми та пускову апаратуру, які дозволили б зменшити об'єми руйнувань, відключити лінію з пошкодженим електродвигунами від мережі живлення, не допустити розвиток небезпечного ненормального режиму, забезпечити можливо менший простій та швидке відновлення нормальної роботи технологічних ліній і окремих механізмів.

Ці задачі конкретизуються в загальних технічних вимогах до релейного захисту, його видах та способах здійснення. Згідно з правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) для асинхронних і синхронних двигунів напругою вище 1 кВ мають передбачатися такі види захистів [4, 7]: від багатофазних замикань в обмотці статора, від однофазних замикань фази обмотки статора на землю (корпус), перевантаження, втрати живлення, короткочасного або тривалого зниження напруги, а також (для синхронних двигунів) від асинхронного режиму. Крім цих захистів, в тих випадках, коли за умовами роботи мережі живлення не унеможлиблюється тривала небезпечна несиметрія напруги на затискачах електродвигунів, доцільно передбачити відповідний захист від цього режиму.

Ефективне функціонування релейного захисту забезпечується селективністю, швидкодією, чутливістю. Під селективністю для захистів електродвигунів від багатофазних і однофазних замикань на корпус в обмотці статора розуміють забезпечення вимикання за короткий час усіх замикань на захищуваній ділянці, а також властивість не спрацьовувати при зовнішніх пошкодженнях і аномальних режимах. Неселективне вимикання електродвигуна, особливо при пуску та самозапуску, не тільки порушує технологічний процес, але й може призвести до пошкодження самого двигуна. Вимогу швидкості вимикання звичайно відносять тільки до захистів від багатофазних замикань. Мінімальний час локалізації пошкодження з урахуванням власного часу дії захисту та повного часу вимикання вимикача 6÷10 кВ складає приблизно 0,15÷0,18 с. Для захистів від однофазних замикань на корпус, якщо це необхідно для забезпечення неспрацювання при зовнішніх замиканнях на землю, допустимо мати витримку часу 1÷2 с.

Вимоги до чутливості захистів електродвигунів наведені в ПУЕ. Для захистів від багатофазних замикань в обмотці статора задають найменший

коефіцієнт чутливості при двофазних металевих коротких замиканнях на виводах електродвигунів, а для захистів від однофазних замикань на корпус – найбільше допустиме значення первинного струму спрацювання.

Відмова захисту електродвигуна, як правило, призводить до дуже важких наслідків, особливо для самого електродвигуна. Це пояснюється тим, що захист суміжної ділянки мережа – збірні шини, до якої підключена лінія до електродвигуна, або нечутливий до КЗ в двигуні, або має за умовою селективності з захистами ліній, що відходять від збірних шин, витримку часу $1 \div 2$ с. Затримка у відключенні КЗ веде до розвитку аварії, значного збільшення об'єму руйнування, пожежі та пошкодження механізму, а пов'язане з цим зниження напруги на затискачах інших електроприймачів може повністю порушити роботу технологічних агрегатів і ліній. Захисти електродвигунів мають бути прості і зручні в обслуговуванні, а їх довговічність має бути не меншою терміну служби самого електродвигуна.

4.2 Захист від замикання на землю (корпус) в обмотці статора

Згідно з ПУЕ захист від однофазних замикань на землю (ОЗЗ) в обмотці статора передбачається для електродвигунів номінальною потужністю більше 2000 кВт при сумарному ємнісному струмі в мережі, до якої підключено електродвигуни, більшому або рівному 5 А. На електродвигунах меншої потужності з метою спрощення вважалося достатнім встановлювати захист при сумарному ємнісному струмі мережі 10 А і більше. Таке рішення, що до недавнього часу було типовим, призводило, як виявив досвід експлуатації, до того, що електродвигуни потужністю до 2000 кВт були практично не захищеними ні від однофазних, ні від подвійних (одне в фазі В обмотки статора, інше – в мережі) замикань на землю. Результатом неусунутих своєчасно замикань на землю було значне число пошкоджень електродвигунів, а саме: всередині двигуна виявлялися декілька (три і більше) згорівших секцій обмотки статора. Подібні випадки сприяли розповсюдженню єдиної умови встановлення захисту від замикань на землю на електродвигунах незалежно від їх номінальної потужності. Як критерій зараз приймається значення сумарного ємнісного струму замикання на землю, яке дорівнює 5 А.

При $I_{\Sigma} \geq 5$ А захист від однофазних замикань на землю в обмотці статора є необхідним, а при $I_{\Sigma} < 5$ А – не обов'язковим. Разом з тим потрібно відмітити доцільність встановлення захисту і при менших струмах. Замикання на землю в обмотці статора найрозповсюдженіший вид пошкодження електродвигуна, і навіть при струмах $I_{\Sigma} < 5$ А вони не самоліквідуються та є небезпечними з точки зору їх повільного переходу в КЗ. Тому, чим більш чутливим буде захист від однофазних замикань в обмотці статора, тим краще, тим більша імовірність того, що це

пошкодження не перейде в багатofазні або виткові короткі замикання, тим менші розміри руйнування, тим менше потрібно часу та затрат на ремонт електродвигуна.

Оцінювати якість захисту коефіцієнтом чутливості $K_{\text{ч}}$ при металевому однофазному замиканні на землю лінійного виводу електродвигуна недостатньо. Зазвичай, коли реле захисту підключається до трансформатора струму нульової послідовності в розподільну установку і в зону захисту таким чином входить лінія, що з'єднує двигун з розподільною установкою, потрібно, щоб

$$K_{\text{ч}} = \frac{I'_{\text{C}\Sigma} - I_{\text{C}}}{I_{\text{Cз}}} \geq K_{\text{ч.min}}, \quad (4.1)$$

де $K_{\text{ч.min}}$ – мінімальний коефіцієнт чутливості, який нормується для захисту ліній від ОЗЗ;

I_{C} – власний ємнісний струм захищованого приєднання «лінія плюс двигун», А;

$I_{\text{Cз}}$ – струм спрацювання захисту, А;

$I'_{\text{C}\Sigma}$ – найменше значення сумарного ємнісного струму замикання на землю, яке має розраховуватися з урахуванням реального тривалого режиму роботи секції РУ, до якої підключено електродвигун, без приєднань, що суттєво впливають на загальну ємність мережі, А.

Тому для струмових захистів від однофазних замикань, а саме цей вид захистів передбачається в більшості випадків, потрібно мати можливо менший струм спрацювання, який не перевищує, з визначеним запасом, струм 5 А, що вважається небезпечним. Коефіцієнт запасу можна прийняти рівним 1,2÷1,3.

Для електродвигунів механізмів кар'єрів, рудників, торфопідприємств тощо, де є необхідність, за умовою безпеки, в негайному вимиканні замикання на землю навіть при дуже малих (0,2÷0,5 А) струмах в місці пошкодження, потрібна значно більш висока чутливість.

Трансформатори струму нульової послідовності, до яких підключається захист, зазвичай з метою економії розташовуються в розподільній установці. Якщо це призводить до недопустимого загрублення захисту, трансформатори струму встановлюються біля лінійних виводів електродвигунів, а для забезпечення сигналізації або вимикання замикання на землю в лінії, що з'єднує двигун з розподільною установкою, передбачається встановлений в комірці вимикача основного живлення трансформатор струму нульової послідовності, до якого підключаються відповідні пристрої сигналізації або захисту.

Згідно з ПУЕ захист від однофазних замикань на землю діє на вимикання електродвигунів від мережі, а на синхронних двигунах ще і на гасіння поля.

Вимога швидкодії не є основною для захисту, який розглядається, крім випадків, що пов'язані з технікою безпеки. Однак, якщо цей захист виконує функції виявлення та ліквідації подвійних замикань на землю, дія на вимикання та гасіння поля має здійснюватися без витримки часу [2, 4].

Захист, який реагує на штучно створені вищі гармоніки струму замикання на землю. На окремих промислових підприємствах впроваджено і діє захист електродвигунів від замикання на землю обмотки статора, дія якого заснована на виявленні штучно створеного струму другої гармоніки, що накладається на струм пошкодження.

Принцип фіксації замикання на землю полягає в тому, що при появі в мережі напруги $3U_0$ до нейтралі підключається пристрій, що генерує струм частотою 100 Гц. Оскільки один полюс цього пристрою з'єднано з землею, то коло циркуляції накладеного струму замикається через місце з'єднання фази обмотки статора з корпусом (рис. 4.1). Встановлений на лінії до пошкодженого двигуна захист виділяє сигнал частотою 100 Гц та реєструє таким чином замикання на землю. Захист отримав розповсюдження для ЕД, які працюють в мережі з заземленою через дугогасильний реактор нейтралю. Для отримання струму частотою 100 Гц використовується додаткова обмотка реактора LR, на яку ввімкнено резистор R з напівпровідниковим випрямлювачем VD. При замиканні фази на землю дугогасильний реактор відносно резистора відіграє роль трансформатора зі струмом намагнічування, який значно перевищує його струм навантаження.

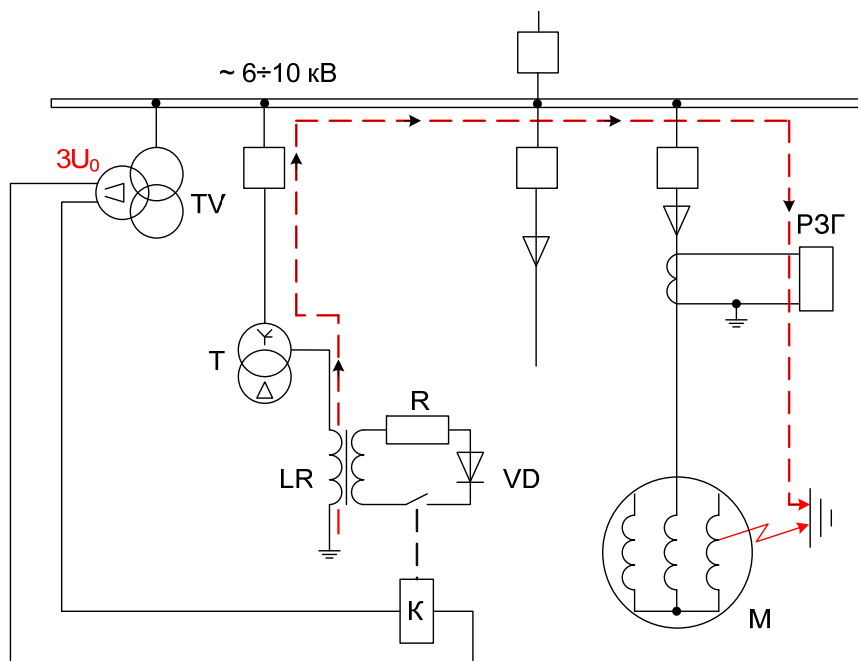


Рисунок 4.1 – Принцип фіксації замикання фази статора електродвигуна на корпус з використанням накладеного струму

Додатковий струм, що виникає в основній обмотці реактора, а також в пошкодженій фазі статора, має складову промислової частоти і ряд парних

гармонік. Друга гармоніка, яка використовується для захисту, складає приблизно 39% накладеного струму або біля 2 А.

Незважаючи на те, що використання накладеного струму для фіксації однофазного замикання має низку таких переваг, як незалежність дії захисту від ступеня компенсації ємнісного струму в мережі, від рівня та стабільності природних вищих гармонік в струмі нульової послідовності, а також від значення перехідного опору в місці пошкодження, цей принцип виконання захисту має суттєвий недолік, який потребує налаштування від завад, що створені дугою в місці замикання на корпус. Другою негативною особливістю захисту є незначне збільшення струму в місці замикання на землю. Захист серійно не випускається.

Захист, який реагує на діюче значення струму нульової послідовності. Захисти електродвигунів від замикання на землю в обмотці статора, які виконано за цим принципом, отримали найбільше розповсюдження. За вимірювальні органи використовуються серійні реле максимального струму типу РТЗ-51 [2, 4]. При числі кабелів в лінії не більше чотирьох, що з'єднують електродвигун з розподільною установкою, реле підключається до серійних трансформаторів струму нульової послідовності типу ТЗЛМ. При п'яти кабелях як давач струму використовується трансформатор струму нульової послідовності з підмагнічуванням типу ТНП-7.

В компенсованих мережах для підвищення чутливості захисту, який виконано з ТСНП з підмагнічуванням, є орган витримки часу, що діє з уставкою $t_{cp} = 1 \div 2$ с. В цьому випадку для забезпечення миттєвого вимикання ЕД при подвійному замиканні на землю (одне в статорі електродвигуна, а друге – в мережі) у вторинну обмотку ТСНП вмикається реле струму з первинним струмом спрацювання приблизно 100÷150 А. В результаті захист є двоступінчастим.

Реле типу РТЗ-50, яке випускалося раніше, забезпечувало сумісно з ТСНП без підмагнічування мінімальні струми спрацювання захисту ($I_{c3 \min}$), які наведено в таблиці 4.1. Вже при трьох ТСНП, які використовуються для підключення реле при трьокабельній лінії до ЕД, $I_{c3 \min} = 4,2$ А. Тому при кількості кабелів в лінії чотири і більше потрібно використовувати ТСНП з підмагнічуванням типу ТНП-4 або ТНП-7.

Струмові направлені захисти. Ці захисти знайшли основне використання в мережах з ізолюваною нейтраллю при малих струмах замикання на землю. Їх принцип дії засновано на тому, що відносно вектора напруги $3U_0$ на розімкненому трикутнику додаткової обмотки трансформатора напруги вектор струму пошкодженого приєднання відстає на 90° , а вектори струмів непошкоджених приєднань випереджають вказаний вектор напруги. Ця обставина дозволяє чітко фіксувати наявність пошкодження в ЕД, а також в лінії до нього, якщо ТСНП встановлено в РУ. Суттєвою перевагою направленої захисту є визначення пошкодженого приєднання за фазою струму нульової послідовності при будь-якому виді замикань на корпус – металевому або через дугу,

незалежно від значення власного ємнісного струму захищеного приєднання. Зараз серійно випускається направлений струмовий захист від однофазних замикань типу ЗЗП-1.

Таблиця 4.1 – Мінімальні струми спрацювання захисту від замикань на землю в обмотці статора електродвигунів

Тип ТСНП	Тип реле захисту	Уставка струму спрацювання реле, мА	Мінімальні значення первинного струму спрацювання, А						
			один ТСНП	два ТСНП, включені		три ТСНП, включені		чотири ТСНП, включені	
				послідовно	паралельно	послідовно	паралельно	послідовно	паралельно
ТЗЛМ	РТ-40/0,2	100	8,6	11,6	12,5	13,0	–	–	–
	РТЗ-50	30		3,9	5,2	4,2	–	–	–
ТЗРЛ	РТЗ-51	20	0,69	1,25	0,97	1,95	1,19	2,48	1,43
	РТ-40/0,2	100	20	25	34	–	–	–	–
	РТЗ-50	30	–	–	–	–	–	–	–
	РТЗ-51	20	0,81	1,34	1,0	1,95	1,2	2,56	1,52
ТЗЛ	РТ-40/0,2	100	7,0	9,0	11,0	–	–	–	–
	РТЗ-50	30	3,5	4,0	6,0	–	–	–	–
	РТЗ-51	20	0,68	1,25	0,97	1,76	1,19	2,48	1,43
ТЗЛМ-1	РТЗ-51	20	0,60	1,08	0,69	1,6	0,8	2,16	0,96

Примітки: 1. Струми спрацювання вказано при частоті $f = 50$ Гц.

2. Реле типу РТ-40/0,2 при уставці 100 мА має паралельне з'єднання обмоток.

4.3 Захист від багатозфазних замикань в обмотці статора

Загальні положення. Захист від багатозфазних коротких замикань виконується таким, що реагує на значення струму, який протікає до місця пошкодження зі сторони мережі живлення, і діє без витримки часу на вимикання електродвигуна від мережі, а у синхронних двигунів ще й на гасіння поля.

При замиканні між фазами обмотки статора струм КЗ протікає, принаймні, в двох фазах лінії, яка з'єднує двигун з його вимикачем. Тому для отримання інформації про коротке замикання достатньо використовувати трансформатори струму фаз А та С, які встановлені в КРУ, в комірці вимикача електродвигуна, а за наявності пускового реактора – і в комірці вимикача реактора. При цьому в зону захисту входять, крім самого електродвигуна, його з'єднання з вимикачем і пусковий реактор.

Двофазне виконання захисту унеможливорює вимикання ним подвійного замикання на землю, коли одна точка замикання знаходиться в фазі В обмотки статора, а друга – в фазі А або С ділянки мережі, що

електрично пов'язана з пошкодженням електричним двигуном. Якщо не вжити ніяких додаткових заходів, то протікання значного струму через обидва місця замикання буде тривати до тих пір, поки ділянка мережі не відключиться дією свого захисту від багатофазних КЗ. Від технічного удосконалення цього захисту, його чутливості та швидкодії цілком залежить чи ліквідується і як швидко цей небезпечний для електродвигуна режим. Зазвичай основні захисти суміжних елементів мережі, крім електродвигунів і силових трансформаторів, діють при багатофазних коротких замиканнях з витримкою часу $0,5 \div 2$ с, а їх струм спрацювання іноді може перевищувати можливі значення струму подвійного замикання на землю. В таких умовах пошкодження двигуна буде суттєвим. Запобігти цьому можна, якщо виконати захист електродвигуна від багатофазних КЗ трифазним шляхом встановлення трансформатора струму в фазі В, або якщо покласти задачу вимикання замикання в обмотці статора на захист електродвигуна від замикання на корпус, а в тих випадках, коли він має витримку часу або відсутній – на струмовий захист нульової послідовності від подвійних замикань на землю.

Другий спосіб є найкращим. Він забезпечує більшу чутливість до подвійних замикань на землю, особливо якщо суміжні лінії обладнані груповими або індивідуальними струмообмежувальними реакторами. Крім того, економляться трансформатори струму.

За кордоном трифазне виконання захисту від багатофазних замикань застосовується в тих випадках, коли електродвигун працює в мережі з заземленою через резистор нейтраллю.

Для захисту від багатофазних КЗ в обмотці статора використовують максимальний струмовий та диференціальний захисти. Максимальний струмовий захист (МСЗ) електродвигунів у вітчизняній практиці називають струмовою відсічкою, маючи на увазі, що її струм спрацювання в ряді випадків вибирається не за максимальним робочим струмом захищуваного елемента, а за струмом в місці встановлення захисту при КЗ в заздалегідь вибраній точці мережі. Потрібно однак відмітити, що для багатьох електродвигунів визначальною умовою для вибору струму спрацювання є режим пуску, тобто один з природних робочих режимів.

ПУЕ регламентують вибір того чи іншого способу виконання захисту від багатофазних замикань залежно від номінальної потужності електродвигуна. За номінальної потужності менше 5000 кВт, рекомендується застосовувати струмову відсічку, а для електродвигунів більшої потужності встановлюють диференціальний захист, зазвичай в двофазному виконанні. Диференціальний захист передбачається і на електродвигунах потужністю до 5000 кВт, якщо струмова відсічка не задовольняє вимоги чутливості. Доцільно застосування диференціального захисту для електродвигунів номінальною потужністю 3500 та 4000 кВт.

В диференціальному захисті виконується пофазне порівняння комплексних значень (або їх фаз) струмів зі сторони живлення електродвигуна та зі сторони його нульових виводів (рис. 4.2).

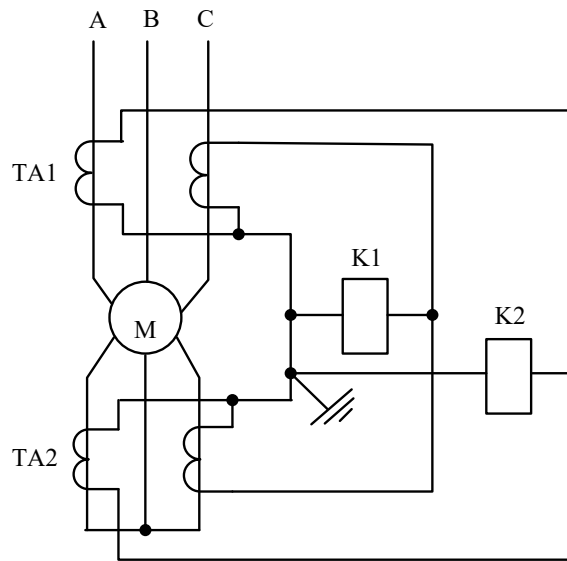


Рисунок 4.2 – Принцип здійснення двофазного диференціального захисту електричного двигуна

В закордонній практиці межі застосування струмової відсічки або диференціального захисту пов'язані не стільки з номінальною потужністю двигуна, скільки з його відповідальністю, вартістю та чутливістю відсічки. Так, наприклад, в США МСЗ (струмова відсічка) встановлюється в тих випадках, коли відношення номінальних потужностей електродвигуна та силового трансформатора (з $U_k = 8\%$), який живить розподільну установку та до якого підключено електродвигун, не перевищує 0,5.

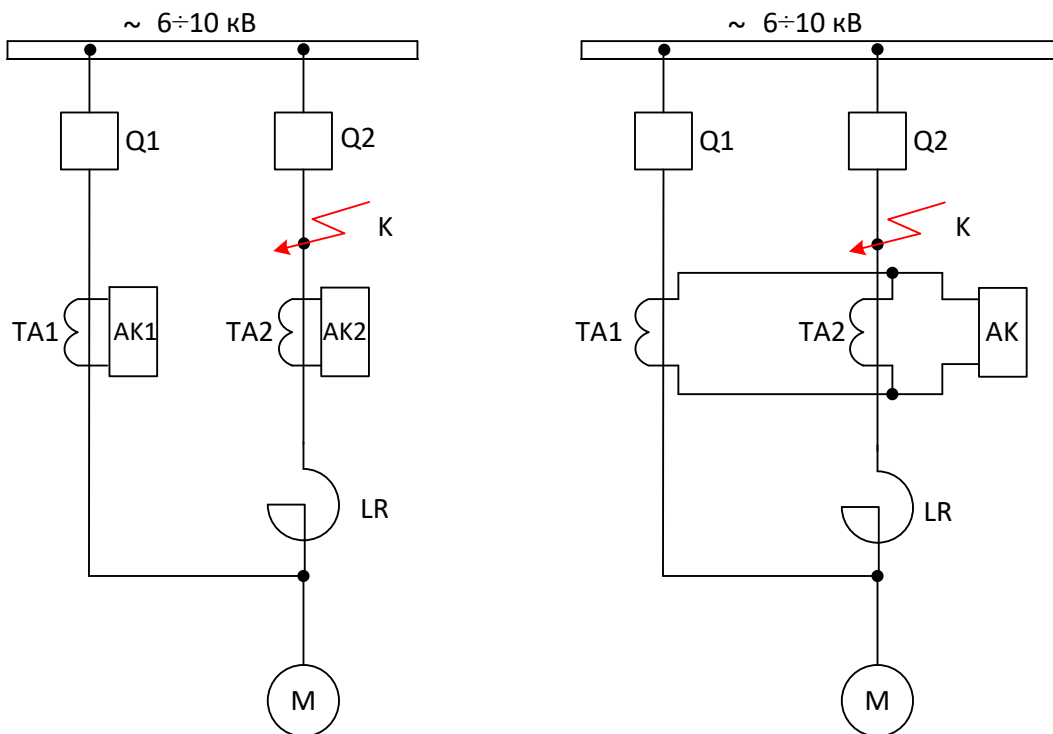
Струмова відсічка. Підключення реле струмової відсічки до трансформаторів струму, які встановлені в комірці КРУ, наведено в додатку А на рисунках А.1÷А.6.

Вимірювальне реле струму може бути ввімкнено на різницю вторинних струмів ТС фаз А і С (однорелейна відсічка).

Схема (рис. А.1) до недавнього часу рекомендувалася для всіх електродвигунів, номінальна потужність яких не перевищує 2000 кВт. Використання одного реле для захисту від багатозафазних замикань найбільш масових електродвигунів було викликано міркуваннями економії. Однак низька захисна спроможність цього виконання захисту у поєднанні з відсутністю вимог до здійснення захисту від подвійних (одне – в обмотці статора, друге – в мережі) замикань на землю призвела до відносно великого числа важких аварій з цими електродвигунами, які супроводжувалися важливими порушеннями роботи технологічних механізмів, і, як наслідок, до збільшення обсягу та вартості ремонтно-відновлювальних робіт. Тому зараз все більше розповсюдження отримала

дворелейна схема струмової відсічки з увімкненням вимірювальних реле на фазні вторинні струми трансформаторів струму фаз А і С (рис. А.2÷А.6). В пружинних приводах змінного струму, наприклад, типу ППВ, встановлюється не менше двох максимальних розчеплювачів струму миттєвої дії. В таких випадках застосування дворелейної відсічки завжди виправдане.

На електродвигунах з реакторним пуском струмову відсічку виконують з двох комплектів. Один підключають до трансформаторів струму комірки вимикача основного живлення, а другий – до трансформаторів струму комірки вимикача пускового реактора (рис. 4.3, а).



а) з використанням двох комплектів АК1 та АК2

б) з використанням одного комплекта АК

Рисунок 4.3 – Схема виконання струмової відсічки для електродвигуна з реакторним пуском

Другий комплект діє на вимикання обох вимикачів і на гасіння поля, якщо захист встановлено на синхронному двигуні. Тим самим забезпечується вимикання КЗ на ділянці між трансформаторами струму та вимикачем пускового реактора, коли вимикач основного живлення ввімкнено. Схема підключення тільки одного комплекту струмової відсічки на з'єднанні паралельно трансформаторів струму однойменних фаз комірок основного живлення та пускового реактора (рис. 4.3, б), яка використовувалася до останнього часу, не дозволяє селективно вимикати коротке замикання в цій точці.

В серійних схемах захисту на постійному та випрямленому струмах як вимірювальні реле використовуються електромагнітні реле серії РТ-40 або безконтактні реле в комплекті ЯРЭ2201.

Диференціальний захист. Для здійснення більшості диференціальних захистів ЕД використовуються два комплекти ТС з однаковими коефіцієнтами трансформації, які встановлені зі сторони живлення, в шафах відповідних вимикачів КРУ, і зі сторони нульових виводів обмоток статора.

Вторинні обмотки трансформаторів струму однойменних фаз з'єднують жилами загального для всіх фаз контрольного кабелю, створюючи тим самим диференціальну схему, в яку включається реле.

Вторинні струми трансформаторів струму в експлуатаційних перехідних режимах пуску та самозапуску електродвигунів не збігаються. Це зумовлює появу в диференціальному колі (в реле захисту) струму небалансу, який розраховується за формулою [7]

$$I_{\text{нб}} = K_a \cdot K_{\text{одн}} \cdot \varepsilon \cdot I''_{\text{max}}, \quad (4.2)$$

де $K_a = 1$ – коефіцієнт аперіодичності, який враховує вплив аперіодичної складової в перехідному режимі;

$K_{\text{одн}} = 1$ – коефіцієнт однотипності ТС;

$\varepsilon = 0,1$ – розрахункова повна похибка ТС;

I''_{max} – початкове значення періодичної складової струму пуску, самозапуску або зовнішнього КЗ, дає значення струмів небалансу, які не перевищують $(0,7 \div 0,8)I_{\text{ном}}$.

Досвід експлуатації диференціальних захистів потужних електродвигунів показує, що фактично значення $I_{\text{нб}}$ у окремих випадках може бути суттєво вище. Причинами появи підвищених струмів небалансу є суттєва різниця в довжині з'єднувальних проводів від трансформаторів струму до місця під'єднань їх в диференціальну схему та насичення трансформатора струму завантаженого плеча захисту аперіодичною складовою первинного струму пуску, самозапуску або зовнішнього короткого замикання.

Аперіодична складова первинного струму перехідного режиму майже повністю замикається через вітку намагнічування, погіршуючи трансформацію періодичної складової, через що струм намагнічування трансформатора струму ще більше зростає. Тому найбільше значення струму небалансу має місце в тому випадку, коли аперіодична складова максимальна. Особливо значними можуть бути струми небалансу при самозапуску, в початковий його період. Це пояснюється наявністю залишкової ЕРС двигуна, яка, в загальному випадку, несинхронна з напругою мережі. Внаслідок цього при відновленні напруги на двигуні

струми самозапуску можуть перевищувати пусковий струм в $1,2 \div 1,5$ рази. Досвід експлуатації захистів двигуна на одній з КЕС показує, що неправильні дії мали місце тільки при самозапуску (АВР секцій власних потреб).

Насичення деяких типів трансформаторів струму зі сторони нульових виводів обмотки статора може виникати і через неправильний монтаж трансформаторів струму. При близькому розташуванні трансформатора струму в перемичці між кінцями фазних обмоток статора можливе місцеве насичення магнітопроводу трансформатора струму струмами перемички. Однак при відстані між перемичкою та трансформатором струму більшій 1 м ці процеси можна не враховувати.

Суттєвою особливістю струму небалансу диференціальних захистів електродвигунів є їх переважно періодичний характер. Трансформатор струму зі сторони живлення електродвигуна практично закорочений (його встановлено в КРУ поряд з реле) і частково поглинає аперіодичну складову первинного струму, а трансформатор струму зі сторони нульових виводів обмотки статора працює на відносно великий опір і його повна похибка при синусоїдному струмі $\varepsilon \approx 10\%$. В результаті аперіодична складова в струмі небалансу або відсутня, або її відносний вміст дуже малий.

Шляхом моделювання та експериментальної перевірки на фізичних моделях були отримані узагальнені криві максимально можливих струмів небалансу, які не утримують аперіодичних складових [7]. Вони являють собою залежності відносного діючого значення періодичного струму небалансу $I_{\text{нб}^*} = I_{\text{нб}} / I_{\text{макс}}''$ від добутку питомого первинного струму $I_{1\text{пит}}$ на питомий опір вторинного кола трансформатора струму менш навантаженого плеча захисту $Z_{2\text{пит}}$, якщо повна похибка трансформатора струму іншого плеча при синусоїдному струмі $I_{\text{макс}}''$ складає $\varepsilon \approx 10\%$ (рис. 4.4). Питомі значення $I_{1\text{пит}}$ та $Z_{2\text{пит}}$ являють собою, відповідно, струм та опір, які віднесено до одного витка ω_1 (ω_2) обмотки, одиниці площі q періоду магнітопроводу та одиниці довжини l силової лінії трансформатора струму,

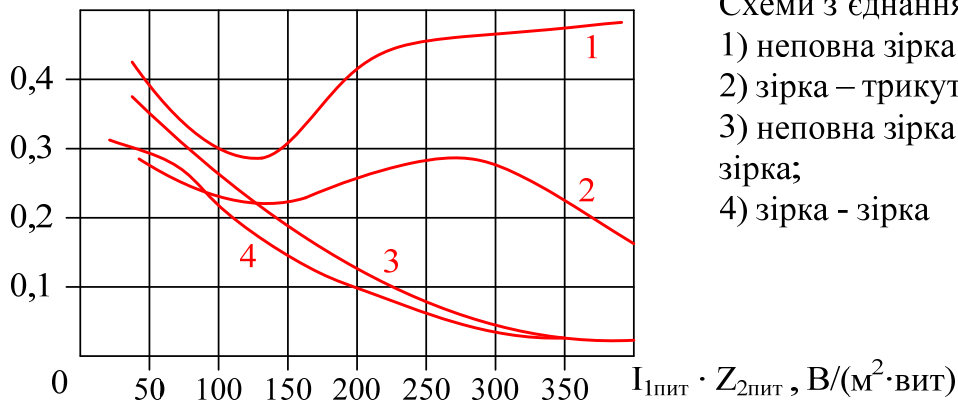
$$I_{1\text{пит}} = I_1 \cdot \omega_1 / l; \quad Z_{2\text{пит}} = Z_{2\text{ТС}} \cdot l / (\omega_2^2 \cdot q).$$

Таким чином,

$$I_{1\text{пит}} \cdot Z_{2\text{пит}} = \frac{I_1 \cdot \omega_1}{l} \cdot \frac{Z_{2\text{ТС}} \cdot l}{\omega_2^2 \cdot q} = \frac{I_1}{n_c} \cdot Z_{2\text{ТС}} \cdot \frac{1}{\omega_2 \cdot q}. \quad (4.3)$$

Для холоднокатаних сталей при $\varepsilon = 10\%$ добуток $I_{1\text{пит}} \cdot Z_{2\text{пит}} = 380 \text{ В}/(\text{м}^2 \cdot \text{вит})$.

$$I_{нб*} = I_{нб}/I_{max}, \text{ в.о.}$$



Схеми з'єднання ТС:

- 1) неповна зірка – трикутник;
- 2) зірка – трикутник;
- 3) неповна зірка – неповна зірка;
- 4) зірка - зірка

Рисунок 4.4 – Узагальнені криві максимально можливих струмів небалансу диференціальних захистів електродвигунів

Практичне значення добутку $I_{пит} \cdot Z_{2пит}$ спрощується у зв'язку з обмеженим типажом трансформатора струму, що встановлюється в КРУ, і постійним значенням перерізу мідних проводів, які використовуються для монтажу: $q_{п} = 2,5 \text{ мм}^2$. Відстань від трансформатора струму до реле звичайно не перевищує 5 м. Вказані довжини та перерізи проводів зумовлюють малий їх опір, в результаті чого Z_2 визначається, насправді, тільки опором вторинної обмотки ТС і перехідним опором $R_{пер} = 0,1 \text{ Ом}$

$$Z_{2п} = \sqrt{(R_2 + R_{пер})^2 + X_2^2} \quad (4.4)$$

де R_2 та X_2 – активний та індуктивний опори вторинної обмотки ТС.

Неврахування опору з'єднувальних проводів лише незначно підвищує діюче значення періодичного струму небалансу, що йде в запас при визначенні струму спрацювання диференціальних захистів.

Узагальнені криві (рис. 4.4) побудовано при постійної часу аперіодичної складової первинного струму: $T_a = 0,05 \text{ с}$. Однак значення T_a залежить від потужності двигуна та його типу, а також від відношення x/r мережі живлення та її потужності. При цьому значення T_a контуру пускового струму, струму самозапуску або зовнішнього КЗ може змінюватися в межах $0,1 \div 0,03 \text{ с}$.

Захист передбачається в двофазному дворелейному виконанні (рис. А.7, А.8), а в деяких випадках, з метою забезпечення дії при міжфазних КЗ та при подвійних замиканнях на землю, – трьома реле [8]. Захисне заземлення кіл струму захисту виконується не у кожній групі ТС, а в одному місці у ТС, які розташовані в КРУ. Цим унеможливується поява в реле додаткових струмів небалансу, які зумовлені різними потенціалами двох місць заземлення при КЗ на землю в межах РУ, і ЕРС, що наводяться в петлі допоміжні проводи – заземлювальний контур.

Диференціальний захист синхронних двигунів, які мають динамічне гальмування, виконується за схемою рисунка А.8. Обмеження зони дії захисту трансформаторами струму ТА5 дозволяє не налаштовувати його від струму, який протікає по фазних обмотках статора, в режимі динамічного гальмування і тим самим зберегти захистоспроможність такою самою, як і для електродвигунів, для яких цей режим не передбачено.

Для електродвигунів з реакторним пуском для вимикання КЗ в зоні між відключеним вимикачем та трансформатором струму кола пускового реактора передбачається двофазна дворелейна відсічка (рис. А.7), вимірювальний орган якої підключається до трансформатора струму комірки вимикача пускового реактора. З метою підвищення чутливості цього захисту він виводиться з дії на час пуску.

Всі диференціальні захисти електродвигунів розбиваються на три групи [2, 4]:

- 1) диференціальні струмові захисти;
- 2) диференціальні струмові захисти з гальмуванням;
- 3) диференціально-фазні захисти.

Крім того, є комбіновані захисти, які поєднують принципи першої і третьої груп або принципи всіх трьох груп.

Диференціальні струмові захисти. До захистів цієї групи відносять типові пристрої типу РНТ-565, які експлуатуються на багатьох електростанціях та промислових підприємствах [5, 6].

Встановлення в диференціальне коло реле типу РНТ-565 (рис. 4.7, а) з підвищеним налаштуванням від аперіодичної складової струму декілька покращує чутливість захисту порівняно з диференціальною відсічкою на звичайному реле РТ-40 за рахунок закруглення від невеликої аперіодичної складової, яка є в струмі небалансу в перший момент пуску, самозапуску або зовнішнього КЗ. Необхідність забезпечити неспрацювання захисту при значних періодичних струмах небалансу змушує закругляти захист до уставки $I_{сз} = (1,8 \div 3)I_{ном}$, що не забезпечує достатньої чутливості до струмів внутрішніх пошкоджень при КЗ через великий перехідний опір. Ця обставина стала причиною розробки цілої низки пристроїв диференціального захисту з підвищеною чутливістю, які проводилися, в основному, з метою зменшення впливу похибок трансформатора струму на роботу захисту. До них відносять [2, 7]:

- диференціальний захист зі стабілізуювальним опором в диференціальному колі (сюди відносять реле фірми ASEA);
- комутаційне диференціальне реле;
- модернізоване реле типу РНТ, яке реагує на форму струму, що підводиться;
- розробки з додатковими дроселями в диференціальному колі.

Вплив додаткового опору в диференціальному колі на струм небалансу наближено описується виразом [7]

$$I_{\text{нб}} \approx I_{\text{нб.мах}} \cdot \frac{Z_2}{|Z_2 + Z_{\text{дод}}|},$$

де $I_{\text{нб.мах}}$ – струм небалансу за відсутності додаткового опору в диференціальному колі;

Z_2 , $Z_{\text{дод}}$ – відповідно, опір вторинного кола ТС найбільш завантаженого плеча захисту та додатковий опір в диференціальному колі.

На рисунку 4.5 наведена спрощена схема диференціального захисту однієї фази статора з реле типу RADHA, яке входить в типовий набір пристроїв захисту та керування електродвигунів напругою вище 1 кВ. Завдяки конденсатору С реле задовільно налаштоване від аперіодичної складової. При зовнішніх КЗ та пуску електродвигунів максимальна напруга в диференціальному колі визначається опором більш завантаженого плеча і складає

$$U_{\text{нб.мах}} = \alpha \cdot I''_{\text{мах}} \cdot Z_2,$$

де α – коефіцієнт, який враховує дію аперіодичної складової;

$I''_{\text{мах}}$ – максимальне діюче значення періодичної складової розрахункового струму зовнішнього КЗ (пуску, самозапуску).

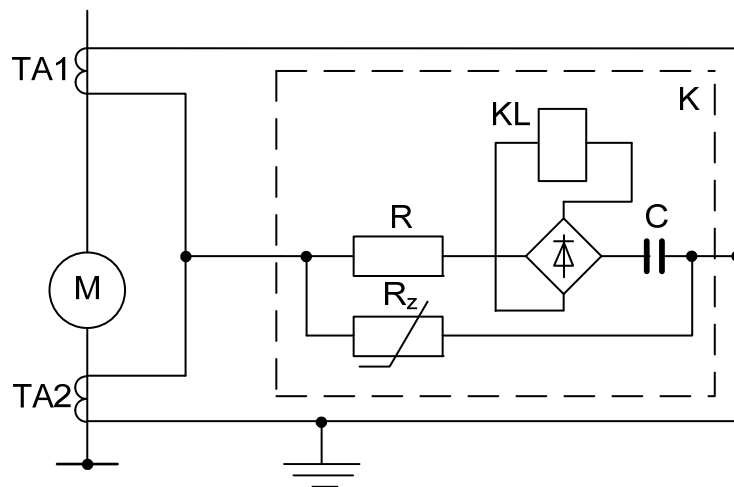


Рисунок 4.5 – Спрощена схема фази захисту з реле типу RADHA (фірма ASEA, Швеція)

Як показують розрахунки, значення напруги небалансу складає приблизно 50÷80 В, що порівнянно з напругою U_{2S} , при якій трансформатор струму насичується. Відомо, що диференціальний захист забезпечує потрібну швидкодію, якщо напруга спрацювання реле забезпечує

$$U_{\text{сп}} \leq 0,5 \cdot U_{2S}.$$

Вказана умова в реаліях не завжди виконується. Тому закордонні фірми, які застосовують захисти за типом RADHA, вважають за необхідне для забезпечення надійної роботи диференціальних захистів підбирати трансформатори струму пліч так, щоб їх вольт-амперні характеристики (ВАХ) були ідентичні, а відношення витків обмоток абсолютно однакові. При малих номінальних струмах рекомендується використовувати трансформатори струму з номінальним вторинним струмом 1 А. Електрорушійна сила (ЕРС) насичування на вторинних обмотках має бути, принаймні, вдвічі більша робочої напруги.

При внутрішньому багатофазному КЗ змінюється значення та фази \underline{U}_1 і \underline{U}_2 та в реле протікає струм

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_1 + \underline{U}_2}{Z_1 + R}.$$

До вхідних затискачів реле RADHA підключено нелінійний опір R_Z , який зменшується при підвищенні напруги на реле і тим самим обмежує цю напругу до рівня, який є безпечним для трансформаторів струму та ізоляції вторинних кіл. Характеристика R_Z підбирається на заводі-виробнику.

Є також пропозиції щодо підвищення чутливості диференціальних струмових реле за допомогою реле, яке реагує на форму струму, що підводиться. Завдяки цьому чутливість захисту підвищується приблизно у 3,5 раза. Оскільки відносний струм небалансу для типових схем захисту та більшості електродвигунів (див. рис. 4.4) $I_{нб*} = 0,3$, то струм небалансу при пуску електродвигунів складає

$$I_{нб} = I_{нб*} \cdot I_{II} = I_{нб*} \cdot K_{II} \cdot I_{ном} = 0,3(5 \div 7) I_{ном} = (1,5 \div 2,1) \cdot I_{ном}.$$

З урахуванням закругіння реле до струму небалансу мінімальний струм спрацювання захисту складає

$$I_{сз} = I_{нб} / 3,5 = (0,43 \div 0,6) \cdot I_{ном}.$$

Закордонні фірми використовують для захисту електродвигунів від багатофазних замикань в обмотці статора «самобалансувальний» диференціальний захист (рис. 4.6). Реле захисту вмикається на трансформатор струму, через вікно якого проходять у зустрічних напрямках струмопроводи: кабелі або шини, що під'єднані до початку та кінця фазної обмотки статора. Таким чином, якщо в поздовжньому диференціальному струмовому захисті струм в реле дорівнює геометричній сумі вторинних струмів двох трансформаторів струму, то в захисті, що розглядається, в реле протікає вторинний струм одного трансформатора струму, який пропорційний геометричній сумі первинних струмів фази. Завдяки цьому струм небалансу дуже малий. Відпадають

також проблеми, які пов'язані з необхідністю врахування різного насичування трансформаторів струму в плечах захисту та налаштування від аперіодичних складових при зовнішніх КЗ та пусках електродвигунів. Фірма ASEA використовує як вимірювальні звичайні реле максимального струму. При цьому вдається отримати захистоспроможність, яка характеризується значенням

$$I_{сз} = (0,05 \div 0,2) \cdot I_{ном}.$$

Разом з тим виконання «самобалансувального» диференціального захисту наштовхується на цілу низку труднощів. В першу чергу це пов'язано зі значним ускладненням конструктивної частини, зростає і небезпека пошкодження стромопроводів. Суттєво змінюються і вимоги до конструкції трансформаторів струму.

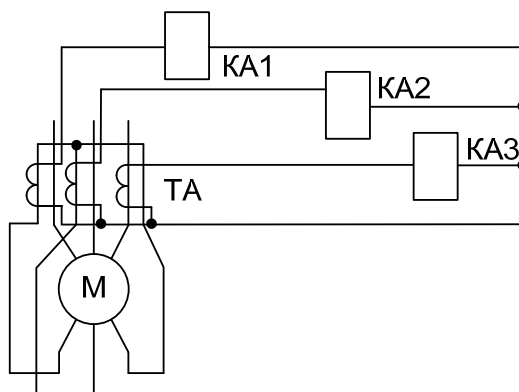
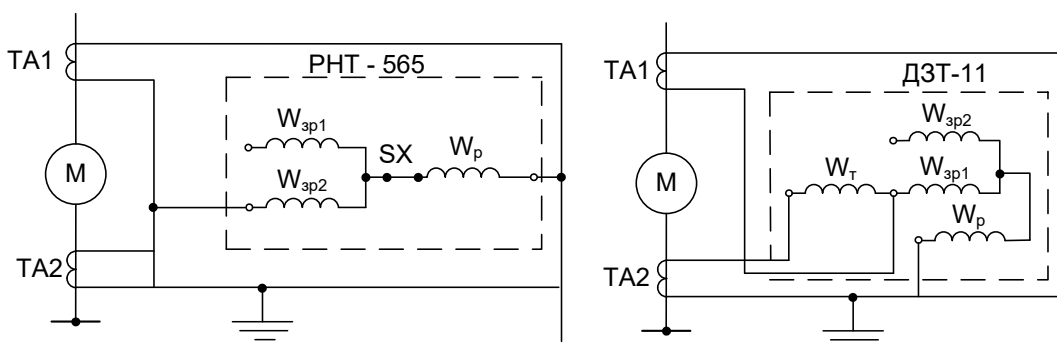


Рисунок 4.6 – Схема трифазного «самобалансувального» захисту



а) з реле типу РНТ – 565;

б) з реле типу ДЗТ – 11

Рисунок 4.7 – Схема однієї фази диференціального струмового захисту

Диференціальні захисти з гальмуванням. Використання для покращення налаштування від періодичного струму небалансу гальмування вторинним струмом ТС одного з плеч дозволяє підвищити чутливість диференціального захисту. На рисунку 4.7, б наведено струмові кола захисту, які виконано на реле з магнітним гальмуванням типу ДЗТ-11.

Різниця від схеми на рис. 4.7, а полягає в тому, що гальмівна обмотка реле ввімкнена в коло вторинної обмотки трансформатора струму, який встановлено біля нульових виводів обмотки статора електродвигуна. Досвід експлуатації цих захистів виявився позитивним. Початковий струм спрацювання захисту за відсутності гальмування складає $(0,75 \div 1,4) \cdot I_{ном}$, а коефіцієнт гальмування визначається струмом небалансу захисту і досягає $0,6 \div 0,7$. За наявності струму гальмування чутливість захисту знижується. Так, наприклад, при гальмуванні номінальним струмом захист спрацьовує при струмі в диференціальному колі, який відповідає подвійному значенню номінального $2I_{ном}$. Це є недоліком захисту на реле з магнітним гальмуванням.

Був розроблений диференціальний струмовий захист, який входить в комплекс ЯРЭ2201 пристроїв захисту та автоматики для КРУ $6 \div 10$ кВ (захист електродвигунів та силових трансформаторів). Тому він містить поряд з елементами, що забезпечують неспрацювання захисту від періодичних струмів небалансу, ще й блоки налаштування від кидка струму намагнічування трансформаторів, які виконано на базі використання спрощеного часоімпульсного способу. Структурна схема реле наведена на рисунку 4.8. Захист має послідовно ввімкнені реальну диференціальну ланку, виконану на трансреакторі ТАV, випрямлювальний місток VS1, фільтр Ф, який пропускає постійну складову, що виділяє 1-у гармоніку та ослаблює 2-у й інші вищі гармоніки, компаратор К, елемент затримки на спрацювання Т та вихідне реле КL. Завдяки такій структурі забезпечується налаштування від усіх видів кидку струму намагнічування силового трансформатора та перехідних струмів небалансу з суттєво несинусоїдальною формою кривої. Для налаштування від періодичних струмів небалансу в захисті є гальмування. Відповідне коло має проміжний трансформатор ТА, первинна обмотка якого обтікається струмом плеча, випрямлювальний місток VS2, згладжувальну ланку С. Різниця вихідних струмів фільтра Ф та ланки С подається на вхід компаратора К.

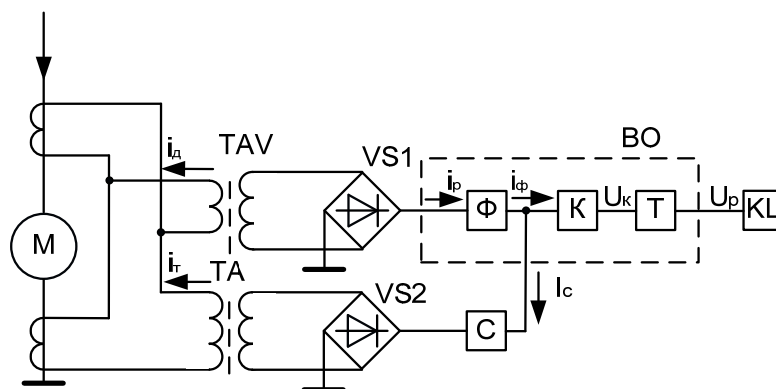


Рисунок 4.8 – Структурна схема реле диференціального захисту, який входить до складу ЯРЭ2201

Диференціально-фазні захисти (ДФЗ) використовують порівняння вторинних струмів трансформаторів струму плечей за фазою. Використання ДФЗ доцільно при підвищених похибках трансформаторів струму, оскільки кутові похибки останніх мають менший діапазон змінювання, ніж повні. Амплітуди вторинних струмів трансформаторів струму в диференціально-фазних захистах відіграють другорядну роль і можуть визначатися з невисоким ступенем точності. Тому в ДФЗ знижуються вимоги до точності роботи трансформаторів струму і допускається більший розкид їх параметрів, ніж у диференціальних струмових захистах. Структурна схема диференціально-фазного захисту наведена на рис. 4.9, а.

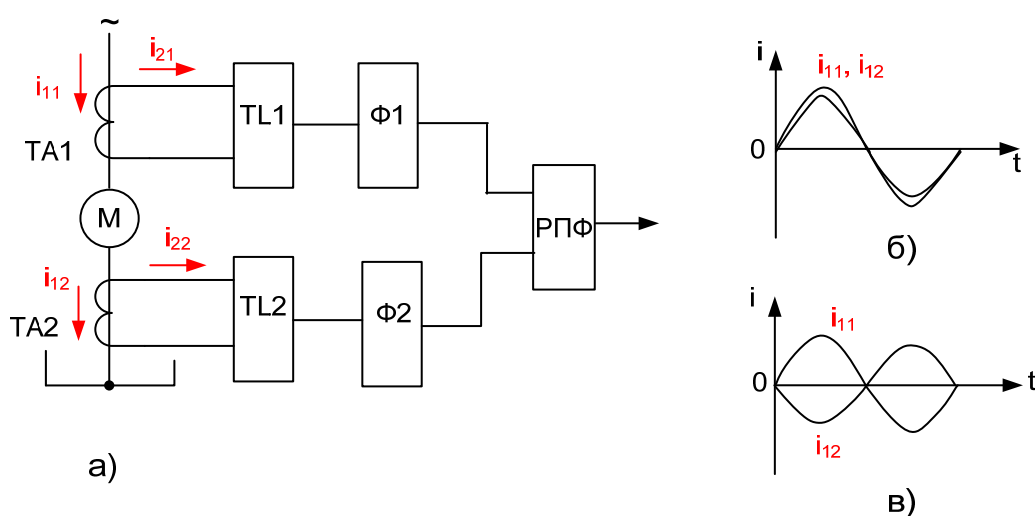


Рисунок 4.9 – Структурна схема (а) та принцип дії (б, в) ДФЗ

До трансформаторів струму на лінійних виводах електродвигунів та зі сторони нейтралі через перетворювачі струму TL1 і TL2 підключено формувачі Ф1, Ф2, що дають інформацію про фази струмів. Сигнали формувачів надходять на вхід реле порівняння фаз РПФ, які реалізують той або інший спосіб порівняння електричних величин за фазою.

В нормальному режимі, при пуску, самозапуску електродвигунів та коротких замиканнях поза зоною дії струми, які порівнюються, i_{11} і i_{12} збігаються за фазою (рис. 4.9, б) і захист не спрацьовує. При КЗ в зоні дії (рис. 4.9, в) зсув за фазою між струмами i_{11} і i_{12} складає $180 \div 120^\circ$, що призведе до спрацьовування РПФ.

Досвід експлуатації показує, що диференціальний захист звичайно задовільно вирішує задачу захисту електродвигуна від багатофазних КЗ. Він швидко вимикає пошкоджений двигун, забезпечує локалізацію аварії та запобігає розвитку пошкодження.

5 ЗАХИСТ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Загальні положення. Фактично цей захист призначено для захисту ізоляції електродвигунів від недопустимих термічних впливів. Для контролю теплового стану ізоляції зараз використовується безпосередній контроль температури в декількох характерних точках та непрямий контроль з використанням інформації про рівень та тривалість струму перевантаження [7, 10].

Перший метод знайшов широке розповсюдження для електродвигунів напругою нижче 1 кВ у пристроях захисту з чутливими напівпровідниковими терморезисторами [10], які вбудовуються в обмотки фаз статора. Вимірювальний орган такого захисту реагує на різку зміну опору терморезистора при підвищенні допустимої температури. Однак для електродвигунів напругою вище 1 кВ використання терморезисторів є недоцільним, оскільки за рахунок достатньо великої товщини шару ізоляції обмотки різко знижується точність відображення температури та підвищується інерційність захисту.

Захисти з непрямым контролем температури базуються на фізичному або математичному моделюванні теплового стану електродвигунів, причому як величина, яка відображає кількість теплоти, що виділяється в електродвигуні за одиницю часу, використовується діюче значення струму в другому степені. Відома велика кількість розробок таких захистів.

Згідно з ПУЕ захист від перевантаження має передбачатися для електродвигунів, які підлягають перевантаженню з технологічних причин, і для електродвигунів з особливо важкими умовами пуску та самозапуску (тривалість прямого пуску безпосередньо від мережі 20 с і більше), перевантаження яких можливе при надмірному збільшенні тривалості пуску внаслідок зниження напруги в мережі.

Захист від струмів перевантаження, який обумовлено технологічними причинами, діє на сигнал, що передається на пост керування електродвигунів, якщо черговий персонал може розвантажити двигун, не зупиняючи його.

Дія захисту на вимикання, що допускається ПУЕ, виконується на синхронних двигунах, якщо захист від перевантаження сумісний з захистом від асинхронного режиму, а також на асинхронних двигунах в тих випадках, коли [7]:

- вимикання електродвигуна не призводить до порушення технологічного процесу;
- розвантаження неможливо здійснити без зупинки;
- відсутній черговий персонал, який би міг вжити заходів до розвантаження;
- мають місце важкі умови пуску та самозапуску.

Якщо є можливість здійснити автоматичне розвантаження електродвигуна, захист виконують з двома витримками часу: з першою (меншою) – на розвантаження, а з другою – на вимикання, якщо перевантаження не зникло.

Для електродвигуна з реакторним пуском захист від перевантаження вмикають на трансформатори струму камери вимикача основного живлення. Для унеможливлення пошкодження електродвигуна через затягнутий пуск в схемі передбачається контроль розрахункового часу пуску. Таке виконання захисту доцільно для електродвигунів, які не самозапускаються після дії АПВ та АВР, якщо час пуску через реактор великий і уповільнення захисту, яке вибрано за умовою налаштування від цього часу, перевищує допустиму тривалість можливого перевантаження електродвигуна, що працює.

В ПУЕ передбачається встановлення захисту в одній фазі. Однак доцільно для випадків, коли перевантаження можливе внаслідок несиметричних режимів, перетворювачі первинного струму в електричну величину розташовувати в двох або трьох фазах, а для виконання захисту односистемним використовувати трифазний випрямлювальний місток у поєднанні з амплітудним детектором або три однофазних випрямлювальних містки в поєднанні з максіселектором.

В захисті доцільно застосовувати реле з інтегрально залежною від струму характеристикою витримки часу, яка враховує попереднє навантаження, процес нагріву та остигання обмоток статора (відповідно при зростанні та зниженні навантаження).

Час, протягом якого перегрів електродвигуна при струмі перевантаження I досягає значення перевищення температури $\Delta u_{\text{тр.доп}}$, може бути визначений за формулою [7]

$$t = T_n \cdot \ln \frac{1}{1 - (I_{\text{тр.доп}} / I)^2}, \quad (5.1)$$

де T_n – постійна часу нагріву, с;
 $I_{\text{тр.доп}}$ – тривало допустимий струм, А;
 $\Delta u_{\text{тр.доп}}$ – перевищення температури, °С.

В деяких конструкціях захистів розрізняють два значення перевищення температури:

а) $\Delta u_{\text{тр.доп}}$ відповідає перегріву електродвигуна при струмі перевантаження порядку $(1,15 \div 1,5)I_{\text{ном}}$, коли перегрів призводить до скорочення терміну служби ізоляції обмотки;

б) $\Delta u_{\text{тр.доп}}$ – гранично допустиме перевищення температури при струмі перевантаження більше $1,5I_{\text{ном}}$, коли подальший перегрів призводить до швидкого руйнування ізоляції.

Часострумова характеристика захисту може бути вибрана згідно з (5.1)

$$t = A_1 \cdot \ln \frac{K_I^2}{K_I^2 - 1}, \quad (5.2)$$

де A_1 – постійна величина, яка вибирається менше T_n з запасом, що залежить від можливої похибки дії захисту.

Захист з характеристикою за (5.2) враховує тільки допустиме перевищення температури $\Delta u_{\text{тр.доп}}$. Між тим, в окремих випадках доцільно при визначенні допустимого часу перевантаження враховувати і температуру охолоджувального повітря θ_0 , тому що значення $\Delta u_{\text{тр.доп}}$ задається для максимальної температури навколишнього середовища, рівної для нормальних машин $+40^\circ\text{C}$.

З урахуванням значення θ_0 , яке має вводитися в захист у вигляді електричної величини, часострумова характеристика захисту визначається виразом

$$t = A_1 \cdot \ln \frac{K_I^2}{\left(1 - \frac{\theta_0}{\theta_{\text{тр.доп}}}\right)(K_I^2 - 1)}, \quad (5.3)$$

де $\theta_{\text{тр.доп}} = \Delta u_{\text{тр.доп}} + 40^\circ$.

Захисти від перевантаження з часострумовими характеристиками, згідно з (5.2) та (5.3), достатньо точно відображають тепловий режим ЕД. Однак можливо використання захистів і більш простих за виконанням, хоча і менш точних для певних значень струму, які реалізують характеристики

$$t = A_2 / K_I^2, \quad (5.4)$$

або

$$t = A_3 / (K_I^2 - 1). \quad (5.5)$$

Прийнявши для прикладу за початкову точку, в якій всі характеристики мають мати однаковий час спрацювання при однакових K_I згідно ГОСТ 183-74* ($t=120$ с і $K_I = 1,5$), з урахуванням коефіцієнта запасу $K_3 = 1,1$; визначимо значення A_i в кожному з виразів (5.2), (5.3) та (5.5) [7]

$$t = 186 \cdot \ln \frac{K_I^2}{K_I^2 - 1}; \quad (5.6)$$

$$t = 245 / K_I^2; \quad (5.7)$$

$$t = 136 / (K_I^2 - 1). \quad (5.8)$$

В таблиці 5.1 наведено значення t , які визначено для різних рівней струму перевантаження $(1,15 \div 8)I_{\text{ном}}$. Вирази (5.6)÷(5.8) є орієнтовними,

оскільки базуються на одній точці, яка задається ГОСТ 183-74*. Як правило, захисти, що мають такі характеристики спрацювання, не дозволяють повною мірою використовувати навантажувальну спроможність електродвигуна при реальних короткочасних перевантаженнях. Тому на практиці потрібно, щоб часострумова характеристика спрацювання захисту змінювалася залежно від значень A з тим, щоб наблизитись максимально до теплової характеристики електродвигуна, що визначається заводом-виробником.

Таблиця 5.1 – Час спрацювання захисту від перевантаження при різних часострумових характеристиках

Фор- мула	Час спрацювання захисту від перевантаження, с, при кратності струму перевантаження												
	1,15	1,2	1,3	1,4	1,5	1,8	2	3	4	5	6	7	8
(5.6)	264	219,5	167,4	132,1	109	68,8	52,1	22,3	13	7,44	4,72	3,72	1,86
(5.7)	186	170	145	125	109	75,6	61,2	27,2	15,3	9,8	6,8	5	3,8
(5.8)	425	309	197	142	109	60,7	45,3	17	9,1	5,7	3,9	2,8	2,15

При виконанні захисту, згідно з (5.4), вимикання електродвигуна має здійснюватись при виконанні умови

$$\int_0^t I^2 \cdot dt > B, \quad (5.9)$$

де B – величина, що пропорційна A_2 в (5.4).

Оскільки інтегрування значення струму I протягом достатньо великого проміжку часу призведе до перевищення B та спрацювання захисту, то в захист потрібно ввести пусковий орган (ПО), який запускає вимірювальний орган захисту з алгоритмом спрацювання за (5.9) тільки при струмі електродвигуна більше струму спрацювання ПО $I_{сз}$.

При виконанні захисту з пусковим органом струм спрацювання визначається за виразом [7]

$$I_{сз} \geq K_{нал} \cdot I_{ном} / K_{пов}, \quad (5.10)$$

де $K_{нал}$ – коефіцієнт налаштування;

$K_{пов}$ – коефіцієнт повернення пускового органу.

Пусковий орган має мати достатньо малу похибку за струмом спрацювання δ_c і достатньо великий коефіцієнт повернення $K_{пов}$.

Допустима похибка

$$\delta_c = (1,14 \cdot K_{пов} - 1) / (1,14 \cdot K_{пов} + 1). \quad (5.11)$$

З (5.11) випливає, що за умови відсутності похибки за струмом спрацювання ($\delta_c = 0$) коефіцієнт повернення ПО має бути більшим 0,877, а

при коефіцієнтах повернення 0,9; 0,95 та 1 похибка має бути не більша 1,28; 3,98 та 6,54%.

Від значення похибки за струмом спрацювання захисту залежить рівень струму електродвигуна, при якому забезпечується його надійне вимикання при тривалому перевантаженні, $I_{сз\ max}$

$$I_{сз\ max} = (1 + \delta_c) \cdot I_{сз}. \quad (5.12)$$

Пусковий та вимірювальний органи захисту краще виконувати такими, що реагують на діючий струм контрольованої установки, що особливо важливо для електроустановок, які працюють при викривленій формі струму, оскільки захист може спрацювати при струмі, що менший номінального, або коли діючий струм буде з запасом більшим номінального.

Для захистів електроустановок з циклічним режимом роботи, коли пауза між циклами менша постійної часу охолодження, доцільно їх виконання з контролем процесів не тільки нагріву, але і охолодження.

При виконанні захисту бажано розрізнити режими зниження навантаження при електродвигуні, що працює, та вимикання електродвигуна, тому що у другому випадку через припинення вентиляції постійна часу охолодження в $1,5 \div 2$ рази більша, ніж в першому.

Незважаючи на те, що найбільш доцільним є виконання захисту з залежною від струму характеристикою витримки часу, в серійних схемах захисту електродвигунів часто вимушено використовується захист з незалежною витримкою часу.

Зазвичай таке рішення найбільш характерно для типових схем захисту синхронних двигунів, які виконуються на електротехнічних реле, захист від перевантаження суміщено зі струмовим захистом від асинхронного режиму; і в типових схемах захисту асинхронних двигунів, в яких індукційне реле струму з залежною характеристикою витримки часу не може бути використане через притаманні їм суттєві недоліки.

Захист від перевантаження з незалежною від струму характеристикою витримки часу (рис. 5.1, а) – максимальний струмовий в однофазному виконанні. За вимірювальне реле КА використовується реле серії РТ-40, а елементом часу служить реле КТ типу ВЛ-34.

Цей захист використовується для всіх електродвигунів власних потреб теплових та атомних електростанцій, а на промислових підприємствах – для всіх синхронних двигунів (коли він суміщений з захистом від асинхронного режиму) та асинхронних двигунів, які є приводами відповідних механізмів, а також для невідповідальних асинхронних з часом пуску більше $12 \div 13$ с.

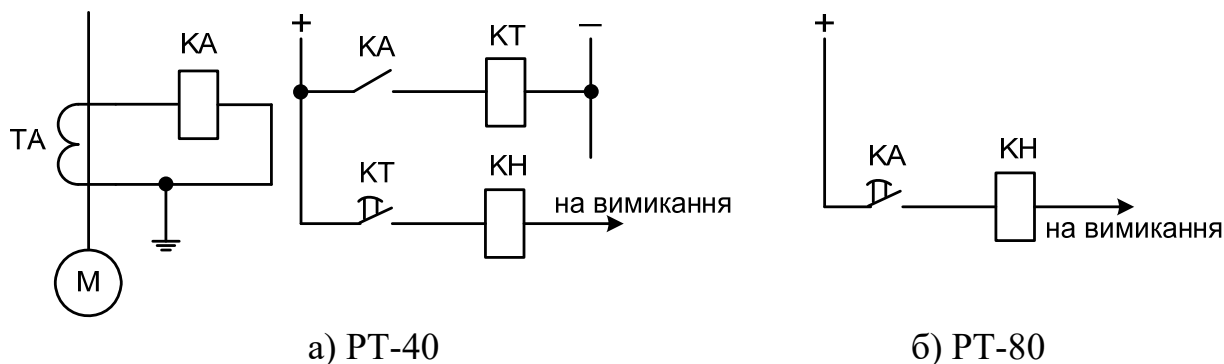


Рисунок 5.1 – Захист від перевантаження з дією на вимикання, який виконано з використанням електротехнічних реле струму

Захист від перевантаження з залежною від струму характеристикою витримки часу на базі реле серії РТ-80 (рис. 5.1, б). Індукційні реле серії РТ-80 мають суттєві недоліки, але їх ресурс роботи механізму зчеплення значно перевищує кількість допустимих спрацювань з навантаженням в колі контактів реле серії РТ-40. Крім того, якщо уставка часу спрацювання захисту, яка вибрана за умовою налаштування на тривалість пуску або самозапуску, виявляється менша 16 с (що відповідає часу пуску або самозапуску, який не перевищує $12 \div 13$ с), використання реле типу РТ-82 забезпечує, порівняно зі схемою, де застосовуються реле серії РТ-40, економію одного реле.

Тому рекомендується виконувати захист від перевантаження з реле типу РТ-82 на асинхронних двигунах промислових підприємств, що не є приводами відповідальних механізмів, якщо їх час пуску та самозапуску не перевищує $12 \div 13$ с; на електродвигунах з навантаженням на валу, яке може змінюватися залежно від програми його роботи, також різко змінним, або при відносно частих (більше 500 разів на рік) увімкненнях (рис. А.8).

При виборі струму спрацювання захисту з реле серії РТ-80 за (5.10) приймають значення $K_{\text{нал}} = 1,1 \div 1,2$ та $K_{\text{пов}} = 0,8$. При цьому струм спрацювання захисту складає

$$I_{\text{сз}} = \frac{1,1 \div 1,2}{0,8} \cdot I_{\text{ном}} = (1,38 \div 1,50) \cdot I_{\text{ном}}.$$

Реальне значення струму спрацювання може виявитися ще більшим через дискретність уставок струму спрацювання реле та похибки за струмом спрацювання. Так, якщо первинний номінальний струм трансформатора струму буде таким, що розрахунковий струм спрацювання реле декілька перевищує 6 А, то потрібно буде вибрати наступну більшу уставку 8 А. Це призведе до збільшення струму спрацювання захисту в $8/6$ раз, тобто він складе $2I_{\text{ном}}$. Ще більше значення струму $I_{\text{сз max}}$ отримаємо згідно з (5.12), якщо врахуємо сумарну похибку реле [17]

$$\delta_c = (1 + \delta_1) \cdot (1 + \delta_2) \cdot (1 + \delta_3) - 1,$$

де $\delta_1 = 5\%$ – похибка струму спрацювання відносно уставки при температурі $+20\text{ }^\circ\text{C}$;

$\delta_2 = 6\%$ – похибка струму спрацювання при змінюванні частоти на $\pm 3\%$ номінального значення;

$\delta_3 = 15\%$ – похибка струму спрацювання при змінюванні температури навколишнього повітря від -20 до $+40\text{ }^\circ\text{C}$.

З урахуванням вказаних часткових похибок

$$\delta_c = (1 + 0,05)(1 + 0,06)(1 + 0,15) - 1 = 0,28;$$

і при збігові розрахункового струму спрацювання з уставкою реле

$$I'_{\text{сзmax}} = (1 + 0,28) \cdot 1,5 \cdot I_{\text{ном}} = 1,92 \cdot I_{\text{ном}},$$

а при переході замість уставки 6 А до уставки 8 А

$$I''_{\text{сзmax}} = (1 + 0,28) \cdot 2I_{\text{ном}} = 2,56 \cdot I_{\text{ном}}.$$

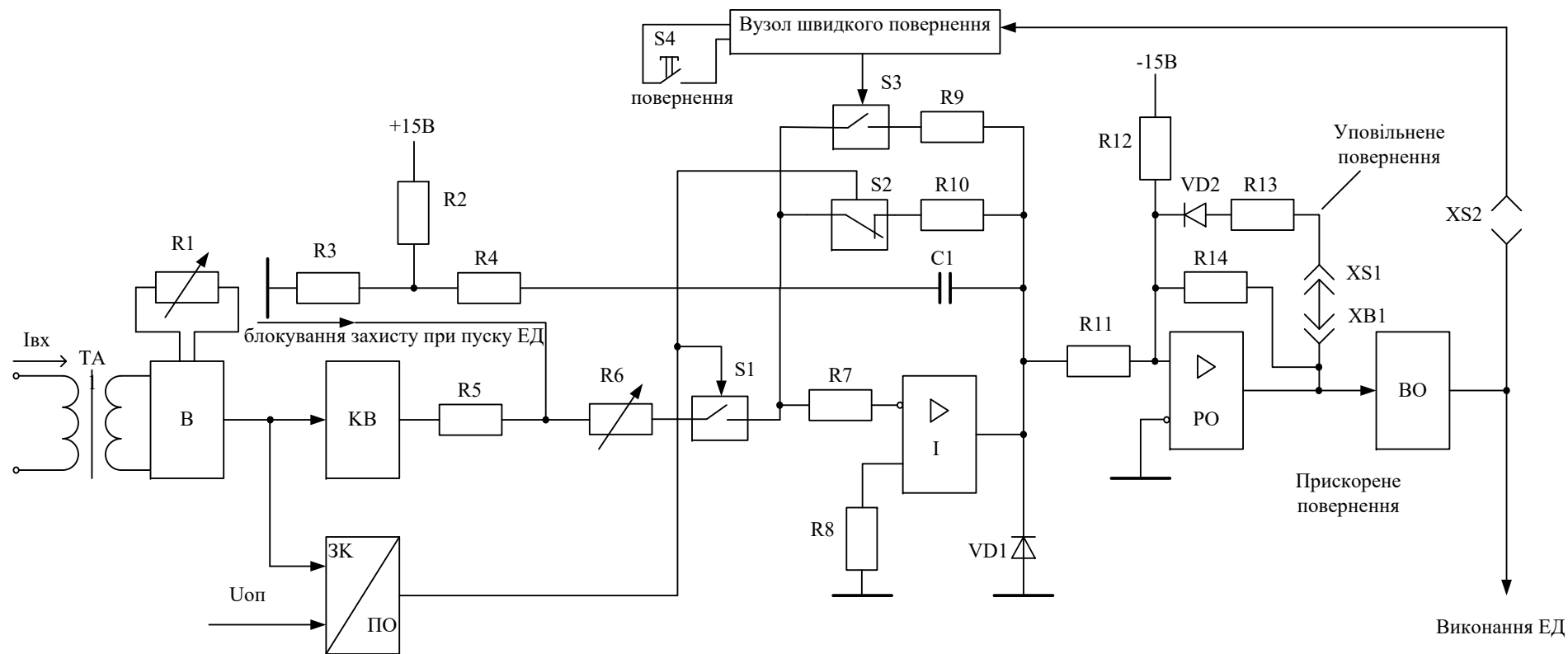
З наведених розрахунків випливає, що реле РТ-80 можна використовувати при коефіцієнті завантаження електродвигуна близько 0,625, причому в (5.10) при виборі $I_{\text{сз}}$ підставляється значення не номінального струму двигуна, а тривало споживаного ним при даному навантаженні. Тоді захист з реле РТ-80 буде надійно вимикати електродвигун при перевантаженні зі струмом вище $1,2I_{\text{ном}}$.

Захист від перевантаження, який реалізує часострумову характеристику спрацювання (5.4) зараз реалізовано в складі комплектних пристроїв РЗА типу ЯРЭ2201. Два блоки, які входять в ЯРЭ2201, перетворювач струму типу ДО220 та вимірювальний орган з залежною витримкою часу типу ТО210, створюють розглядуваний захист. На рис. 5.2 наведена структурна схема цього захисту [7].

Блок перетворення струму типу ДО220 складається з проміжного трансформатора струму ТА1, випрямляча В та елементів для налаштування блока на номінальний струм електродвигуна (резистор R1). Він забезпечує перекриття діапазонів вторинних номінальних струмів від 1 до 15 А. Вихідна напруга блока пропорційна миттєвому значенню вхідного струму.

Вимірювальний блок формування з залежною від струму характеристикою витримки часу типу ТО210 містить пусковий орган ПО у поєднанні зі згладжувальним контуром ЗК, функціональний перетворювач миттєвого значення вхідної напруги з квадратичною характеристикою КВ, інтегратор І зі схемою керування режимами його роботи, органи реагування РО та вихідний ВО.

В даному захисті моделюється адіабатичний характер процесу нагріву та умова його спрацювання виражається (5.4) і (5.9).



В – випрямлювач;
 KB – квадратор;
 ЗК – згладжувальний контур;
 ПО – пусковий орган;
 І – інтегратор;
 РО – орган реагування;

ВО – вихідний орган;
 S1, S2, S3 – електронні ключі;
 ТА1 – проміжний трансформатор струму;
 R1÷R2 – резистори;
 C1 – конденсатор;
 VD1, VD2 – діоди;

XB1 – перемикач;
 XS1, XS2 – перемикач;
 S4 – кнопка «повернення»

Рисунок 5.2 – Структурна схема захисту від перевантаження в комплекті ЯРЭ 2201і

Пусковий орган ПО реагує на напругу, яка прямо пропорційна середньовипрямленому значенню струму $I_{\text{вх}}$, і спрацьовує при перевищенні цією напругою опорної напруги $U_{\text{оп}}$. Він керує роботою інтегратора І за допомогою електронних ключів S1 і S2. Пусковий орган налаштовано на спрацювання при $I_{\text{вх}} \geq 1,15I_{\text{ном}}$. Коефіцієнт повернення ПО не менше 0,95. Пусковий орган може мати похибки за струмом спрацювання, які зумовлені зміною напруги живлення δ_1 та відхиленням температури навколишнього повітря від 25 °С δ_2 . При цьому абсолютні значення похибок складають для δ_1 не більше $\pm 3\%$, а для δ_2 не більше $\pm 1,5\%$ на кожні 10 °С. Пристрій захисту розраховано на роботу в діапазоні температур навколишнього повітря від -20 до +45 °С. Таким чином, максимальне відхилення температури від 25 °С складає 45 °С, що зумовлює максимальне значення $\delta_1 = 6,75\%$.

Отже, захист може мати розкид струмів спрацювання [7]

$$I_{\text{сз min}} = 1,04 \cdot I_{\text{ном}};$$

$$I_{\text{сз max}} = 1,26 \cdot I_{\text{ном}},$$

а мінімальний струм повернення складає

$$I_{\text{пов min}} = 0,988 \cdot I_{\text{ном}}.$$

З наведених розрахунків видно, що при коефіцієнті завантаження електродвигуна, який дорівнює або близький до 1, для унеможливлення помилкового спрацювання захисту в номінальному режимі потрібно налаштувати його на номінальний струм, більший реального значення $I_{\text{ном}}$. Максимально це збільшення може складати 1,065. При цьому значення $I_{\text{сз max}} = 1,346 \cdot I_{\text{ном}}$. При роботі пристрою захисту в більш вузькому температурному діапазоні потрібне менше загрублення захисту.

До спрацювання ПО ключ S2 замкнений, а ключі S1 і S3 розімкнені. При цьому вихідна напруга інтегратора, який виконано на операційному підсилювачі, близька до нуля за рахунок зв'язків його входу, що інвертує, через резистори R4 і R7 з джерелом додатної напруги зсуву R2÷R3 та виходу через діод VD1 з нульовим потенціалом.

Орган реагування РО порівнює робочий сигнал, який прямо пропорційний вихідній напрузі інтегратора І, з гальмівним сигналом, що пропорційний напрузі живлення «-15 В». При $I_{\text{вх}} < I_{\text{сз}}$ він знаходиться в стані неспрацювання.

Залежність вихідної напруги функціонального перетворювача КВ від вхідної визначається за формулою

$$U_{\text{вих.КВ}} = K_1 \cdot U_{\text{вх.КВ}}^2, \quad (5.13)$$

де K_1 – коефіцієнт пропорційності, 1/В.

При $I_{\text{ВХ}} > I_{\text{СЗ}}$ спрацьовує ПО, в результаті чого замикається ключ S1 і розмикається ключ S2. Конденсатор C1 інтегратора починає заряджатися струмом $i_{\text{ВХ}}$, який прямо пропорційний $U_{\text{Вих.КВ}}$ та обернено пропорційний сумі опорів резисторів R5 та R6. Вихідна напруга інтегратора визначається як

$$U_{\text{Вих.І}} = \frac{1}{C_1} \int_0^t i_{\text{ВХ.І}} \cdot dt = \frac{1}{R_{\text{СКВ}} \cdot C_1} \int_0^t U_{\text{Вих.КВ}} \cdot dt,$$

де C_1 – ємність конденсатора C1;
 $R_{\text{СКВ}} = R5 + R6$.

При незмінному рівні $I_{\text{ВХ}}$ в процесі набору витримки часу значення $U_{\text{Вих.І}}$ залежить від часу з моменту спрацювання ПО як

$$U_{\text{Вих.І}} = K_2 \left(\frac{I_{\text{ВХ}}}{I_{\text{НОМ}}} \right)^2 \cdot t,$$

де K_2 – коефіцієнт пропорційності, В/с.

Після зростання $U_{\text{Вих.І}}$ до значення $U_{\text{с.РО}}$, при якому робочий сигнал на вході РО стає більше гальмівного, РО спрацьовує і через вихідний орган ВО подає команду на вимикання ЕД.

При незмінному струмі перевантаження час спрацювання захисту визначається як

$$t_{\text{СЗ}} = \frac{U_{\text{с.РО}}}{K_2 \left(\frac{I_{\text{ВХ}}}{I_{\text{НОМ}}} \right)^2},$$

що відповідає (5.4), причому значення A_2 може регулюватися в межах від 100 до 1000 с зі ступенями через 100 с за рахунок змінювання опору резистора R6.

Перевагою даного захисту є те, що орган формування витримки часу реагує на діюче значення струму незалежно від форми його кривої, що дозволяє використовувати його для електродвигунів з тиристорним керуванням. Він діяв би з більшою точністю, якби вхід ПО було б підключено не до виходу випрямляча В, а до виходу квадратора КВ.

Залежність часу спрацювання захисту від рівня струму перевантаження виконується в діапазоні струмів $(1,15 \div 8)I_{\text{НОМ}}$. При цьому напруга на виході інтегратора відповідає перевищенню температури електродвигуна відносно температури охолоджувального повітря. Якщо перевантаження усунулося до вимикання двигуна, то в захисті моделюється процес його охолодження. Для цього після повернення ПО в стан неспрацювання розмикається ключ S1 та замикається ключ S2. При цьому вихідна напруга інтегратора спадає за експонентою

$$U_{\text{вих.І}} = U_{\text{вих.Іо}} \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (5.14)$$

де $U_{\text{вих.Іо}}$ – напруга на виході інтегратора після усунення перевантаження;

T_0 – постійна часу охолодження електродвигуна, яка для даного захисту приймається рівною 240 с.

При повторному перевантаженні електродвигуна до закінчення процесу розсіювання тепла від попереднього перевантаження $t_{\text{сз}}$ скорочується.

В низці випадків при пуску навантаженого електродвигуна з холодного стану і тривалому часі пуску температура двигуна ще не встигає досягнути гранично допустимого значення, а захист може встигнути спрацювати, тому що він розрахований на дію при перевантаженні вже нагрітого електродвигуна. Тому в захисті передбачена можливість його блокування на певний час, протягом якого температура обмотки при пуску електродвигуна підвищується до значення $\theta_{\text{тр.доп.}}$. Після закінчення витримки часу, яка задається зовнішнім реле, дозволяється дія інтегратора, який моделює перегрів обмотки, що призводить до вимикання двигуна при заклинюванні ротора або недопустимо затягнутому процесі пуску.

В захисті передбачена можливість блокування повторного пуску електродвигуна після його вимикання захистом від перевантаження, якщо за умовами експлуатації цей пуск недопустимий до закінчення охолодження двигуна. Час блокування: $t_{\text{охол}} = 2 \cdot T_0$. Для цього перемикач XS1 замикається перемичкою XB1, і в коло позитивного зворотного зв'язку РО додатково до постійно ввімкненого резистора R14 вводиться резистор R13. При цьому коефіцієнт повернення РО знижується до 0,05 і напруга на виході інтегратора під час його зниження, відповідно до (5.14), виявляється достатньою для утримання РО в стані спрацювання протягом часу $t_{\text{охол}}$ (уповільнене повернення РО).

У режимі без блокування повторного ввімкнення (перемикач XB1 замикає перемикач XS2, а перемикач XS1 розімкнений) коефіцієнт повернення РО достатньо великий, а конденсатор С1 розряджається достатньо швидко за рахунок замикання при спрацюванні ВО ключа S3 в колі його швидкого розряду через резистор R9 з невеликим опором. При перевірці захисту також є можливість швидкого його повернення при натискуванні кнопки S4 («Повернення»).

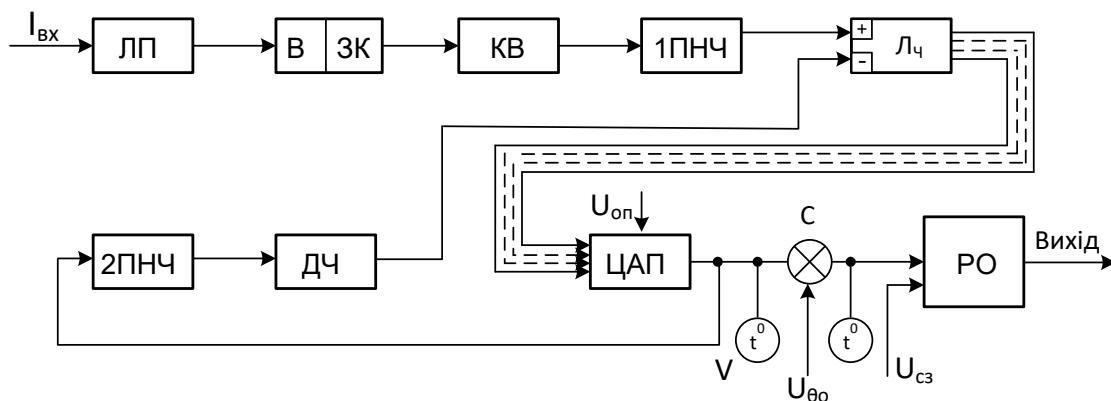
Фірмами закордонних країн випускаються різні модифікації захисту від перевантаження, які за принципом дії аналогічні захисту типу ЯРЭ2201 [7, 12].

Захист від перевантаження з безперервним контролем теплового режиму з урахуванням змінюваних умов навколишнього та охолоджувального середовищ. Такий захист є особливо ефективним для електродвигунів, які працюють в режимі різко змінного навантаження та в

постійно змінюваних температурних умовах навколишнього середовища (електродвигуни стрічкових конвеєрів паливоподачі, екскаваторів тощо).

Найбільш повно врахування усіх умов роботи електродвигуна задовольняється в захистах з цифровим та цифроаналоговим моделюванням теплових процесів в двигунах. В них як елемент, який фіксує перегрів електродвигуна, застосовується цифровий реверсивний лічильник, який дозволяє отримувати значно більші витримки часу порівняно з конденсатором. Перегрів відображається також і в аналоговій формі за допомогою цифроаналогового перетворювача (ЦАП), який керується лічильником. Це дозволяє використовувати за елемент, який керує роботою лічильника, перетворювач «напруга–частота», що випускається в інтегральному виконанні, а також поєднати захист зі вхідними сигналами, що задають температуру навколишнього середовища і гранично допустиму температуру, та виводити аналоговий сигнал – напругу для ввімкнення вимірювальних пристроїв – показчиків перегріву і температури обмотки електродвигуна.

Найбільш типовим таким захистом є захист типу 7SK2 фірми «Siemens», структурна схема якого наведена на рисунку 5.3.



- ЛП – лінійний перетворювач вхідного струму в напругу;
- В – випрямляч;
- ЗК – згладжувальний контур;
- КВ – квадратор, напруга на виході якого прямо пропорційна квадрату середньовипрямленого струму;
- 1ПНЧ, 2ПНЧ – перетворювачі напруги в частоту;
- Лч – реверсивний лічильник з двома входами – прямого та зворотного рахування;
- ДЧ – дільник частоти;
- ЦАП – цифроаналоговий перетворювач;
- С – суматор;
- РО – реагуювальний орган

Рисунок 5.3 – Структурна схема захисту від перевантаження типу 7SK2 (фірма «Siemens»)

Вихідна напруга квадратора КВ має вигляд прямокутних імпульсів, амплітуда та тривалість яких прямо пропорційні вхідному струму. Задана при цьому середня напруга на виході КВ прямо пропорційна квадрату вхідного струму, тобто кількості тепла, яке виділяється електродвигуном за одиничний проміжок часу. Ця напруга за допомогою 1ПНЧ перетворюється в частоту проходження імпульсів, які подаються на вхід прямого рахунку Лч. Коефіцієнт перетворення 1ПНЧ регулюється при встановленні захисту згідно з тепловою сталою часу захищеного ЕД. Обсяг заповнення лічильника Лч відповідає перегріву. За допомогою ЦАП дискретні сигнали з виходів Лч перетворюються в аналоговий сигнал, який надходить на вхід 2ПНЧ. Коефіцієнт ділення ДЧ, як і коефіцієнт перетворення 1ПНЧ, задається при встановленні захисту таким чином, щоб 2ПНЧ у поєднанні з ДЧ моделював процес охолодження електродвигуна, тобто частота імпульсів з виходу ДЧ має відповідати кількості тепла, яке віддається при охолодженні за одиничний проміжок часу. Вихід ДЧ пов'язаний зі входом зворотного рахування Лч. Під час увімкнення електродвигуна в перший момент на вхід Лч надходять тільки імпульси прямого рахування, імпульси зворотного рахування відсутні. При збільшенні числа, яке записано в лічильнику, зростає напруга на виході ЦАП, і імпульси зворотного рахування слідує з частотою, яка зростає. Оскільки на початку переважають імпульси прямого рахування, то здійснюється підвищення вихідної напруги ЦАП, яка пропорційна перевищенню температури. Потім зростання цієї напруги уповільнюється і при рівності частот проходження імпульсів прямого та зворотного рахування припиняється. Ця рівність встановлюється при досягненні кінцевої температури. Напруга з виходу ЦАП надходить на один з входів суматора С, до другого входу якого підводиться напруга U_{00} , яка моделює максимальну температуру охолоджувального повітря для умов експлуатації двигуна, наприклад 40 °С. Сума цих напруг з виходу суматора С подається на один з входів реактивного органу РО, до другого входу якого підведена напруга спрацювання захисту $U_{сз}$, яка відповідає тривало допустимій температурі електродвигуна. Захист спрацьовує на вимикання двигуна, коли напруга на виході суматора, що відповідає температурі двигуна, стає більше $U_{сз}$. Для індикації перегріву та температури використовуються вимірювальні прилади, які підключені до виходів ЦАП і суматора.

Таким чином, в даному захисті моделюється тепловий процес в електродвигуні [7], а його часострумова характеристика спрацювання відповідає (5.1), причому теплова постійна часу T_n може моделюватися в діапазоні від 120 С до 1320 С шляхом змінювання коефіцієнта перетворення напруги в частоту імпульсів перетворювача 1ПНЧ та коефіцієнта ділення дільника частоти ДЧ.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

До розділу 1

1. Як підключаються електродвигуни до мережі живлення?
2. Які характеристики мають механізми?
3. Які пристрої збудження мають синхронні двигуни?
4. Як здійснюється пуск асинхронних двигунів?
5. Як здійснюється пуск синхронних двигунів?
6. Як здійснюється самозапуск електродвигунів?
7. Як виконується динамічне гальмування синхронних двигунів?

До розділу 2

1. Дайте характеристику пошкодженням та ненормальним режимам роботи електродвигунів.
2. Які процеси виникають в електродвигунах при однофазних замиканнях на землю або корпус?
3. Назвіть особливості процесів, які відбуваються при замиканнях на землю та мають враховуватися при виконанні захисту електродвигунів.
4. Як впливають багатофазні та виткові короткі замикання в обмотці статора на електродвигун?
5. Як визначаються струми короткого замикання в електродвигунах?
6. Який вплив чинить нагрів на електродвигуни при перевантаженнях?
7. Назвіть основні причини виникнення перевантаження електродвигунів.
8. Як впливають несиметричні режими на роботу електродвигунів?
9. Як змінюються струми статора та ротора асинхронного двигуна при обриві фазного проводу?
10. Назвіть причини втрати живлення електродвигунів та їх наслідки.
11. Як вибирається витримка часу захистів електродвигунів?
12. Які наслідки виникають в синхронних двигунах при їх переході в асинхронний режим?
13. Назвіть аварійні режими пристроїв збудження синхронних двигунів та їх наслідки.

До розділу 3

1. Які структурні схеми релейного захисту Вам відомі?
2. Яку роль виконують вимірювальні трансформатори в релейному захисті?
3. Які особливості мають трансформатори струму нульової послідовності?
4. Як виконуються фільтри струму та напруги нульової послідовності?
5. Наведіть схеми з'єднання трансформаторів струму нульової послідовності для захисту типу ЗЗП-1.

6. Як працює трансформатор струму нульової послідовності з підмагнічуванням?
7. Які загальні вимоги висуваються до вимірювальних органів захистів електродвигунів?
8. З яких елементів складається логічна частина релейного захисту?
9. Як виконуються сигнальні органи захистів в електродвигунах?
10. Дайте характеристику пристроям оперативного струму.

До розділу 4

1. Які основні задачі релейного захисту електродвигунів?
2. Як виконується захист від замикань на землю в обмотці статора електродвигуна?
3. Як виконується захист від багатофазних замикань в обмотці статора електродвигуна?
4. Дайте характеристику струмовій відсічці електродвигунів.
5. Як виконується диференціальний захист електродвигунів та підвищується його чутливість?
6. Наведіть схеми виконання диференціального захисту електродвигунів з реле типу РНТ-565 та ДЗТ-11.
7. Як виконується диференціально-фазний захист електродвигунів?

До розділу 5

1. Як виконується захист від перевантаження електродвигуна?
2. Як розраховуються уставки спрацювання захисту від перевантаження електродвигуна?
3. Які схеми захисту від перевантаження електродвигунів вам відомі?
4. Як виконується захист від перевантаження на індукційних реле струму?
5. Як виконується захист від перевантаження з безперервним контролем теплового режиму та з врахуванням умов навколишнього і охолоджуючого середовища, що змінюються?

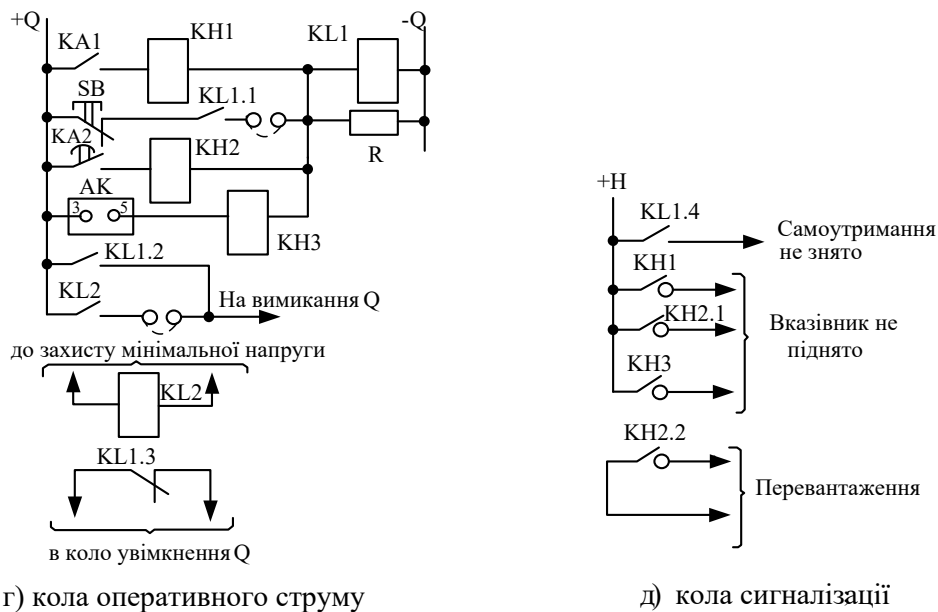
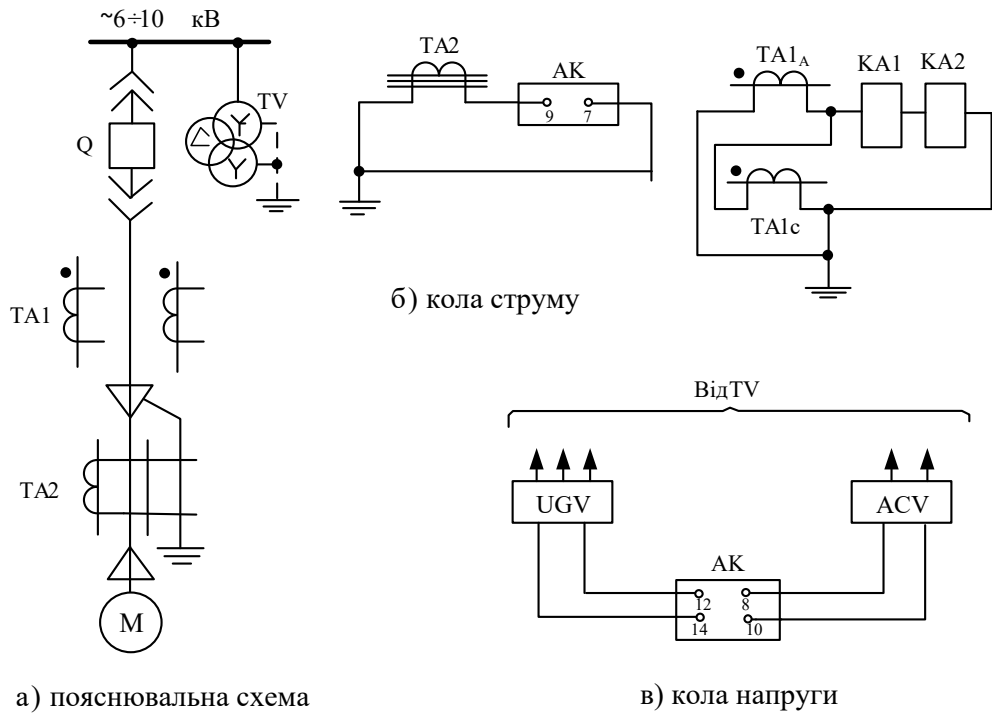
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чернобровов Н. В. Релейная защита. М. : Энергия, 1974. 680 с.
2. Беркович М. А., Молчанов В. В., Семенов В. А. Основы техники релейной защиты. М. : Энергоатомиздат, 1984. 580 с.
3. Беркович М. А. Основы техники и эксплуатации релейной защиты. М. : Энергия, 1971. 584 с.
4. Андреев В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения. М. : Высшая школа, 1985. 391 с.
5. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Т. 1. Электроснабжение ; под общ. ред. А. А. Федорова. М. : Энергоатомиздат, 1986. 568 с.
6. Справочник по проектированию электроснабжения ; под ред. Ю. Г. Барыбина и др. М. : Электроатомиздат, 1990. 576 с.
7. Корогодский В. Н., Кужеков С. Л., Паперно Л. Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М. : Энергоатомиздат, 1987. 248 с.
8. Байтер Н. И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд. М. : Энергия, 1980. 104 с.
9. Фабрикант В. Л., Андреев В. А., Бондаренко Е. В. Задачник по релейной защите. М. : Высш. школа, 1971. 608 с.
10. Богаенко И. Н., Сердюк Ю. В., Шатунов М. А. Температурная защита асинхронных электродвигателей. К. : Техніка, 1987. 94 с.
11. Авербух А. М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Л. : Энергия, 1975. 416 с.
12. Ванин В. К. Релейная защита на элементах вычислительной техники. Л. : Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
13. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 176 с.
14. Релейные схемы и системы. Каталог продукции. К. : РЕЛСіС, ПАО «Электротехнический завод», 2011. 135 с.
15. Лагутін В. М., Тептя В. В., Вишневський С. Я. Власні потреби електричних станцій : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2009. 102 с.
16. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей ; под ред. Л. Г. Мамиконянца. М. : Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
17. Реле защиты / Алексеев В. С., Варганов Г. П., Панфилов Б. И., Розенблюм Р. З. М. : Энергия, 1976. 464 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

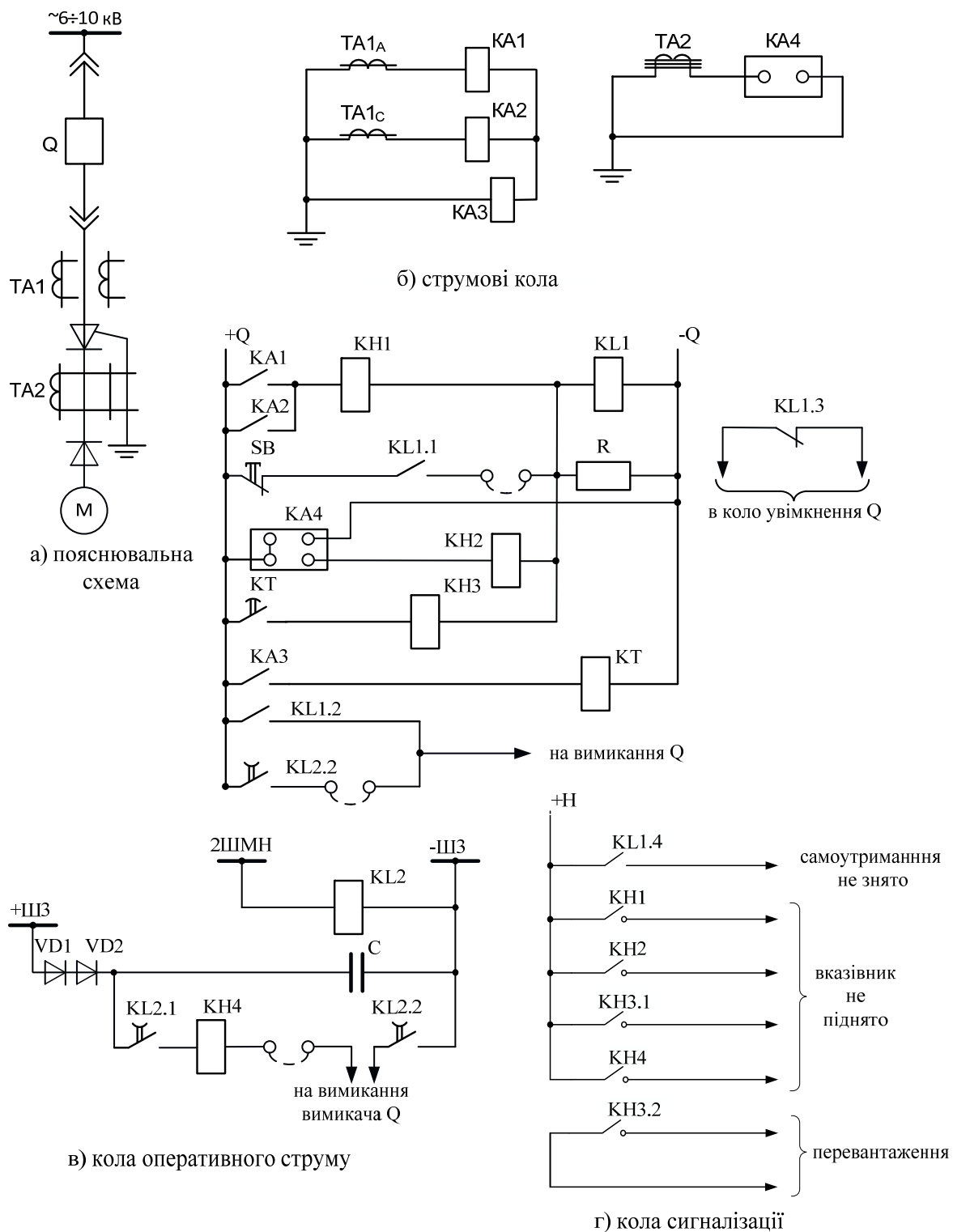
Схеми захистів електродвигунів



TV – трансформатор напруги;
 TA1, TA2 – трансформатори струму;
 SB – кнопка керування типу КЕ-011;
 UGV – блок живлення типу БПН-11;
 KL1, KL2 – проміжне реле типу РП-23;
 АК – пристрій захисту від замикань на землю типу ЗЗП-1;
 АСV – допоміжний пристрій типу ВУ-1

Q – вимикач;
 R – резистор типу ПЕВ-50;
 KA1 – реле струму типу РТ-40;
 KA2 – реле струму типу РТ-82;
 КН1÷КН3 – вказівні реле типу РУ-1;

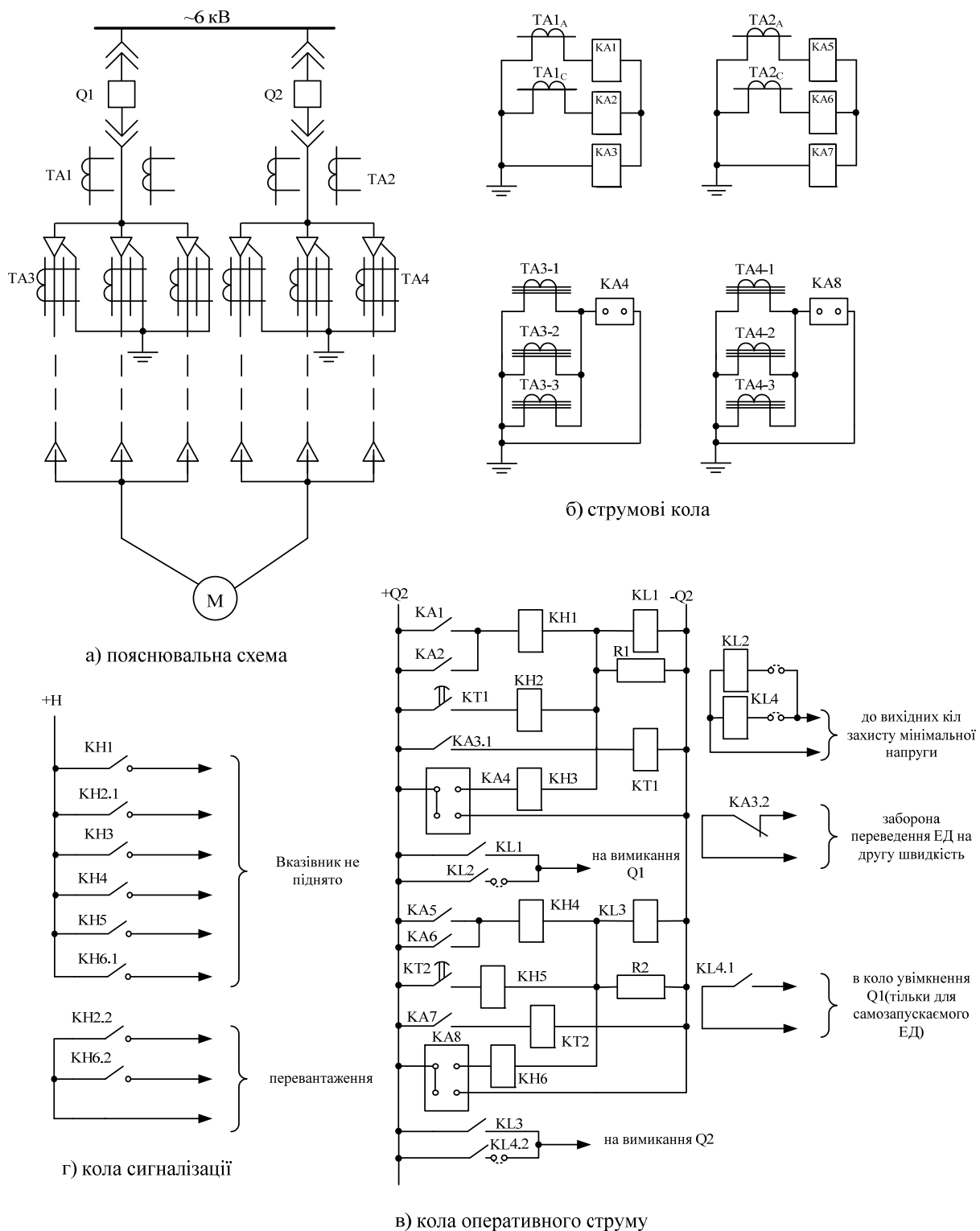
Рисунок А.1 – Схема захисту асинхронного двигуна
 потужністю менше 2000 кВт



TA1, TA2 – трансформатори струму;
 KA1÷KA3 – реле струму типу РТ-40;
 KL1 – реле проміжне типу РП-23;
 KL2 – реле проміжне типу РП-252;
 KH1÷KH4 – реле вказівне типу РУ-1;
 SB – кнопка керування типу КЕ-011;

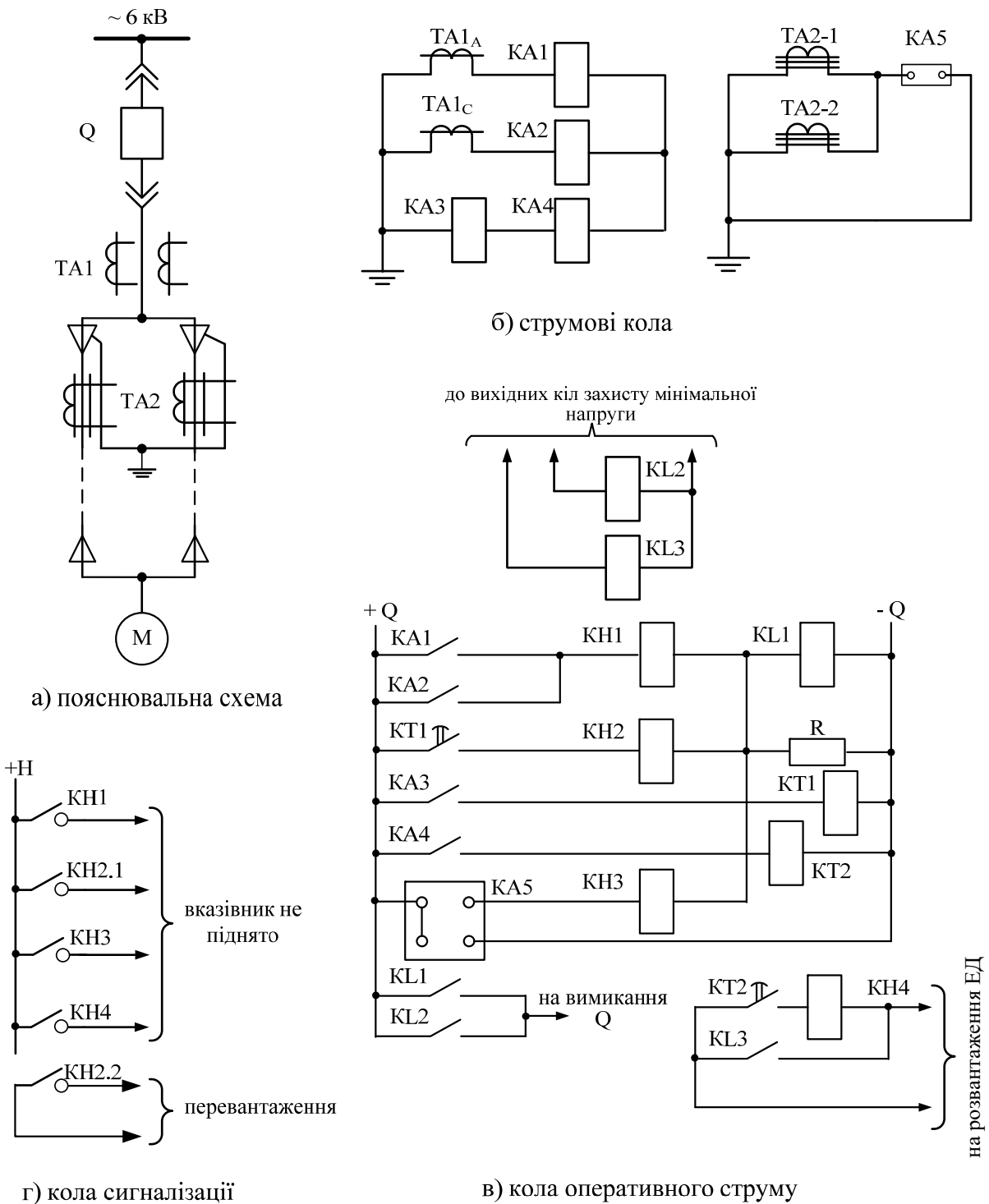
Q – вимикач;
 KA4 – реле струму типу РТЗ-51;
 KT – реле часу типу ВЛ-23;
 VD1, VD2 – діоди типу Д226Б;
 C – конденсатор типу МБГО;
 R – резистор типу ПЭВ-50

Рисунок А.2 – Схема захисту асинхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт



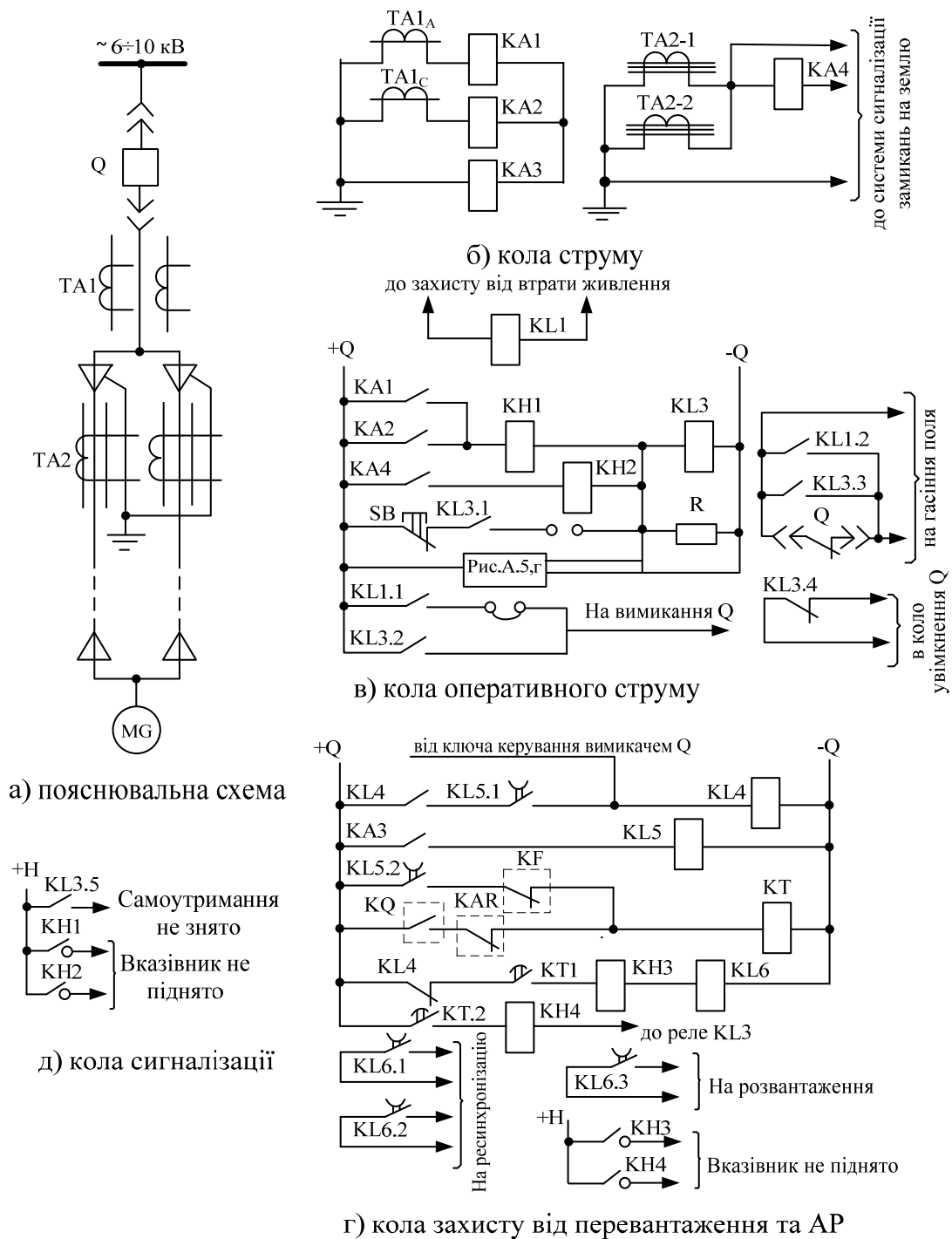
ТА1÷ТА4 – трансформатори струму; Q1, Q2 – вимикачі;
 КА1÷КА3, КА5÷КА7 – реле струму типу РТ-40;
 КА4, КА8 – реле струму типу РТЗ-51; КТ1, КТ2 – реле часу типу ВЛ-23;
 КЛ1÷ КЛ4 – реле проміжне типу РП-23;
 КН1÷КН6 – реле вказівне типу РУ-1; R1, R2 – резистори типу ПЭВ-50

Рисунок А.3 – Схема захисту двошвидкісного асинхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт



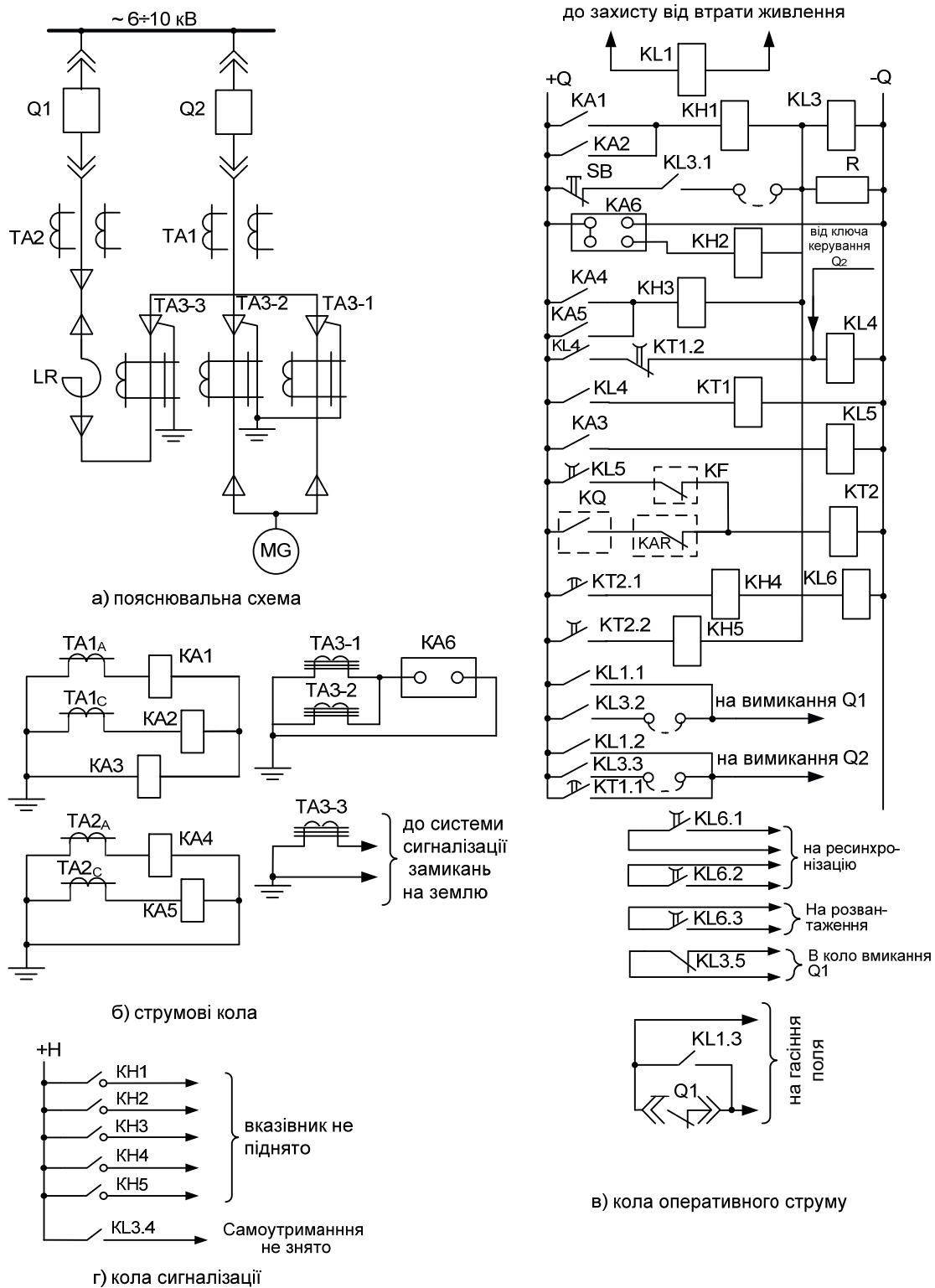
Q – вимикач; TA1, TA2 – трансформатори струму; KA1÷KA4 – реле струму типу РТ-40; KA5 – реле струму типу РТЗ-51; КТ1, КТ2 – реле часу типу ВЛ-23; KL1÷KL3 – реле проміжне типу РП-23; КН1÷КН4 – реле вказівне типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50

Рисунок А.4 – Схема захисту асинхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт з розвантаженням перед самозапуском



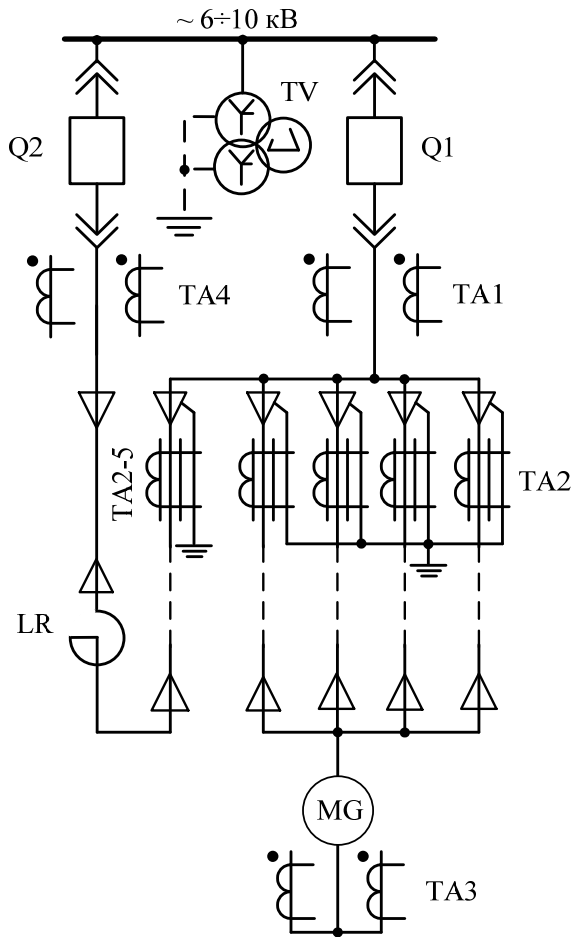
ТА1, ТА2 – трансформатори струму; Q – вимикач;
 КА1÷КА4 – реле струму типу РТ-40; КТ – реле часу типу ВЛ-34;
 КЛ1, КЛ3, КЛ4 – реле проміжне типу РП-23;
 КЛ5, КЛ6 – реле проміжне типу РП-252;
 КН1÷КН4 – реле вказівне типу РУ-1; R1 – резистор типу ПЭВ-50;
 SB – кнопка керування типу КЕ-011;
 KF – контакт, який розмикається при форсуванні збудження;
 KQ – контакт, який замикається при увімкненні Q;
 KAR – контакт, який замикається при зниженні струму збудження

Рисунок А.5 – Схема захисту синхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт

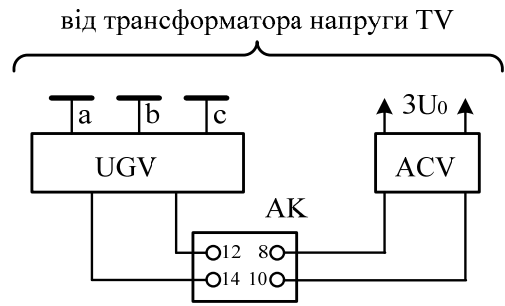


LR – пусковий реактор; Q1, Q2 – вимикачі; TA1÷TA3 – трансформатори струму; KA1÷KA5 – реле струму типу РТ-40; KA6 – реле струму типу РТ3-51; KL1, KL3, KL4 – реле проміжне типу РП-23; KL5, KL6 – реле проміжне типу РП-252; KT1, KT2 – реле часу типу ВЛ-34; КН1÷КН5 – реле вказівні типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50; SB – кнопка керування типу КЕ-011; KF – контакт, який розмикається при форсуванні збудження; KQ – контакт, який замикається при увімкненні Q; KAR – контакт, який замикається при зниженні струму збудження

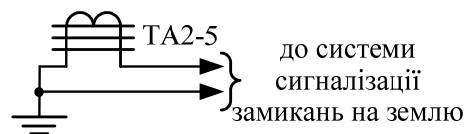
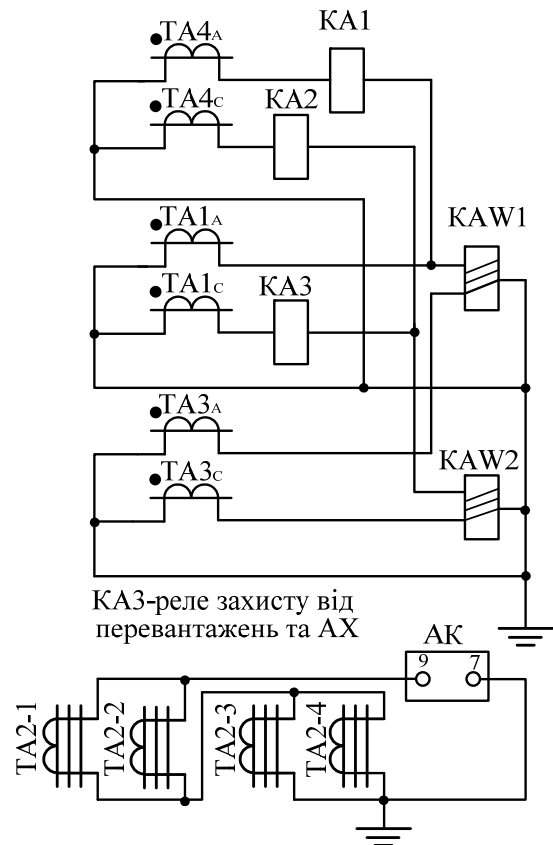
Рисунок А.6 – Схема захисту синхронного двигуна потужністю менше 5000 кВт з реакторним пуском



а) пояснювальна схема



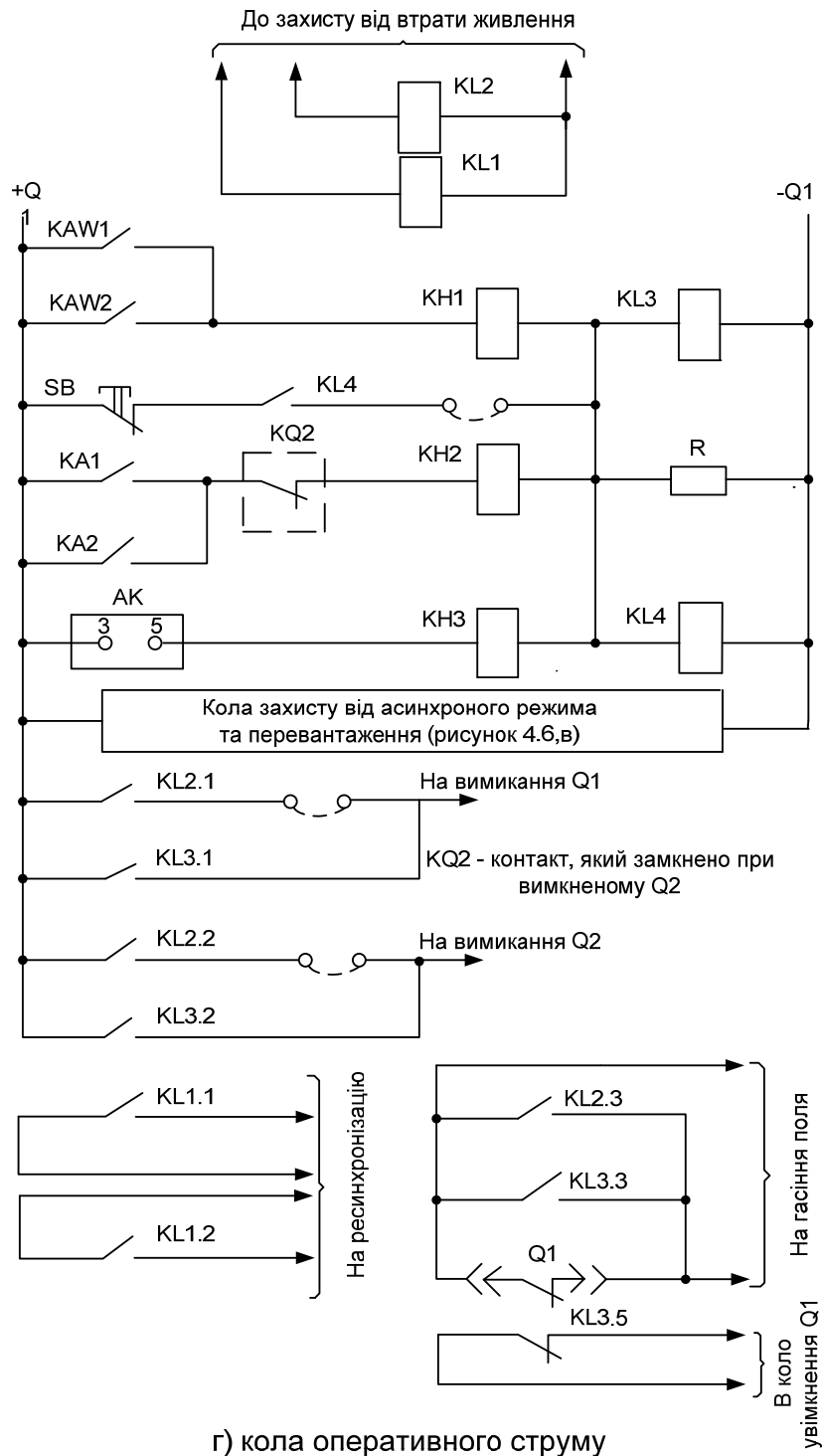
б) кола напруги



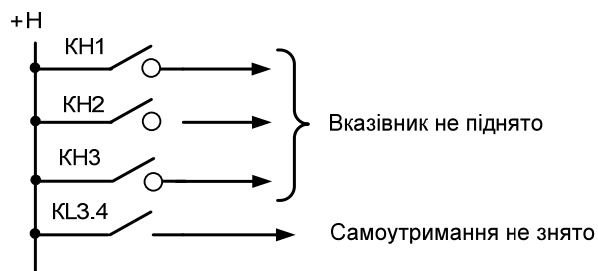
в) кола струму

LR – пусковий реактор; TV – трансформатор напруги; Q1, Q2 – вимикачі;
 TA1÷TA4 – трансформатори струму; SB – кнопка керування типу КЕ-011;
 KAW1, KAW2 – реле струму диференціальне типу ДЗТ-11;
 KA1÷KA3 – реле струму типу РТ-40; KL1÷KL4 – реле проміжні типу РП-23;
 КН1÷КН3 – реле вказівні типу РУ-1; R – резистор типу ПЭВ-50;
 АК – пристрій захисту від замикань на землю типу ЗЗП-1;
 UGV – блок живлення типу БПН-11/2; ACV – допоміжний пристрій типу ВУ-1

Рисунок А.7 – Схема захисту синхронного двигуна потужністю більше 5000 кВт з реакторним пуском

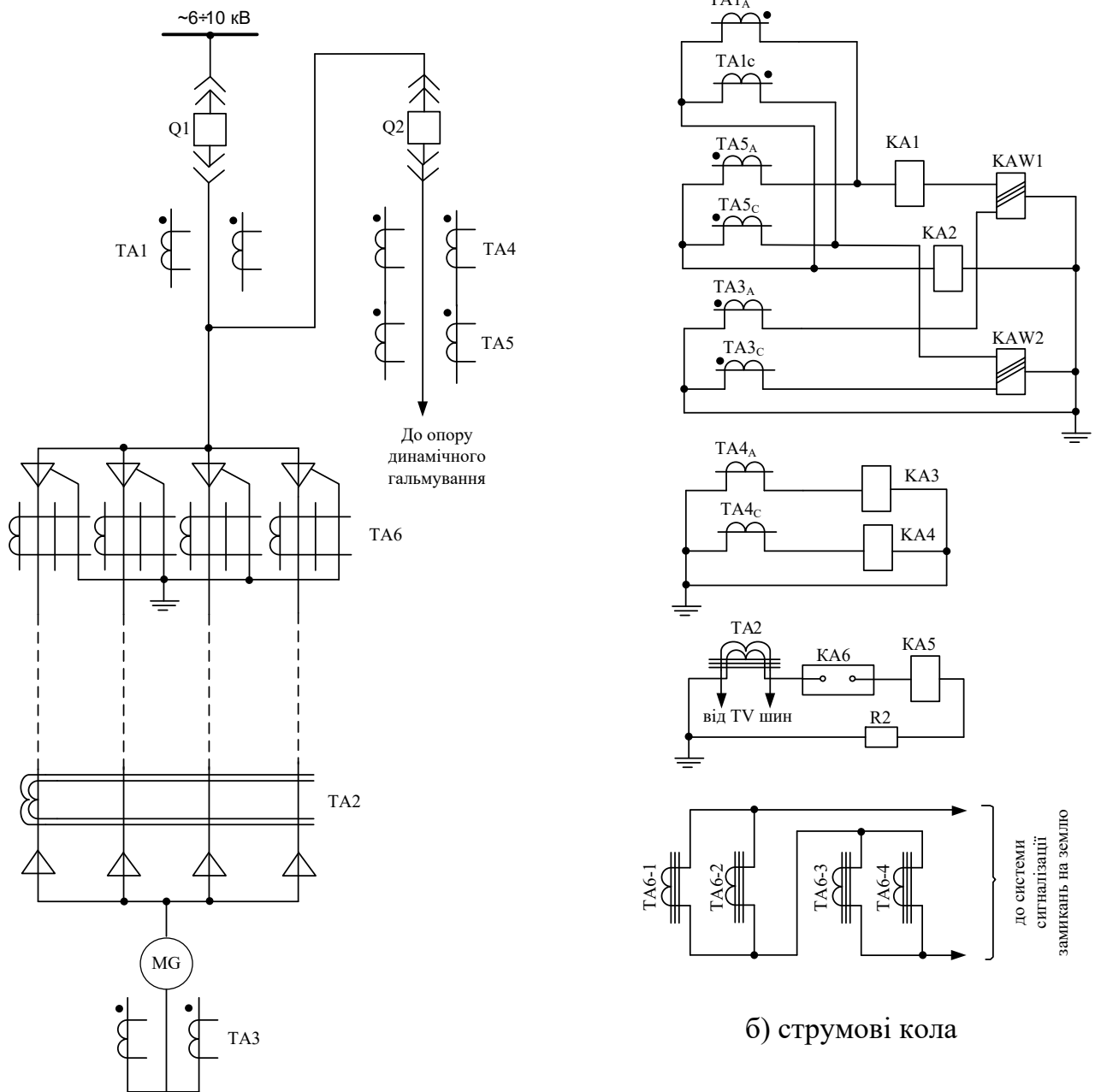


г) кола оперативного струму



д) кола сигналізації

Рисунок А.7 (продовження)



а) пояснювальна схема

Q1, Q2 – вимикачі; TA1÷TA6 – трансформатори струму; KAW1, KAW2 – реле струму диференціальне типу ДЗТ-11; KA1, KA3, KA4 – реле струму типу РТ-40; KA2 – реле струму типу РТ-82; KA5 – реле струму типу РТ-40/6; KA6 – реле струму типу РТЗ-51; KL1, KL2 – реле проміжне типу РП-23; KL3 – реле проміжне типу РП-251; КТ – реле часу типу РВ-123; КТ1 – реле часу типу РВ-124; КТ2 – реле часу типу ВЛ-34; КН1÷КН8 – реле вказівне типу РУ-1; SB – кнопка керування типу КЕ-011; R1, R2 – резистор типу ПЭВ-50

Рисунок А.8 – Принципова схема захисту синхронного двигуна номінальною потужністю більше 5000 кВт з різкозмінним навантаженням та динамічним гальмуванням

Додаток Б
Технічні дані електродвигунів 6 кВ власних потреб електростанцій

Таблиця Б.1 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока 200 МВт на газомазутному паливі

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{пуск*}$	$M_{макс*}$	J , кг·м ²	ККД, %
Машинна зала										
Живильний насос	4АЗМ-3200/6000	3200	348	0,915	2985	5,3	0,9	2,1	2,9	96,7
Підйомний насос ежекторів	ДАЗО-4-400Х-4	314	37	0,87	1485	7,0	1,3	2,8	12	94,3
Масляний пусковий насос	А-13-46-4	800	90	0,91	1485	5,4	1,0	2,1	200	94
Конденсатний насос II ступеня	АВ-113-4М302	250	27,8	0,89	1480	6,5	1,3	2,4	12,25	92
Резервний збуджувач	ДАЗ-1810-6	1250	143	0,91	990	6,5	1,3	2,2	80	92
Котельне відділення										
Мережний насос	А-114-4М	320	37	0,985	1485	6,5	1,6	2,8	60	92,8
Насос кислотного промивання	2АЗМ-1600/6000	1600	177	0,9	2975	5,5	1,3	2,1	25,5	96,5
Вентилятор гарячого дуття	ДАЗО2-400Х-4	400	47	0,87	1485	7,0	1,3	2,8	12	96,5
Вентилятор дугтьовий	ДАЗО2-18-76-8/10	$\frac{750}{1250}$	$\frac{92}{147}$	$\frac{0,82}{0,88}$	$\frac{595}{744}$	$\frac{6,56}{6}$	$\frac{0,95}{0,9}$	$\frac{2,7}{2,4}$	1350	$\frac{91,5}{92}$
Димотяг	ДАЗО2-17-69-8/10	$\frac{500}{1000}$	$\frac{64}{118,5}$	$\frac{0,81}{0,86}$	$\frac{594}{740}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{0,9}{0,8}$	$\frac{2,5}{2,3}$	500	$\frac{92}{93}$
Блочна насосна станція										
Циркуляційний насос	ДВДА-2-173/46-12-16К	$\frac{500}{1000}$	$\frac{75}{128}$	$\frac{0,79}{0,87}$	$\frac{375}{500}$	$\frac{4,5}{6,0}$	$\frac{0,6}{0,8}$	$\frac{2,2}{2,5}$	500	$\frac{91,2}{92,8}$
Протипожежний насос	АВ-113-4М	250	28,7	0,89	1480	6,5	1,3	2,4	12,25	92

Таблиця Б.2 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока 300 МВт на вугільному паливі

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{пуск*}$	$M_{макс*}$	J , кг·м ²	ККД, %
Машинна зала										
Живильний насос	АВ-8000/6000	8000	875	0,91	2960	6	0,95	2,3	148	96,7
Передувімкнений насос	2АЗМ-500/6000	500	54,8	0,91	2980	6	1,2	2,1	5	95,5
Конденсатний насос I ступеня	АВ-114-4	320	39	0,85	1480	6,5	1,5	2,4	12,25	91,5
Конденсатний насос II ступеня	АОЗ-400М-6	200	24,4	0,85	990	7,0	1,0	2,0	90	92,5
Насос зливної води	АОЗ-400М-4	250	28,7	0,90	1485	6,5	1,2	2,0	54	93,0
Підйомний насос ежекторів	ДАЗО2-16-54-8	630	75,5	0,85	740	4,8	0,75	2,0	137,5	93,5
Циркуляційний насос	АВ-16-49-10	1600	186	0,87	593	4,5	0,7	2,1	775	94,8
Вентилятор гарячого дуття	ДАЗО-12-55-8М	250	32	0,81	740	5,0	0,9	2,2	185	92,0
Котельне відділення										
Димотяг вістовий	АО2-21-39-16	200	250	0,82	375	6	1,0	2,2	1050	94,1
Вентилятор дуттьовий	ДАЗО2-18-59-6/8	1600	194,5	0,85	994	6,3	0,7	2,3	1050	92
		685	92	0,87	746	7	0,95	2,6		90,2
Млин	ДАЗО2-17-54-8	800	96	0,87	744	6,8	1,05	2,6	387,5	93,5
Насосне перекачування води з водосховища										
Насос	ДВДА-173/49-12-46К	800	90	0,92	495	5	0,9	2,2	950	93,0
		400	45		373	4,8	1,0	2,4		
Берегова насосна										
Циркуляційний насос	ВАН-16-31-12	800	104	0,80	495	5,2	0,8	2,5	725	92,6
Багерний насос	ДАЗО-13-70-8М	500	62	0,89	740	5,8	1,2	2,1	475	93,4

Таблиця Б.3 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока 500 МВт на вугільному паливі

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{пуск*}$	$M_{макс*}$	J , кг·м ²	ККД, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Блочні споживачі										
Живильний насос	АВ-8000/6000	8000	875	0,91	2960	6	0,95	2,3	148	96,7
Циркуляційний насос	ВАН 143/51-10У3	1250	154	0,827	593	4,2	0,7	2,0	450	94,4
Конденсатний насос I ступеня	АВ-16-36-10	1250	149	0,854	593	4,8	0,8	2,2	650	94,5
Конденсатний насос II ступеня	ДАЗО4-450Х-4У1	630	69,8	0,87	1485	7	1,2	2,5	22	94,7
Димотяг	АВ-17-69-16К	2500	322	0,792	370	4,5	4,5	0,7	1,9	94,3
Дутьовий вентилятор	АО2-21-39-16У1	2000	235	0,82	373	6	1	2,2	1050	94,1
Молотковий млин	ВАН-17-39-16	1250	159,5	0,801	370	5,2	0,8	2,4	2150	94,1
Насос системи регулювання	АО3-400М-6У2	200	22,4	0,86	955	6,5	1,2	2,2	4,25	93,5
Зливний насос ПНТ	АО3-400М-6Т2	160	18,1	0,85	955	7	1	2	16,25	93
Загальностанційні споживачі										
Молоткова дробарка	АН3-2-15-69-6У3	1250	145	0,871	990	6,3	1,2	2,7	97	95,2
Компресор	ДА4-560УК-4У3	2000	228	0,879	1485	5,7	0,9	2,0	55	96
Мостовий перевантажувач	АВ-15-36-8	1000	116	0,880	740	4,4	0,72	2,1	275	94,3
Насос освіленої води	ДВДА-215/64-16-20	710	103	0,711	298	4,4	0,9	2,1	2750	92
Насос кислотного промивання	ДВДА-260/74-14-16КУ4	3150	400	0,804	425	6	0,7	2,7	8000	94,2

Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Багерний насос	ДВДА-173/29-10-12	315	42,5	0,748	495	5,2	0,9	1,9	550	90,8
Компресор	ДА4-560Х-6У3	1250	146,5	0,855	289	5,3	1,1	1,9	70	95,7
Компресор	ВА02-450LA-2	315	33,3	0,91	2970	6,5	1,1	2,9	14,4	94,4
Мазутонасос II підйома	А4-450Х-8У3	400	50	0,82	740	5	1	1,9	36	93,9
Конвеєр стрічковий	А4-400ХК-4У4	400	47	0,868	1480	5,7	1,1	2,3	10	94,3
Конвеєр стрічковий	А4-400Х-8У3	250	32	0,807	737	5	1	1,9	19	93,2
Насос сітьової води	ДА304-400Х-6У1	315	35,7	0,85	987	6,5	1,3	2,5	19	93,9

Таблиця Б.4 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока 800 МВт на газомазутному паливі

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{\text{пуск}^*}$	$M_{\text{макс}^*}$	J , кг·м ²	ККД, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Машинна зала										
Конденсатний насос I ступеня	АВ-400-1000	400	47,1	0,87	985	4,7	1,0	2,1	22	94,0
Конденсатний насос II ступеня	2АЗМ-800/6000	800	89,5	0,90	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	95,7
Зливної води	АОЗ-400М-4	250	28,7	0,90	1485	7,0	1,0	2,0	54	93,0
Насос ежекторної установки	ДАЗО-12-55-6М	320	38,5	0,86	980	6,8	1,4	2,9	185	91,8
Насос охолоджувальної води	ДАЗО-12-55-8М	250	32,0	0,81	735	5,0	1,1	2,2	185	92,5
Насос контуру газоохолоджувачів	ДАЗО-12-55-8М	250	32,0	0,81	735	5,0	1,1	2,2	185	92,5
Насос додавання води	ДАЗО4-400У-4	500	58,5	0,81	1485	7,0	1,5	2,8	14	94,3
Резервний збуджувач	ДАЗ-2012-16	4000	498	0,77	372	5,7	0,90	2,2	49	97,3
Котельне відділення										
Димотяг	АО2-21-91-16	3200	380	0,85	373	6,5	1,0	2,2	1250	95,0
Димотяг рециркуляції газів	ДАЗО2-17-79-6	1250	140	0,91	975	6,8	0,85	2,8	625	93,0
Повітряний компресор	2АЗМ-1000/6000	1000	113	0,87	2970	5,0	1,1	1,9	18,25	95,7
Насос кислотного промивання	2АЗМ-3200/6000	3200	350	0,91	2985	6,3	1,3	2,6	100	97,0

Продовження таблиці Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Водонасосна										
Насос циркуляційний	ДВДА-260/99-16-20	$\frac{5000}{2500}$	$\frac{660}{360}$	$\frac{0,76}{0,70}$	$\frac{371}{290}$	$\frac{4,3}{3,84}$	$\frac{0,73}{0,76}$	$\frac{2,04}{1,89}$	10000	$\frac{95,6}{95,0}$
Насос циркуляційний	ДВДА-260/74-20-24	$\frac{3200}{1600}$	$\frac{355}{178}$	0,92	$\frac{297}{247}$	$\frac{6}{5,5}$	$\frac{0,70}{0,60}$	$\frac{2,1}{1,9}$	8500	94,0
Мазутне господарство										
Насос II підйому	ВАО-500М2	315	37	0,89	2980	6,5	1,1	2,8	9,75	94,0
Насос пінного пожежогасіння	АОЗ-400-4	250	28,7	0,90	1485	7,0	1,0	2,0	54	93,0

Таблиця Б.5 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока ВВЕР-440 МВт

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{\text{пуск}^*}$	$M_{\text{макс}^*}$	J , кг·м ²	ККД, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Машинна зала										
ГЦН	2АЗМ-1600/6000 УХЛ4	1600	171,3	0,9	2975	5,5	1,3	2,1	25,5	96,5
Живильний насос	2АЗМ-2500/6000УХЛ4	2500	262,8	0,92	2975	5,3	0,9	2,3	45	96,9
Резервний збуджувач	АВК-1000-1500У4	1000	107	0,9	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,5
Насос циркуляційної води	2АЗМ-4000/6000УХЛ4	4000	418,9	0,92	2985	6,3	1,3	2,6	117,5	96,9
Насос підживлення І контуру	А4-400Х-4У3	500	58	0,876	1480	5,7	1,2	2,3	11	94,7
Насос аварійного підживлення І контуру високого тиску	А4-400Х-4У3	500	58	0,876	1480	5,7	1,2	2,3	11	94,7
Насос технічної води відповідальних споживачів	А4-400У-6У3	500	59,5	0,857	985	5,4	1	2,1	21	94,4
Компресор низького тиску	ДАЗО4-400Х-4У1	400	44,3	0,87	1484	7	1,3	2,8	12	94,2
Дренажний насос ПНТ	АВ-113-4	250	29,2	0,895	1480	6,5	1,3	2,4	12,25	89,5

Продовження таблиці Б.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Насос кислотного промивання	ДАЗО4-400У-8У1	250	30,5	0,79	740	6	1,2	2,4	23	93
Насос промивання електромагнітних фільтрів	ДАЗО4-400У-10У1	200	26	0,74	589	6	1,3	2,3	23	92
Конденсатний насос	2АЗМ1-500/6000УХЛ1	500	52,4	0,92	2980	6	1,2	2,1	5	95,6
Насос технічної води	ВАО-500-М4	315	34,9	0,87	1480	6	1,2	2,5	12,5	94
Насос для промивання решітки	А4-450У-12У3	315	39	0,779	489	4,5	1,1	1,5	45	92,7

Таблиця Б.6 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ блока з реактором БН-600

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{\text{пуск}^*}$	$M_{\text{макс}^*}$	J , кг·м ²	ККД, %
ГЦН I контуру	ВАК-316-64-6А	3400	360	0,91	2985	6,3	1,3	2,6	117,5	96,7
ГЦН II контуру	ВАК-315-51-6А	1500	160,6	0,9	2973	6,5	1,3	2,1	25,5	96,5
Живильний насос	2АЗМ-3200/6000	3200	350	0,91	2985	6,3	1,3	2,6	100	96,8
Кондесатний насос	АВ-113-4	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	49	92
Циркуляційний насос	ДВДА-215/39-12-16	<u>1000</u> 500	<u>119,3</u> 66,9	<u>0,87</u> 0,79	<u>550</u> 372	<u>4,5</u> 4,6	<u>0,77</u> 0,97	<u>2,0</u> 2,2	1750	<u>92,9</u> 91,2
Резервний збуджувач	АТК-18-С10-6	1100	155	0,875	990	6,3	1,2	2,6	97	91
Пусковий маслонасос турбіни	А-114-6М	200	24,4	0,875	985	6,6	1,5	2,7	78	90
Вентилятор охолодження фільтрів пасток	А-114-4М	320	37	0,895	1480	6,5	1,6	2,8	50	92,8
Вентилятор охолодження теплопостачання	А-114-4М	320	37	0,895	1480	6,5	1,6	2,8	60	92,8
Натискувач системи газового розігріву	А-113-2М	320	37	0,90	2970	6,5	1,4	2,6	2,6	92,1
Насос кислотного промивання	АЗ0-3200/6000	3200	350	0,91	2985	5,3	0,9	2,1	29	97
Насос промивання деаератора	А-114-6М	200	24,4	0,875	985	6,6	1,5	2,6	78	90
Аварійний живильний насос	2АЗМ-400/6000	400	44,2	0,91	2980	7,0	1,3	2,4	4,5	95,2

Таблиця Б.7 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока з реактором ВВЕР-1000

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_p	$M_{\text{пуск}^*}$	$M_{\text{макс}^*}$	J , кг·м ²	ККД, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ГЦН	ВАЗ-215/109-6-АМ05	8000	875	0,91	2960	7,43	1,43	2,85	4500	96,7
Допоміжний пускорезервний живильний насос	2АЗМ-800/6000	8000	89,5	0,905	2975	5,2	1,1	1,9	11,25	95,2
Конденсатний насос I ступеня	АВК-1000-1500	1000	113,8	0,85	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,1
Конденсатний насос II ступеня	АВК-1000-1500	1000	113,8	0,85	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,1
Циркуляційний насос	АВК-1000-1500	1000	113,8	0,85	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,1
Мережний насос	ДВДА-260/99-20-24	<u>4000</u> 2500	<u>500</u> 368,7	<u>0,82</u> 0,71	<u>280</u> 245	<u>3,8</u> 3,4	<u>0,63</u> 0,61	<u>2,08</u> 1,89	10500	<u>94</u> 92
Дренажний насос	А-12-52-4	630	71,7	0,905	1485	5,7	1,1	2,2	120	93,5
Дренажний насос	АОВ-74/315-4	315	35,6	0,90	1480	7,0	1,3	2,4	4	94,6
Насос технічної води невідповідальних споживачів	АОВ-2-14-14-4	500	54,8	0,92	1480	6,5	1,0	2,3	25	95,5
Насос бака запасу знесоленої води	АВ-113-4	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	49	92
Насос промивної води електромагнітних фільтрів	А-114-6М	200	24,4	0,875	985	6,6	1,5	2,6	78	90

Продовження таблиці Б.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Насос технічної води невідповідальних споживачів	АВ-113-4	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	40	92
Насос нормального підживлення та борного регулювання	АВ-113-4	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	49	92
Насос дренажних баків	2АЗМ-800/6000	800	89,5	0,90	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	96,5
Насос гідростатичного підйому роторів турбіни та генератора	А-12-35-6	250	29,25	0,89	985	5,9	1,3	2,5	250	92
Аварійний насос підживлення високого тиску	2АЗМ-800/6000	800	89,5	0,90	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	95,2
Насос низького тиску аварійного розохолодження реактора	2АЗМ-800/6000	800	89,5	0,905	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	95,2
Спринклерний насос	2АЗМ1-500/6000	500	55,3	0,85	2980	6,0	1,2	2,1	5	91
Протипожежний насос	А-113-4М	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	49	92
Насос перекачування води на розбрикувальні установки	ДВДА-260/99-20-24	<u>4000</u> 2500	<u>500</u> 368,7	<u>0,82</u> 0,71	<u>297</u> 245	<u>3,8</u> 3,4	<u>0,63</u> 0,61	<u>2,08</u> 1,89	10500	<u>94</u> 92
Насос підживлення циркуляційної системи	АВК-1000-1500	1000	113,8	0,89	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,1

Таблиця Б.8 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблоку з реактором РБМК-1000

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{\text{пуск}^*}$	$M_{\text{макс}^*}$	J , кг·м ²	ККД, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ГЦН	ВДА-173/99-6-2А	5500	602	0,91	990	7,26	1,27	2,88	3750	96,5
Живильний насос	2АЗМ-9000/6000	5000	551	0,91	2985	6,5	1,3	2,7	135	96
Конденсатний насос І ступеня	АВ-15-36-8	1000	113,8	0,89	740	4,4	0,72	2,1	275	95,1
Конденсатний насос ІІ ступеня	2АЗМ-1600/6000	1600	177	0,9	2975	5,5	1,3	2,1	25,5	96,5
Циркуляційний насос	АВ-17-49-16К	1600	177	0,9	2975	5,2	0,9	2,5	2380	96,5
Резервний збуджував	ДАЗ-18-18-6	2000	247,3	0,86	990	6,3	1,2	2,4	218	90,6
Насос проміжного контуру тепломережі	А-114-4М	320	37,1	0,895	1480	6,5	1,6	2,8	60	92,8
Маслонасос турбін	А-114-6М	200	24,5	0,875	985	6,6	1,5	2,6	78	90
Мережний насос	А-12-52-4	630	71,7	0,905	1485	5,7	1,1	2,2	120	93,5
Підйомний насос газоохолоджувачів генератора	А-12-42-8	250	28,7	0,89	740	5,1	1,1	2,1	160	92
Компресор азотно-кисневої станції	А-114-4М	320	37,1	0,895	1480	6,5	1,6	2,8	60	92,8
Насос технічної води охолодження апарата	АВ-17-39-15	1250	140,3	0,89	370	5,2	0,8	2,4	2150	96,4
Насос контуру охолодження каналів СУЗ	А-113-4М	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	40	92

Продовження таблиці Б.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Насос аварійного підживлення деаератора	A-113-4M	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	40	92
Насос спринклерно-охолоджувальної системи	A-113-4M	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	40	92
Насос охолодження аварійної половини реактора	2A3M-800/6000	800	89,5	0,9	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	95,7
Насос охолодження неаварійної половини реактора	2A3M-800/6000	800	89,5	0,9	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	95,7
Насос гідровипробувань	A-113-4M	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	40	92
Аварійно-живильний насос	2A3M-800/6000	800	89,5	0,9	2970	5,2	1,1	1,9	11,25	95,7
Насос розохолодження реактора	2A3M-500/6000	500	54,8	0,91	2970	6	1,2	2,1	5	95,5
Протипожежний насос	A-113-4M	250	28,7	0,89	1480	5,8	1,3	2,5	40	92

Таблиця Б.9 – Електродвигуни власних потреб на напругу 6 кВ енергоблока з реактором РБМК-1500

Агрегат	Тип електродвигуна	P_n , кВт	I_n , А	$\cos \varphi_n$	n_n , об/хв	K_n	$M_{\text{пуск}^*}$	$M_{\text{макс}^*}$	J , кг·м ²	ККД, %
ГЦН	ВДА-173/99-6-2А	5500	602	0,915	990	7,26	1,27	2,88	3750	96,5
Живильний насос	2АЗМ-5000/6000	5000	551	0,91	2985	6,5	1,3	2,7	135	96,0
Конденсатний насос I ступеня	АВК-1000-1500	1000	113,8	0,89	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,1
Конденсатний насос II ступеня	2АЗМ-1600/6000	1600	177	0,90	2975	5,5	1,3	2,1	25,5	96,5
Циркуляційний насос	ВАН-17-69-16	2500	226	0,905	375	4,5	0,7	1,9	3250	96,4
Резервний збуджувач	ДАЗ-20-12-16	4000	498	0,87/0,82	375	5,7	0,9	2,2	49	92/90
Насос проміжного контуру тепломережі	А-12-52-4	630	73,4	0,87	1480	5,7	1,1	2,2	120	93,5
Мережний насос	А-12-52-4	630	73,4	0,87	1480	5,7	1,1	2,2	120	93,5
Насос проміжного контуру теплогенератора	АО-74/315	315	35,6	0,90	1480	7,0	1,3	2,4	4	94,6
Насос кислотного промивання	2АЗМ-1600/6000	1600	177	0,90	2975	5,5	1,3	2,1	25,5	96,5
Підйомний насос газоохолоджувачів генератора	А-12-42-8	250	28,7	0,89	740	5,1	1,1	2,1	160	92,0
Насос маслоохолоджувачів турбіни	А-12-52-4	630	73,4	0,87	1480	5,7	1,1	2,2	120	93,5
Дренажний насос	АОВ-74/315	315	35,6	0,90	1480	7,0	1,3	2,4	4	94,6
Дренажний насос	АВК-1000-1500	1000	113,8	0,89	1485	6,5	1,1	2,0	44	95,1

*Електронне навчальне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Тептя Віра Володимирівна
Комар Вячеслав Олександрович
Лесько Владислав Олександрович
Бурикін Олександр Борисович**

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЧАСТИНА 1

Навчальний посібник

Рукопис оформила В. Тептя

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет виготовлено О. Ткачуком

Підписано до видання 15.09.2022.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2022-074.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: irvc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.