

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

К.М. Маренич, С.В. Василюк

**ЗВОРОТНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТОКИ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЯК ФАКТОР
НЕБЕЗПЕКИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ШАХТИ**

МОНОГРАФІЯ

Донецьк
ДВНЗ «ДонНТУ»
2012

УДК 621.316.1:622.012.2

М 25

Монографія друкується за рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 7 від 07.09.2012)

Автори:

МАРЕНИЧ Костянтин Миколайович, професор кафедри «Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова» ДонНТУ, кандидат технічних наук, доцент;

ВАСИЛЕЦЬ Святослав Володимирович, доцент кафедри «Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова» ДонНТУ, кандидат технічних наук, доцент.

Рецензенти:

В.С. Дзюбан, заступник директора Дирекції поставок електротехнічної продукції ПрАТ «Донецьксталь» – Металургійний завод» (м. Донецьк), доктор технічних наук, професор;

Ф.П. Шкрабець, завідувач кафедри «Відновлювані джерела енергії» ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ), доктор технічних наук, професор;

С.Ф. Жуков, генеральний директор науково-виробничого центру технологій управління «Квантум» (м. Маріуполь), доктор технічних наук, професор.

Маренич К.М.

М 25 Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василець. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 206 с.

ISBN 978-966-377-141-0

Обґрунтована математична модель багатомашинного електротехнічного комплексу для аналітичних досліджень перехідних процесів з урахуванням особливостей функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти. Визначено особливості впливу зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів на параметри електробезпеки шахтного дільничного електротехнічного комплексу в контексті утворення складової кількості електрики в колі витоку струму на землю в процесі та після захисного відключення шахтної дільничної електромережі.

Монографія призначена для науковців, конструкторів і виробничників, що працюють в галузі створення, модернізації і експлуатації рудникового електроустаткування, а також може використовуватися як навчальний посібник: для аспірантів при дослідженні процесів в промислових електротехнічних комплексах; для студентів ВНЗ при вивченні відповідних розділів дисципліни «Електрообладнання та електропостачання гірничих підприємств».

УДК 621.316.1:622.012.2

ISBN 978-966-377-141-0

© Маренич К.М., Василець С.В., 2012

© ДВНЗ «ДонНТУ», 2012

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	4
Вступ.....	5
1 Специфіка улаштування і експлуатації шахтних дільничних електричних мереж.....	7
1.1 Структура типової схеми електропостачання дільниці шахти	7
1.2 Властивості засобів захисного знеструмлення дільничної мережі при виникненні кола витоку струму на землю.....	17
1.3 Асинхронні двигуни споживачів як джерело зворотних енергетичних потоків.....	28
2 Електротехнічний комплекс з джерелами двобічного утворення енергетичних потоків як об'єкт дослідження.....	36
2.1 Математична модель дільничного електротехнічного комплексу.....	36
2.2. Математична модель кола однофазного витоку струму на землю.....	53
3 Вплив зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів на параметри електробезпеки шахтних дільничних мереж.....	62
3.1 Моделювання та аналіз процесів у дільничному ЕТК при однофазному витоку струму на землю.....	62
3.2 Аналіз залежності стану безпеки експлуатації від параметрів та умов функціонування електротехнічного комплексу дільниці...	85
3.3 Аналіз адекватності теоретичних обґрунтувань результатам експерименту.....	104
4 Прийнятні заходи із відокремлення впливової функції зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів.....	135
4.1 Визначення раціонального способу припинення дії зворотної ЕРС двигунів.....	135
4.2 Методика оцінки рівня безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти та перспективи його підвищення.....	151
4.3. Алгоритм розрахунку та вибору параметрів силових приєднань шахтного ЕТК за показниками перехідного режиму після вимкнення напруги живлення.....	157
Висновки.....	162
Додаток А. Відомості з моделювання.....	163
Додаток Б. Матеріали експериментальних досліджень.....	193
Перелік літератури.....	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АВ	–	автоматичний вимикач;
АД	–	асинхронний двигун;
АЗ	–	апарат захисного знеструмлення кола витокy струму на землю;
АЦП	–	аналого–цифровий перетворювач;
ГК	–	гнучкий кабель;
ТП	–	трансформаторна підстанція;
ДШ	–	дільниця шахти;
ЕРС	–	електрорушійна сила;
ЕТК	–	електротехнічний комплекс;
КА	–	комутаційний апарат;
КМ	–	контактор магнітний;
МК	–	магістральний кабель;
П	–	пускач;
ПДЗП	–	пересувна дільнична знижувальна підстанція;
РП	–	розподільчий пункт;
ТР	–	трансформатор.

ВСТУП

Сучасні тенденції до підвищення вуглевидобутку вимагають збільшення потужності машин та механізмів технологічних дільниць шахт за рахунок підняття рівня живлячої напруги до 1140 В та 3300 В, використання електродвигунів підвищеної потужності, збільшення довжини та перетину жил кабельних ліній. Підвищення енергооснащеності вуглевидобувного обладнання впливає на характер протікання перехідних процесів, що пов'язані з централізованим відключенням напруги, у багатомашинних електротехнічних комплексах (ЕТК), обумовлюючи збільшення тривалості цих процесів та підвищення значень їх параметрів до величин, що не узгоджуються з діючими нормативами на застосування шахтних дільничних ЕТК. Зокрема, це стосується випадку захисного відключення електромережі технологічної дільниці шахти в разі наявності небезпечного струму витоку на землю. Збільшення рівнів та часових інтервалів існування ЕРС вибігу двигунів (через збільшення потужності останніх) та ємності ізоляції кабельної мережі відносно землі підвищують вплив перехідних складових струму витоку на землю (після захисного відключення мережі) на стан кола витоку.

Виконані у попередній період дослідження і запропоновані математичні залежності дають приблизну оцінку перехідним процесам в шахтному електротехнічному комплексі стосовно стану - в момент та після відключення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, недостатньо враховують конфігурацію системи, режими функціонування елементів та їх параметри. Тому задача удосконалення математичної моделі багатомашинного шахтного дільничного електротехнічного комплексу для аналітичних досліджень перехідних процесів в системі з урахуванням особливостей улаштування та функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти в умовах застосування напруги підвищеного

номінального рівня, силових гнучких кабелів з підвищеними показниками ємності та провідності ізоляції має наукову і практичну актуальність.

Ознакою практичної актуальності рішення цієї задачі є необхідність створення точної багатофункціональної моделі, що має враховувати різні конфігурації і стани електротехнічного комплексу із специфікою застосування засобів захисту і контролю; визначення реальних властивостей зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів утворювати небезпеку електроураження в процесі та після захисного відключення дільничної електромережі внаслідок виникнення в ній кола витоку струму на землю; обґрунтування прийнятних засобів обмеження (припинення) впливової функції зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів.

1 СПЕЦИФІКА УЛАШТУВАННЯ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ШАХТНИХ ДІЛЬНИЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Структура типової схеми електропостачання дільниці шахти

Сучасний стан розвитку гірничої промисловості передбачає застосування електрифікованого обладнання для виконання переважної більшості технологічних операцій. Типовим для схеми ЕТК технологічної дільниці є (рис. 1.1): наявність знижувальної трансформаторної підстанції (ТП); комплектація розподільчого пункту (РП) технологічної дільниці автоматичним вимикачем (АВ) на вході та сукупністю магнітних пускачів (П), кількість яких відповідає числу електроспоживачів дільниці; наявність розгалуженої системи гнучких екранованих кабелів (ГК), оскільки переважна більшість одиниць технологічного устаткування шахтної дільниці пересувається в процесі експлуатації [1–3].

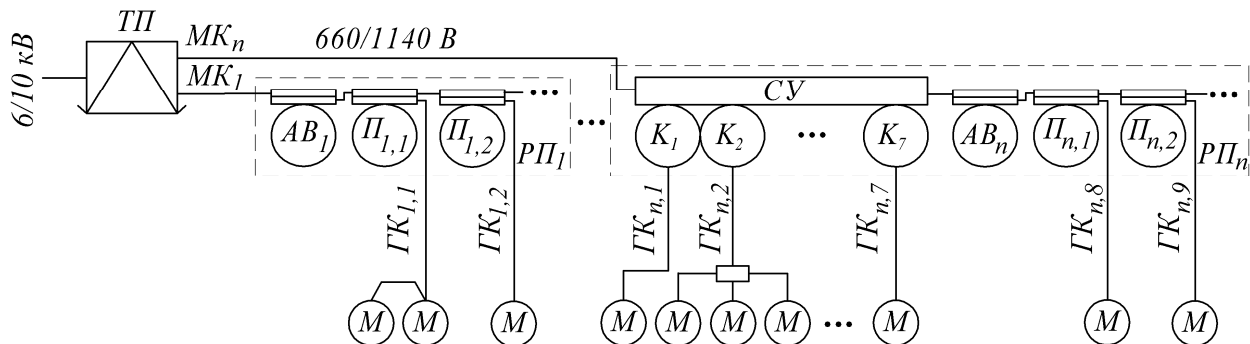


Рис. 1.1. Структура електротехнічного комплексу дільниці шахти

Як правило, до складу ЕТК шахтної дільниці може входити один, або більше РП, кожен з яких підключається до ТП броньованим або напівгнучким магістральним кабелем (МК). В практиці експлуатації видобувних дільниць вугільних шахт поширеним є використання станцій управління СУ (серії СУВ, КУУВ та ін.), які об'єднують в одному пристрої

автоматичний вимикач та сукупність комутаційних апаратів К і являють собою комплектний пристрій дистанційної комутації асинхронних двигунів (М) споживачів дільниці.

Сучасні тенденції до підвищення потужності електроприводів гірничих машин вимагають застосування трансформаторних підстанцій більш високої потужності, магістральних і гнучких кабелів збільшених перерізів. Використання асинхронних електроприводів вибійних конвеєрів значної потужності дозволяє збільшити довжину лінії очисного вибою і, водночас, передбачає підвищення довжини застосованих гнучких кабелів та обумовлює тенденцію до переведення ЕТК технологічних дільниць на напругу більш високого рівня (з метою зменшення втрат напруги на опорах кабельної мережі).

На вітчизняних гірничих підприємствах та у шахтах інших країн СНД для електроживлення споживачів технологічних дільниць застосовується трифазна лінійна номінальна напруга 660 В, а при підвищеній потужності споживачів – 1140 В та 3000 (3300) В. Трансформатори для живлення споживачів підземних гірничих робіт функціонують в режимі з ізольованою нейтраллю. Обов'язковим є застосування апаратів захисного знеструмлення кола витoku струму на землю [4]. Це дозволяє виконувати захист людини від ураження електричним струмом у випадку торкання елемента електроустаткування, який є під напругою.

Типовий перелік обладнання ЕТК видобувної дільниці є наступним: видобувний комбайн; вибійний та штрековий скребкові конвеєри; одна або дві маслостанції; станція зрошення; маневрова лебідка. Електроприводи вказаних машин оснащені асинхронними двигунами з короткозамкненими роторами потужністю від одиниць (лебідка) до декількох сотень (комбайн, конвеєри) кВт. Так, сукупна потужність електроприводів очисних комбайнів досягає 500–710 кВт (комбайни КДК–500, КДК–700); стосовно скребкових конвеєрів – типовими є приводні блоки одиничною потужністю 160 кВт, 200 кВт, 250 кВт (конвеєри СПЦ–230, СПЦ–271, СПЦ–326, СПЦ–330).

Промисловістю освоєний випуск високопотужних асинхронних двигунів для машин та установок технологічних комплексів шахт (двигуни серії ЭДКОФВ315LB4, ЭКВ6–355, ЭДКВФ315LC4) та пускачів на номінальні струми до 630 А включно [5–7]. Незважаючи на те, що в складі останніх застосовані контактори різноманітних конструкцій і способів дугогасіння (повітряне або вакуумне), загальною особливістю схем пускачів є те, що умовою відключення їх контакторів є знеструмлення кола дистанційного керування (натискання кнопки «СТОП» або відповідна команда пристрою автоматики), а також – знеструмлення системи управління пускачем чи котушки контактора (рис. 1.2).

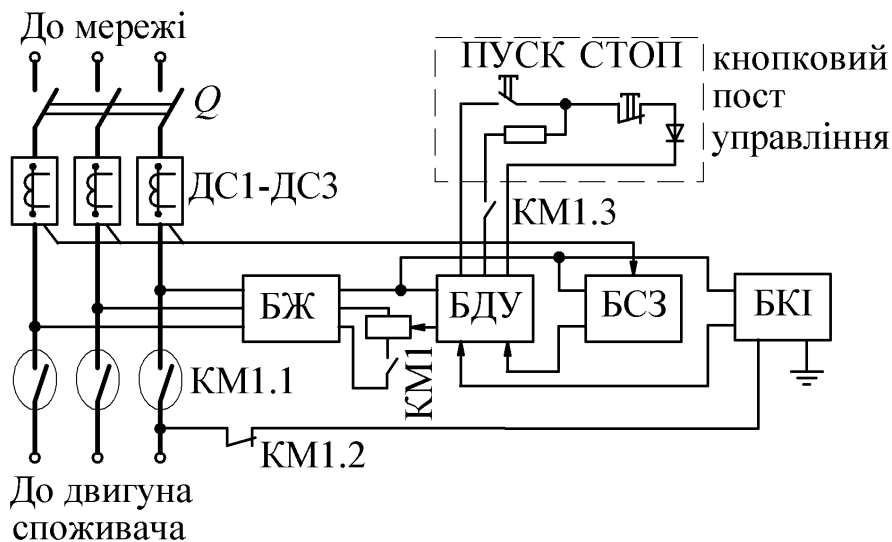


Рис. 1.2. Узагальнена структурна схема шахтного пускача: ДС – датчики струму; БЖ – блок живлення; БДУ – блок дистанційного управління; БСЗ – блок струмового захисту; БКІ – блок контролю ізоляції; КМ1 – котушка контактора; КМ1.1 – силові контакти контактора; КМ1.2, КМ1.3 – допоміжні контакти контактора; Q – силовий роз'єднувач

Електродвигуни вибійних машин під'єднують до пускачів гнучкими кабелями (використовуються типи КГЭШ, КРШЭ, ГВШОП та ін.) довжиною до 200–300 м з перетином жил до 120 мм², при цьому загальна ємність ізоляції кабельної мережі відносно землі досягає 1 мкФ на фазу і має тенденцію збільшення в разі підвищення довжини або перерізів кабелів.

Живлення напругою технологічного обладнання дільниці шахти забезпечується комплектними трансформаторними підстанціями повною потужністю від 100 кВА до 630 кВА (серія ТСВП) та до 1600 кВА (серія КТПВ) (рис. 1.3). Автоматичний вимикач, що входить до складу розподільчого пристрою низької напруги підстанції, та груповий автоматичний вимикач (рис. 1.4) розподільного пункту дільниці шахти дозволяють, крім комутації відгалуження вручну, виконувати автоматичне захисне відключення відгалуження в разі виникнення коротких замикань в останньому, зникнення напруги в мережі, або за командою зовнішнього пристрою захисту (автоматичний газовий захист; захист від витоків струму на землю). Запобігання подачі напруги на низьковольтне приєднання із пошкодженою ізоляцією забезпечується блокувальними реле витоків, які входять до складу схем силових комутаційних апаратів.

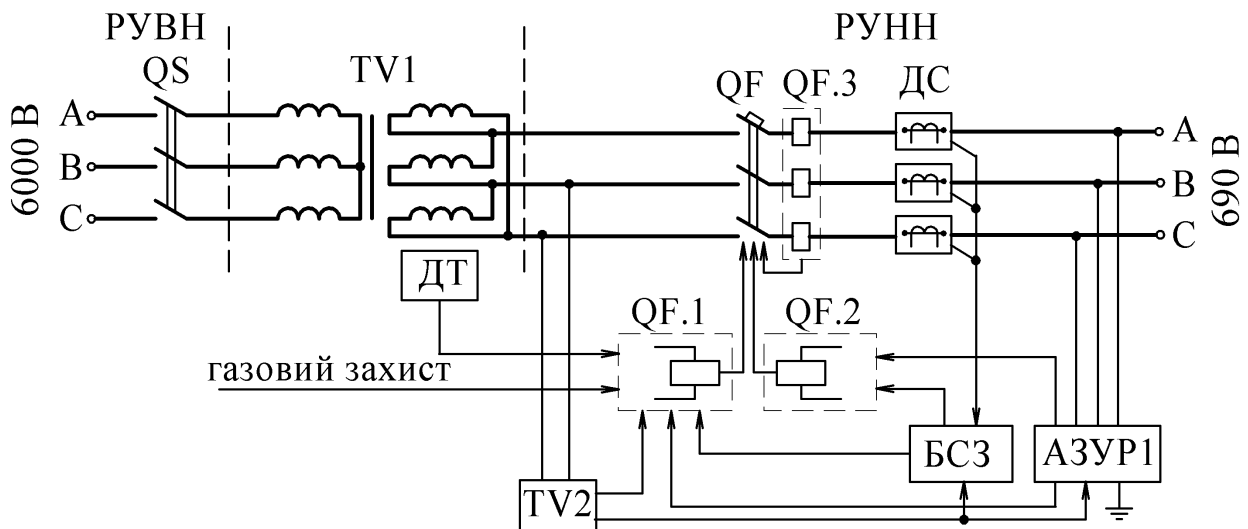


Рис. 1.3. Функціональна схема підстанції серії КТПВ: РУВН, РУНН – розподільчі пристрої високої та низької напруги відповідно; QS – роз’єднувач; TV1 – силовий трансформатор; TV2 – трансформатор власних потреб; QF – автоматичний вимикач; QF.1, QF.2, QF.3 – розчеплювачі мінімальної напруги, незалежний та електромагнітний відповідно; ДС – датчики струму; БСЗ – блок струмового захисту; АЗУР1 – апарат захисту від витоків струму на землю

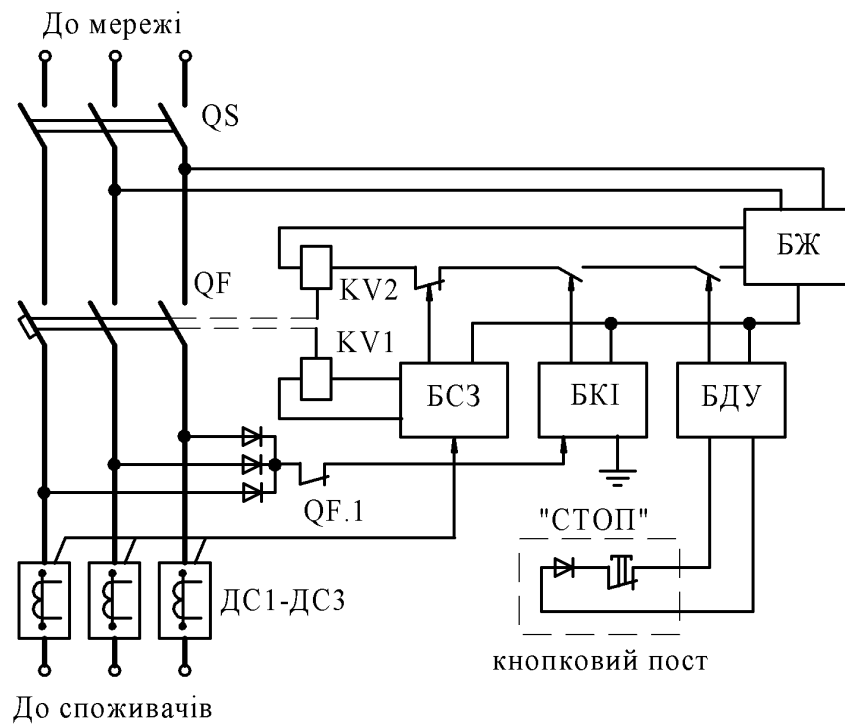


Рис. 1.4. Узагальнена структурна схема шахтного вибухобезпечного автоматичного вимикача: ДС – датчики струму; БЖ – блок живлення; БДУ – блок дистанційного управління; БСЗ – блок струмового захисту; БКІ – блок контролю ізоляції; QS – силовий роз'єднувач; QF – автоматичний вимикач; QF.1 – допоміжний контакт QF; KV1 – незалежний розчеплювач; KV2 – нульовий розчеплювач

Основні стани, в яких може знаходитися електрична мережа технологічної дільниці шахти під час експлуатації, можна поділити на наступні [8]:

- 1) нормальний стан, що характеризується номінальним, або близьким до нього режимом роботи всіх двигунів мережі;
- 2) аномальний стан без захисного відключення мережі:
 - а) короткочасті струмові перевантаження мережі, що пов'язані як з пуском окремих двигунів дільниці, так і з накиданням навантаження на вже працюючі АД;
 - б) нетривалі коливання живлячої напруги, що пов'язані з пуском потужних споживачів;
 - в) стан, при якому один або кілька двигунів переходять в режим рекуперативного гальмування. Це може мати місце при:

- роботі видобувного комбайна на похилих чи крутих пластах;
- бремсбергових конвеєрів, що спускають гірську масу на магістральний конвеєр;
- вантажопідйомних гірничих машин під час спускання вантажів;
- в системі “перетворювач частоти – двигун” під час зупинення або переходу АД з характеристики на характеристику;

3) аномальний стан при наявності захисного відключення:

- а) тривалі струмові перевантаження, що пов’язані зі стопорінням робочих органів гірничих машин, пусками двигунів, що не відбулися, і т.і.;
- б) замикання в кабельних мережах, що, зокрема, пов’язані з механічними пошкодженнями ізоляції;
- в) витоки струму на землю, які призводять до спрацьовування відповідної захисної апаратури;
- г) неповнофазні режими роботи двигунів, настають при пошкодженні будь-якої фази живлячої мережі, характеризуються підвищенням струму в непошкоджених фазах.

На прикладі спрощеної розрахункової схеми електричної мережі технологічної дільниці шахти (рис. 1.5) розглянемо особливості функціонування ЕТК ДШ в нормальному та аномальних режимах, що не супроводжуються захисним відключенням. Основні складові елементи схеми наступні: пересувна дільнична знижувальна підстанція (ПДЗП); автоматичний вимикач (АВ); магнітні пускачі (МП) з контакторами (КМ); магістральний кабель, за допомогою якого МП підключені до АВ; гнучкі кабелі (ГК), якими споживачі під’єднані до МП; асинхронні двигуни електроспоживачів дільниці (М). На схемі вказані активний та ємкісний опір ізоляції ГК відносно землі ($R_{i3 j}, C_{i3 j}$).

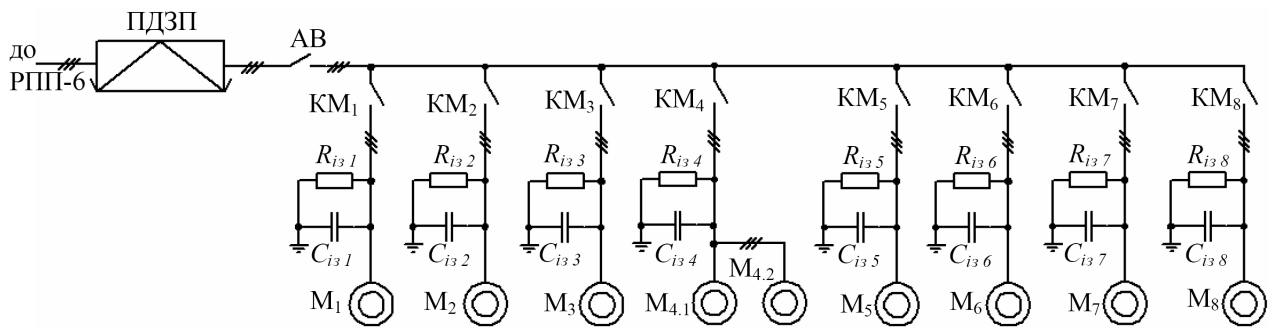


Рис. 1.5. Спрощена розрахункова схема електричної мережі технологічної дільниці шахти

Параметри споживачів технологічної дільниці, що розглядається, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Основні параметри електроспоживачів технологічної дільниці шахти

№	Споживач ($U_n = 660 \text{ В}$)	Тип асинхронного двигуна	Номинальні параметри асинхронних двигунів							Параметри ГК				
			потужність	ККД	коефіцієнт потужності	ковзання	струм	пусковий струм	момент інерції ротора	перетин жили	довжина	ємність ізоляції відносно землі	активний опір при 65°C	індуктивність
			P_n , кВт	h_n	$\cos j_n$	s_n , %	I_n , А	I_n , А	J , кг·м ²	$S_{жс}$, мм ²	l , м	C_{i3} , мкФ/км/фаза	R_k , Ом/км/фаза	L_k , мГн/км/фаза
1	Комбайн КА80	2ЭКВ3,5-180	180	0,88	0,865	5,9	208,1	1100	0,691	70	300	0,87	0,281	0,252
2	Скребокний конвеєр (верхній привод)	2ЭДКОФ 250LB4	110	0,932	0,85	1,8	122	915	1,14	25	300	0,424	0,767	0,28
3	Скребокний конвеєр (нижній привод)	2ЭДКОФ 250LB4	110	0,932	0,85	1,8	122	915	1,14	25	50	0,424	0,767	0,28
4	Стрічковий конвеєр штрека	2ЭДКОФ 250LB4	2*110	0,932	0,85	1,8	2*122	2*915	1,14	70	50	0,87	0,281	0,252
5	Маслостанція СНТ-32	АИУМ25 5М4	55	0,925	0,87	6	62,5	193	0,29	16	50	0,363	1,22	0,287
6	Станція зрошення	ВРП180 М4	30	0,895	0,87	2,6	35,1	211	0,25	10	50	0,345	1,96	0,293
7	ВСП (верхній привод)	ЭКВ2,5-30	30	0,82	0,85	3	49,5	260	0,12	10	300	0,345	1,96	0,293
8	ВСП (нижній привод)	ЭКВ2,5-30	30	82	0,85	3	49,5	260	0,12	10	50	0,345	1,96	0,293

Характер моменту навантаження приводних двигунів електроспоживачів технологічної дільниці шахти визначається особливостями конструкції та роботи відповідних машин (механізмів) [9]. Для споживачів, що розглядаються, механічний момент характеризується таким чином: M_{mex1} - момент навантаження виконавчого органу видобувного комбайна є випадковою величиною, що змінюється у визначених в [10] межах; $M_{mex2}, M_{mex3}, M_{mex4}, M_{mex7}, M_{mex8} = const$ - для спрощення приймається, що моменти навантаження на приводи конвеєрів та винесеної системи подачі (ВСП) комбайна не залежать від швидкості обертання роторів відповідних двигунів; M_{mex5}, M_{mex6} - для приводів гідравлічних машин, якими є маслостанція та станція зрошення, залежність моменту від швидкості обертання робочого органу носить вентиляторний характер [11]:

$$M_{mex} = M_o + (M_n - M_o)(w/w_n)^2, \quad (1.1)$$

де M_o - момент, що обумовлений силами тертя в механічній частині машини; M_n, w_n - номінальні статичний момент та частота обертання ротора двигуна; w - поточна частота обертання ротора двигуна.

В нормальному стані механічний момент, що навантажує виконавчий орган видобувного комбайна, не є статичним, а змінюється випадково у визначених межах, в кривій струму та частоти обертання відповідного двигуна спостерігаються коливання (рис. 1.6). Вплив указаних явищ на роботу інших двигунів мережі незначний, їм можна знехтувати, тобто в нормальному режимі особливості роботи деяких споживачів мережі не впливають на стан сукупності інших електроспоживачів.

Короткочасні струмові перевантаження мережі, що відносяться до аномальних станів без захисного відключення, мають місце, наприклад, при ввімкненні КМ₄, що живить два паралельно з'єднані двигуни М_{4.1} та М_{4.2} привода стрічкового конвеєра штрека. Пуск цих двигунів відбувається з навантаженням. На діаграмі (рис. 1.7, а) можна спостерігати зниження

напруги (при прийнятих параметрах мережі приблизно на 10%) як на виході трансформаторної підстанції ($U_{ПДЗП}$), так і на затискачах кожного двигуна мережі, під час пуску привода стрічкового конвеєра. Діаграма зміни струмів в мережі (рис. 1.7, б) свідчить про наявність кидка пускового струму у спільному ланцюзі двигунів $M_{4.1}$ та $M_{4.2}$, а також через автоматичний вимикач. При цьому рівень струму інших споживачів дільниці є незмінним. Таким чином, при пуску окремих потужних споживачів має місце зниження напруги, що живить усю дільницю. В режимі, що розглядається, має місце вплив елемента на сукупність електроспоживачів технологічної дільниці шахти.

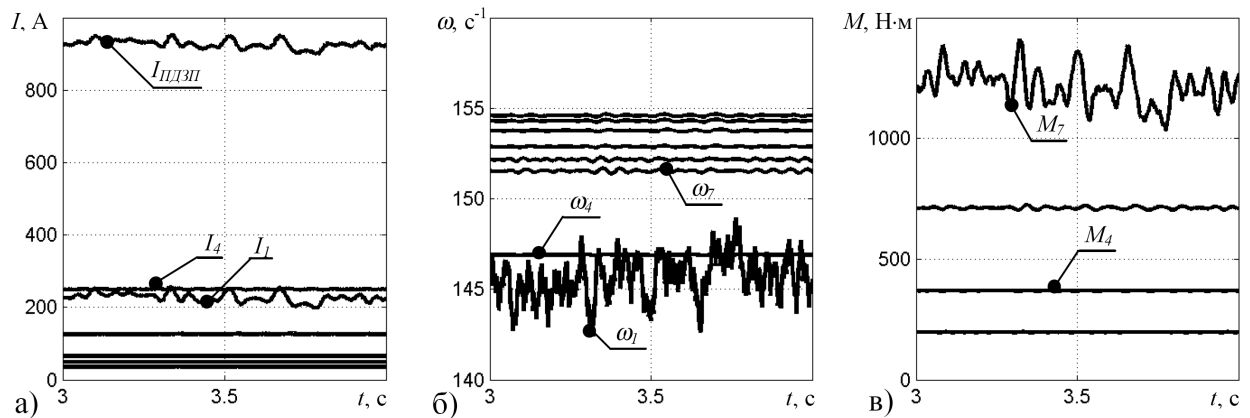


Рис. 1.6. Діаграми, що характеризують нормальний режим роботи електроспоживачів технологічної дільниці шахти:
а) струм; б) частота обертання; в) момент

У випадку, коли мають місце коливання живлячої систему напруги, змінюються умови роботи всіх двигунів дільниці. Це ілюструють наведені на рис. 1.8 діаграми. Зменшення напруги відбувалося до рівня $0,8U_{ном}$ протягом двох секунд (рис. 1.8, а). При цьому має місце підвищення струму (рис. 1.8, б) та зниження швидкості обертання роторів двигунів сукупності (рис. 1.8, в). Оскільки електромагнітний момент АД змінюється пропорційно квадрату живлячої напруги, то при зменшенні напруги нижче критичного рівня може мати місце “перекидання” одного або кількох двигунів мережі. При цьому значно підвищується струм через автоматичний вимикач, що знижує ресурс останнього. Таким чином, коливання живлячої напруги можна розглядати як

збурюючий вплив на мережу, що негативно впливає на роботу всіх елементів сукупності та може вивести систему зі стану рівноваги.

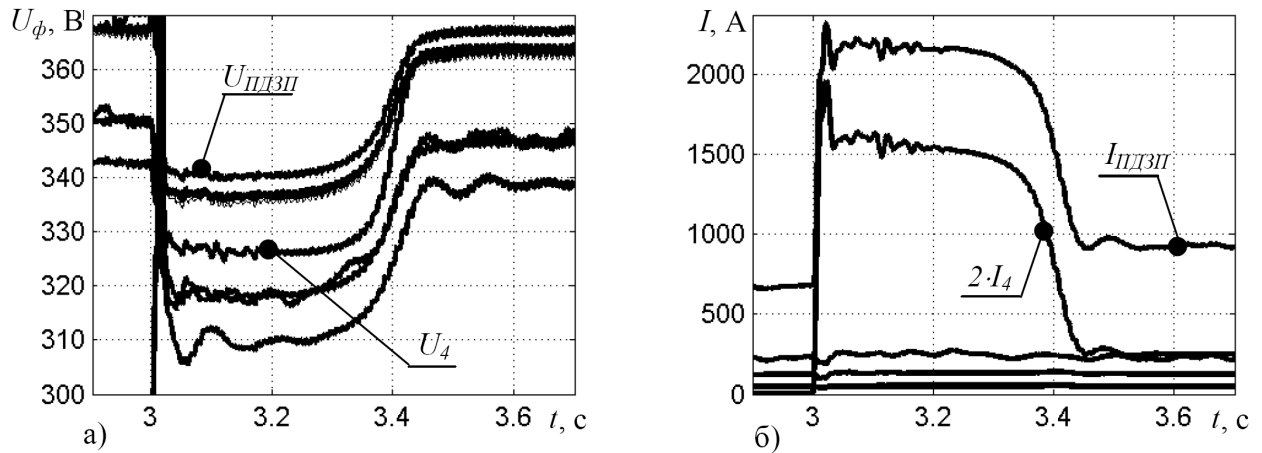


Рис. 1.7. Діаграми зниження напруги (а) та збільшення струму при пуску двигунів $M_{4,1}$ та $M_{4,2}$ привода стрічкового конвеєра (б)

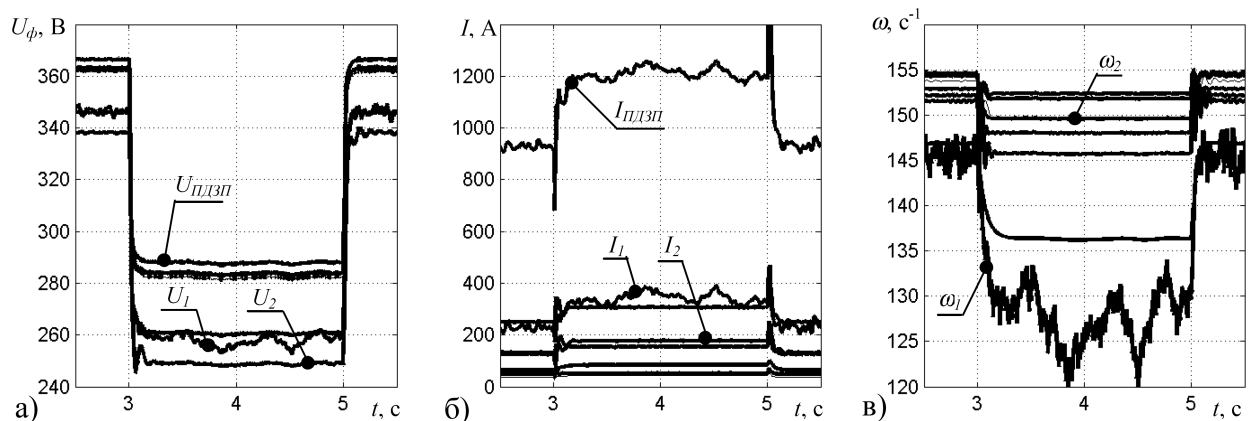


Рис. 1.8. Діаграми, які ілюструють стан споживачів дільничної електромережі під час зниження живлячої напруги: а) фазна напруга; б) струм; в) частота обертання роторів двигунів

Отже, електротехнічні комплекси технологічних дільниць вугільних шахт характеризуються наявністю чисельних споживачів з електроприводами малої, середньої та великої потужності. Їхнє електроживлення забезпечується від дільничних знижувальних комплектних трансформаторних підстанцій через розподільні пристрої за радіальними схемами. Наявність пересувного устаткування технологічних дільниць шахти обумовлює застосування розгалуженої мережі екранованих кабелів, імовірність пошкодження ізоляції яких в умовах шахти є високою. Схемами

електроустаткування технологічних ділень шахти передбачається виконання комплексу функцій захисного відключення (максимальний та нульовий захист, захист від витоків струму на землю) та блокування ввімкнення споживачів з пошкодженою ізоляцією. Це сприяє підвищенню безпеки експлуатації електроустаткування.

Розвиток технічних рішень щодо електротехнічних комплексів технологічних ділень вугільних шахт відбувається в напрямку підвищення енергооснащеності, що супроводжується збільшенням рівня живлячої напруги, зростанням одиничної потужності електродвигунів вуглевидобувного обладнання та трансформаторних підстанцій, використанням більш розгалужених кабельних мереж із збільшенням перетинів кабелів. Сукупність перелічених факторів спричиняє висунення додаткових вимог до комутаційних апаратів, пристроїв керування та захисту від аварійних режимів.

1.2 Властивості засобів захисного знеструмлення ділень мережі при виникненні кола витоків струму на землю

Витоки струму на землю в електротехнічних комплексах технологічних ділень обумовлені наявністю активних та ємнісних опорів ізоляції кабельної мережі відносно землі. Ємнісні опори ізоляції визначаються довжиною та перетином жил кабелів у складі ЕТК, активні – залежать від фізичного стану ізоляції і можуть коливатися у значному діапазоні, що створює умови для зміни рівнів струму витоків на землю. При перевищенні цим струмом величини 0,025 А існує значна імовірність небезпечного іскроутворення, яке може стати причиною пожеж і вибухів метано–повітряної суміші та вігильного пилу [12–15].

До витоків струму на землю також призводить торкання людиною струмопровідних елементів ділень мережі, що знаходяться під напругою. Трансформатор живлення ділень ЕТК має ізольовану нейтраль, тому

струм виток через тіло людини може протікати при торканні двох фаз мережі (людина потрапляє під лінійну напругу) або при торканні однієї фази (рис. 1.9). В останньому випадку струм виток $I_{л}$ визначається опором тіла людини $R_{г}$, активним R_{i3} та ємнісним X_{i3} опорами ізоляції суміжних з аварійною фаз мережі відносно землі [16].

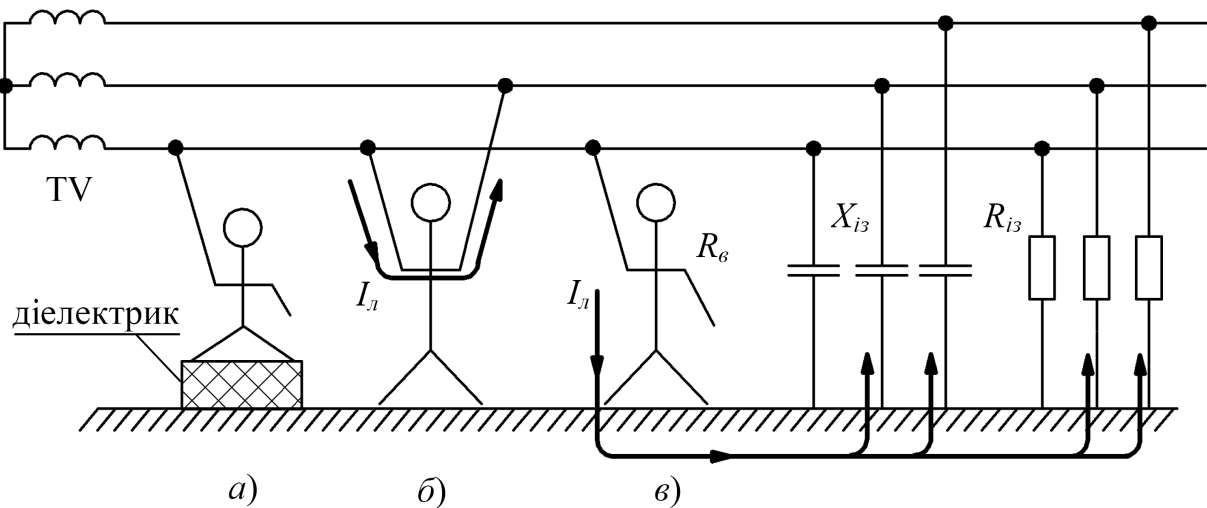


Рис. 1.9. Імовірні варіанти торкання людиною струмопровідних елементів шахтної дільничної мережі: *а* – людина знаходиться на діелектричній основі, виток струму відсутній; *б* – торкання двох фаз мережі; *в* – однофазний виток струму на землю через опір $R_{г}$ тіла людини

При оцінці фактичних величин струму однофазного виток на землю в умовах електротехнічного комплексу дільниці шахти (рис. 1.10, *а*) опір тіла людини $R_{г}$ вважається активним, ємності та активні опори ізоляції фаз мережі відносно землі – зосередженими та симетричними, активно–індуктивний опір кабельних ліній не враховується [13; 17; 18]. За таких припущень ефективне значення струму виток на землю $I_{г}$ (А) визначається залежністю (рис. 1.10, *б*) [19]:

$$I_{г} = \frac{U_{\phi}}{R_{г} \sqrt{1 + \frac{R(R + 6R_{г})}{9R_{г}^2(1 + R^2 w^2 C^2)}}}, \quad (1.2)$$

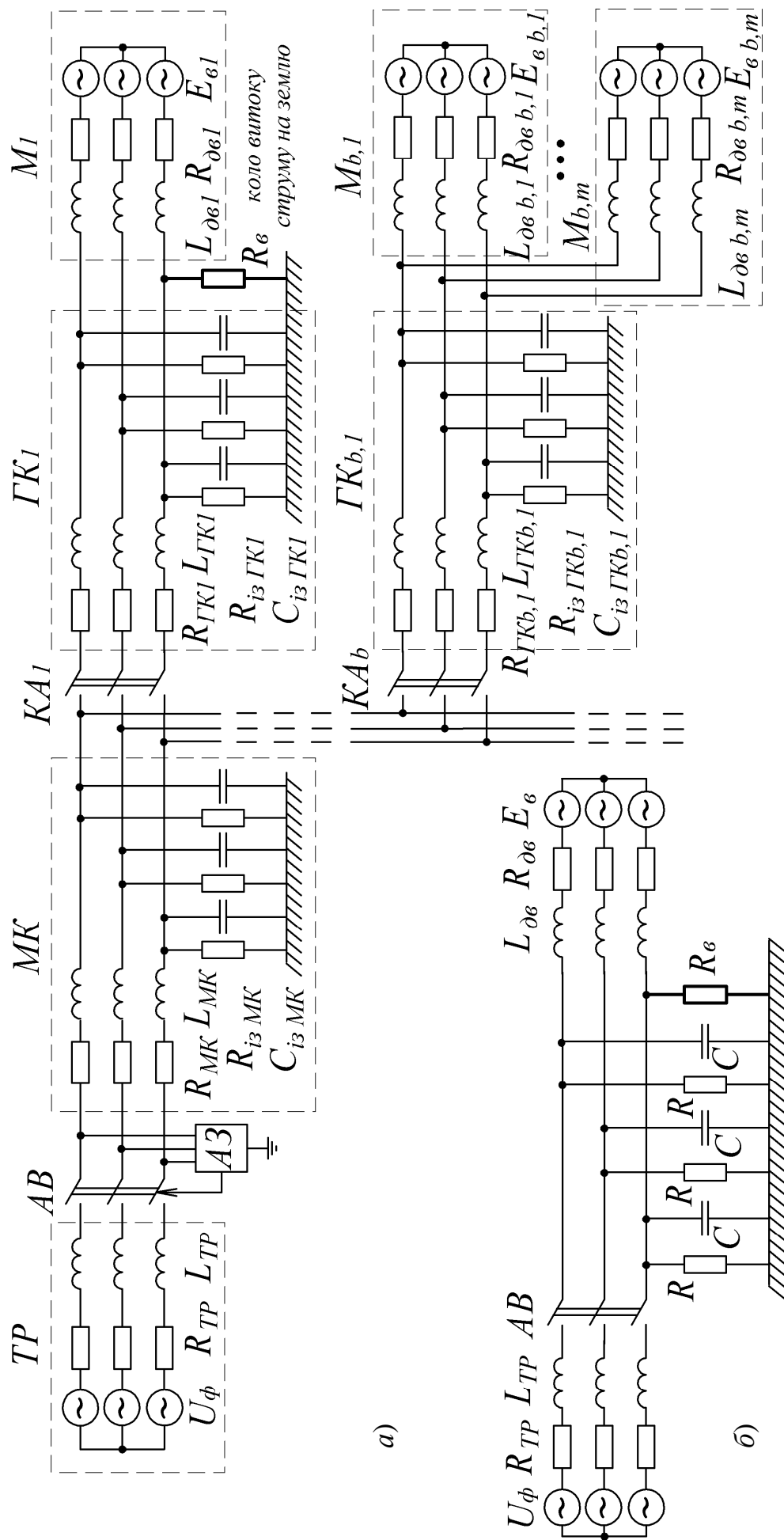


Рис. 1.10. Схема заміщення електротехнічного комплексу ділянки шахти за наявності однофазного витоку струму на землю (а) та відповідна розрахункова схема при прийнятих припущеннях (б)

де U_ϕ – фазна напруга мережі, В; C , R – відповідно ємність (Ф/фаза) та активний опір (Ом/фаза) ізоляції фази мережі відносно землі; ω – колова частота напруги мережі, рад/с.

Миттєві значення струму витоку визначаються згідно виразу [7; 20]:

$$i_\phi = \frac{U_m}{R_\phi} \left\{ A \sin(\omega t + j + a) + [\sin j - A \sin(j + a)] e^{-d_1 t} \right\}, \quad (1.3)$$

причому:

$$A = \sqrt{(R_{i3}^2 + X_c^2) / [R_{i3}^2 + X_c^2 (1 + R_{i3} / R_\phi)^2]}, \quad (1.4)$$

де U_m – амплітуда фазної напруги; $X_c = 1/(\omega C_{i3})$ – ємнісний опір ізоляції трьох фаз мережі відносно землі; $C_{i3} = 3C$, $R_{i3} = R/3$ – відповідно, сумарна ємність та активний опір ізоляції фаз мережі відносно землі; $d_1 = 1/(R_\Sigma C_c)$; $R_\Sigma = R_{i3} R_\phi / (R_{i3} + R_\phi)$; $a = \arctg[X_c (1 + R_{i3} / R_\phi) / R_{i3}] - \arctg(X_c / R_{i3})$.

В умовах електротехнічних комплексів технологічних дільниць шахт струм витоку на землю через тіло людини являє небезпеку смертельного електроураження [16; 21–23], чим визначена актуальність впровадження заходів для обмеження величини та тривалості протікання цього струму.

Зокрема, засобом попередження виникнення витоків струму на землю є блокування ввімкнення відгалуження дільничного ЕТК з низьким опором ізоляції відносно землі [7, 18]. Цей принцип пояснюється схемою блокувального реле витоку (рис. 1.11), яке контролює опір ізоляції відключеного приєднання відносно землі шляхом накладання на відключене відгалуження постійного оперативного струму.

Контроль витоку струму на землю у ввімкненій електромережі дільниці шахти та формування команди на її захисне відключення (в разі перевищення струмом витоку припустимої величини – 0,025 А) виконують засоби захисного знеструмлення мережі при виникненні кола витоку на землю (апарати АЗУР і подібні, як складова розподільного пристрою низької напруги дільничної трансформаторної підстанції).

ввімкнена послідовно у коло контрольованого параметра, обумовить непрацездатність схеми апарату захисту в цілому.

Виявити однофазний виток струму на землю також можливо за напругою або струмом нульової послідовності (рис. 1.13). Загальний вираз для обчислення напруги нульової послідовності в усталеному аварійному режимі має вигляд [17]:

$$U_0 = U_{0m} e^{j\theta} = U_m \cdot \frac{e^{j\theta}}{\sqrt{1 + 9R_g^2 \omega^2 C^2}}, \quad (1.5)$$

де U_{0m} – модуль напруги нульової послідовності; $\theta = \arctg 3\omega CR_g$; U_m – амплітуда фазної напруги.

Величина напруги нульової послідовності контролюється виконавчим органом K , що ввімкнено між нульовою точкою фільтра приєднання Z_0 землею (рис. 1.13, в) [13; 17]. Для виявлення аварійного режиму за струмом нульової послідовності використовується кільцевий трансформатор струму (рис. 1.12, д) [25]. При відносній простоті та високій швидкодії, такі пристрої характеризуються незначною чутливістю, нездатністю реагувати на симетричні зниження опору ізоляції та високою імовірністю хибних спрацьовувань.

Класичним прикладом промислової реалізації принципу послідовного підключення обмотки реле до кола оперативного параметра (з наданням реле функції вимірювального пристрою) є схема апарату захисту від витоків струму на землю серії УАКІ (рис. 1.14). При зниженні активного опору ізоляції мережі оперативний струм від випрямляча VD1–VD3 через робочу обмотку II реле К збільшується, перевищуючи струм через обмотку гальмування I, що призводить до спрацьовування реле і утворення відповідної захисної функції.

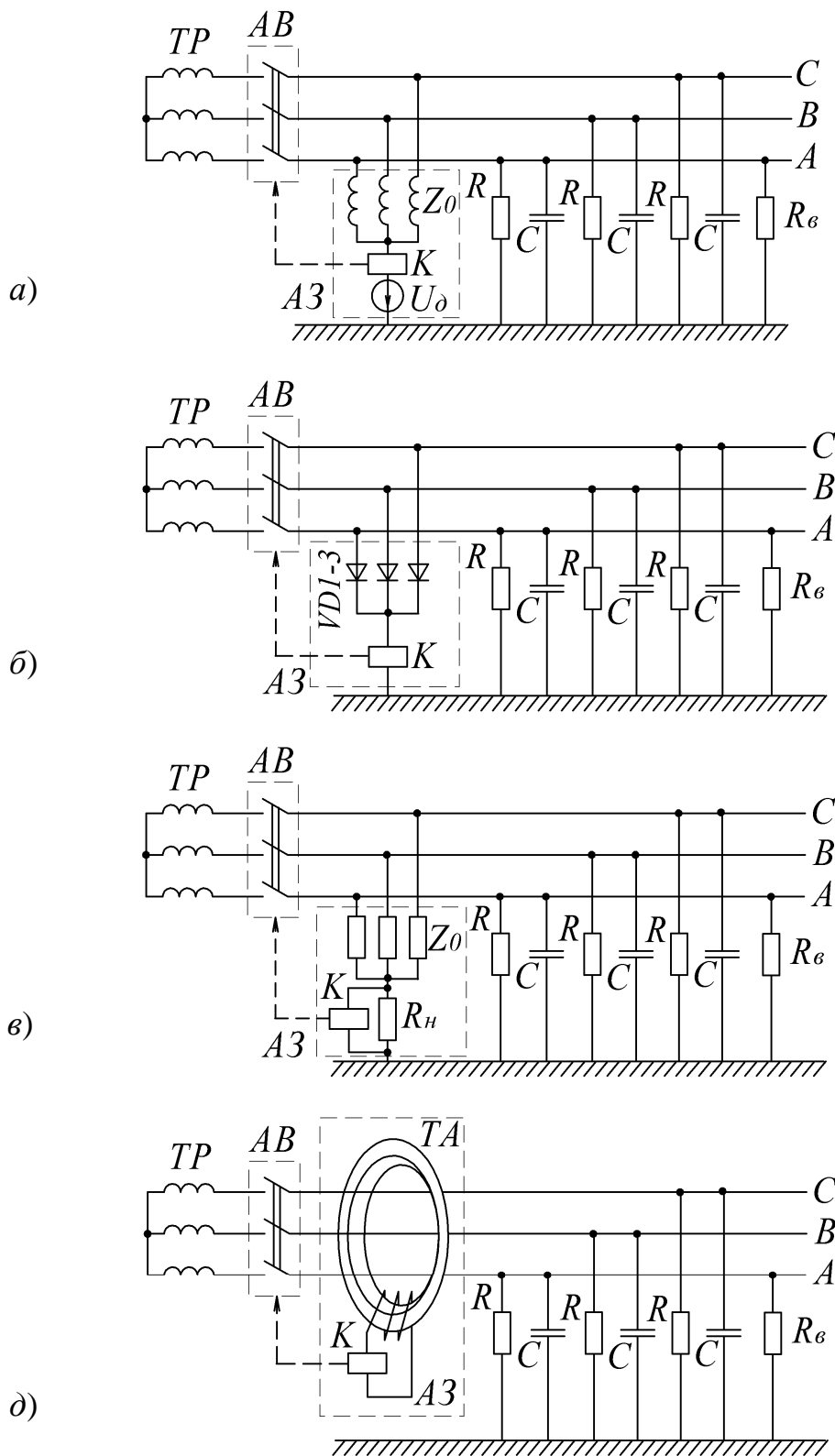


Рис. 1.12. Електричні схеми до пояснення способів контролю опору ізоляції дільничної електромережі відносно землі: накладення на мережу постійного оперативного струму (а), контроль випрямлених струмів мережі (б), контроль напруги (в) та струму (д) нульової послідовності

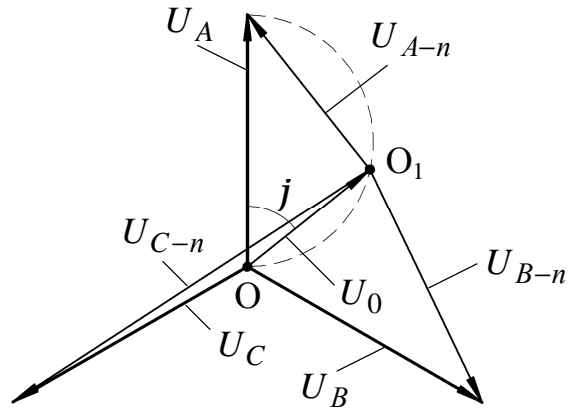


Рис. 1.13. Векторна діаграма напруг дільничної мережі з ізольованою нейтраллю при однофазному витоку струму на землю з фази А: U_A, U_B, U_C – симетрична трифазна система напруг; U_0 – напруга нульової послідовності; $U_{A-n}, U_{B-n}, U_{C-n}$ – система фазних напруг при однофазному витоку струму на землю з фази А

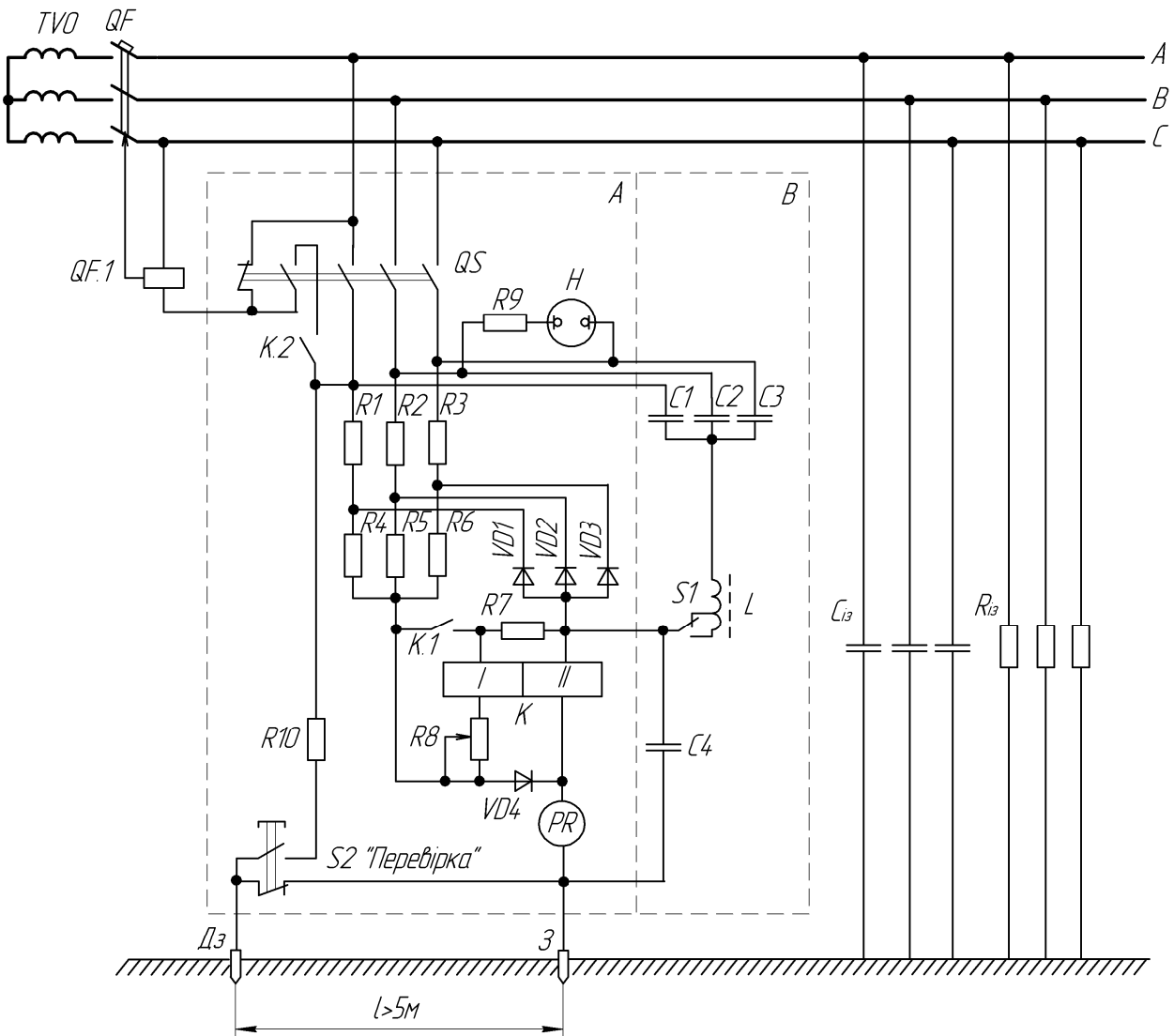


Рис. 1.14. Схема апарата захисту від витоків струму на землю УАКІ

Схема УАКІ і подібних пристроїв реалізує статичну компенсацію ємнісних струмів витоку на землю дроселем L , що не дозволяє реагувати на зміну ємності ізоляції при підключенні, або відключенні кабельних відгалужень [17; 20]. Незмінність індуктивності дроселя при реконфігураціях мережі не дає змоги в повному обсязі компенсувати ємнісну складову струму витоку.

Ці недоліки усунені в схемах апаратів захисту пізніших розробок (АЗУР) [7]. Принцип виявлення небезпечного зниження активного опору R_{i3} ізоляції мережі відносно землі (виникнення витоку струму на землю) реалізується шляхом зіставлення (елементом порівняння ЕП) оперативного (I_{on}) та пульсуючого еталонного (I_{em}) струмів, перший з яких генерується джерелом оперативного струму ДОС і накладається між фазами мережі та землею, другий – протікає у колі генератора прямокутних імпульсів G (рис. 1.15). За наявності ланки завеликої провідності на землю оперативний струм перевищує амплітудні значення імпульсів еталонного (рис. 1.16), і через підсилювач П1 подається команда на захисне відключення мережі шляхом знеструмлення реле $K2$, яке, в свою чергу, знеструмлює нульовий розчеплювач автоматичного вимикача дільничної трансформаторної підстанції. Автокомпенсація ємнісної складової струму витоку здійснюється дроселем $L1$ з регульованою індуктивністю, який ввімкнено між штучно утвореною нульовою точкою індуктивного фільтра приєднання – первинної обмотки трансформатора $TV2$ – та основним заземлювачем апарата 3 . Зі збільшенням фактичної ємності мережі C_{i3} зростає частота f_k коливального контура KK , наближуючись до частоти імпульсів f_2 генератора G , що спричиняє зростання напруги на $TV4$ та відповідне підвищення струму I_n підмагнічування дроселя $L1$.

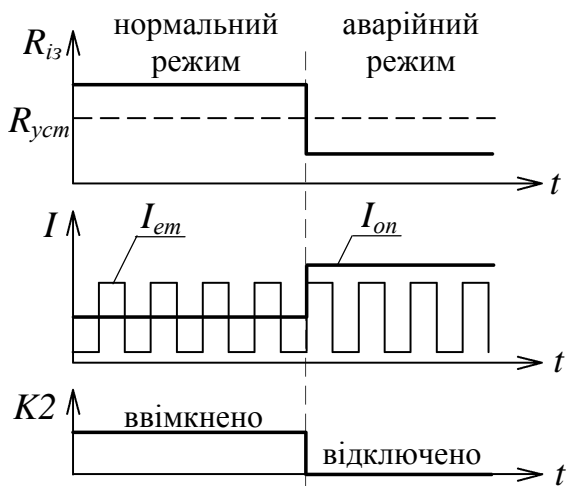


Рис. 1.16. Діаграма контролю активного опору ізоляції мережі апаратом серії АЗУР

В разі живлення дільничної електромережі напругою підвищеного рівня (1140 В) для зменшення тривалості протікання струму через тіло людини застосовується закорочування на землю фази з найменшим опором витoku (рис. 1.17) [12; 17; 18]. Пристрої визначення пошкодженої фази реагують на: зниження абсолютних значень

напруги фази з витокom; підвищення абсолютних значень напруги двох непошкоджених фаз; суму або різницю векторів опорних напруг та напруги нульової послідовності; різницю абсолютних значень фазних напруг та напруги нульової послідовності. Принцип закорочення пошкодженої фази мережі на землю реалізовано в апаратах РУ-1140, АЗУР-4.

Таким чином, на даний час розроблені і впроваджені в промисловості швидкодіючі засоби для виявлення небезпечного витoku струму на землю і захисного відключення ЕТК шахтної дільниці. Заходами обмеження струму в колі витoku струму на землю є компенсація (автокомпенсація) його ємнісної

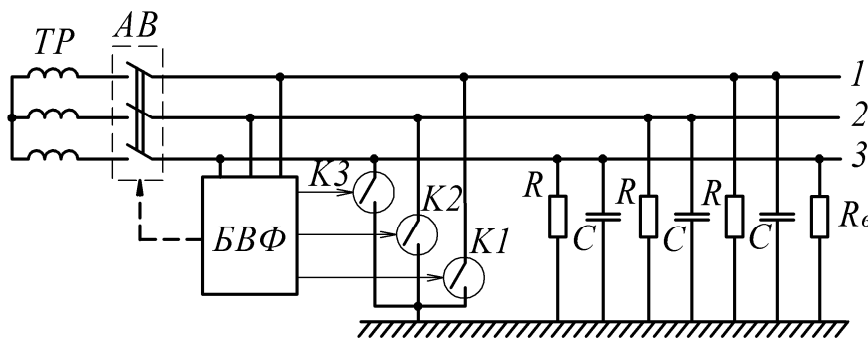


Рис. 1.17. Фрагмент схеми ЕТК дільниці з пристроєм замикання на землю пошкодженої фази: БВФ – блок визначення фази з витокom; К1–К3 – короткозамикачі

складової, закорочування на землю фази із замалим опором відносно землі в процесі захисного відключення мережі.

1.3 Асинхронні двигуни споживачів як джерело зворотніх енергетичних потоків

Властивості асинхронних двигунів створювати зворотні ЕРС в процесі вибігу обумовлюють підтримання небезпечного стану мережі після її захисного відключення в разі виникнення кола витoku струму на землю. Тому проблематика впливу асинхронних двигунів споживачів на параметри електробезпеки потребує окремого дослідження.

Раціональним слід вважати підхід до аналізу процесів в багатодвигуневих електротехнічних комплексах на основі використання векторного метода [26]. Базуючись на незмінності потокозчеплення ротора при відключенні асинхронного двигуна від джерела живлення, встановлюється характер зміни напруги статора АД u_s в стані індивідуального вибігу:

$$u_s = k \cdot U_s \cdot e^{-\frac{t}{T_{r0}}} \cdot \cos[(1-s)\omega_1 t + \alpha - j], \quad (1.6)$$

де k – коефіцієнт, що відображає ступінь механічного навантаження двигуна, змінюється від 0,83 при номінальному навантаженні до 0,95 в ненавантаженому режимі; U_s , ω_1 – відповідно, амплітудне значення та кутова частота напруги мережі; T_{r0} – стала часу ротора; s – ковзання двигуна. Недоліком наведеної залежності є ігнорування зниженням частоти обертання ротора під час вибігу.

Одночасне відключення групи асинхронних двигунів досліджується операторним методом із припущеннями стосовно величин операторних провідностей окремих двигунів [26]. Це дозволяє отримати приблизні аналітичні залежності для визначення характеру затухання групової зворотної ЕРС та величин зрівнювальних струмів між двигунами під час вибігу. Проте така математична модель не враховує особливостей конфігурації та функціонування електротехнічних комплексів дільниць шахт

(наявність комутаційних апаратів та гнучких кабелів відгалужень, тощо). Крім того, мають бути враховані закономірності розподілення потужностей між двигунами під час групового вибігу: обмін реактивною потужністю визначається величинами сталих часу роторів, а обмін активною потужністю залежить від ковзання двигунів.

Оцінка величини електромагнітної сталої часу T_e затухання зворотної ЕРС двигуна виконується відповідно до [20; 24; 27]:

$$T_e = \frac{U_\phi}{I_0 r_e w_1} K, \quad (1.7)$$

де U_ϕ – фазна напруга статора, В; I_0 – струм двигуна в ненавантаженому режимі, А; r_e – еквівалентний активний опір ротора, Ом; w_1 – синхронна частота обертання, 1/с; K – коефіцієнт для врахування насичення магнітного кола двигуна, для комбайнових електродвигунів з повітряним охолодженням $K = 1 \div 1,2$, з водяним охолодженням $K = 1,6 \div 1,8$.

Сталу часу T_2 затухання ЕРС групового вибігу n двигунів має бути визначена залежністю:

$$T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n P_{nk}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{nk}}{T_{ek}}}, \quad (1.8)$$

де P_{nk} – номінальна потужність k -го двигуна.

Запропоновані залежності (1.7) та (1.8) дозволяють з припустимою для технічних розрахунків точністю визначити сталі часу затухання зворотної ЕРС АД, проте вони не враховують рівень механічного навантаження двигунів під час вибігу.

Вплив рівня навантаження двигуна на характер затухання зворотної ЕРС представлений діаграмою експерименту [28]. За результатами досліджень можна встановити, що зі збільшенням механічного навантаження двигуна початкове значення зворотної ЕРС зменшується, а інтенсивність її затухання зростає (рис. 1.18).

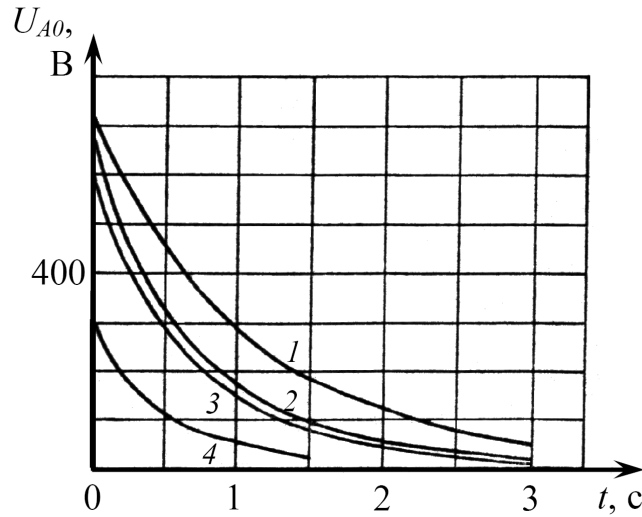


Рис. 1.18. Залежність ефективного значення напруги фази А відносно землі U_{A0} , що обумовлена ЕРС двигуна потужністю 88 кВт під час вибігу, за даними експерименту М.І. Озерного [28] при навантаженні: 1 – $0,68I_n$; 2 – $0,84I_n$; 3 – $1,7I_n$; 4 – $4,1I_n$; I_n – номінальний струм двигуна; t – час вибіга з моменту відключення мережі

Іншими дослідженнями [29], виконаними на основі аналізу режиму вибіга АД в системі «двигун – механізм» доведена наявність залежності інтенсивності зниження кутової швидкості двигуна під час вибігу від рівня моменту опору механізму (рис. 1.19). Встановлено, що зниження кутової швидкості двигуна під час вибіга відбувається тим повільніше, чим більше момент інерції механізму, його початкова частота обертання, а також чим менше рівень механічного навантаження двигуна.

При цьому, отримано аналітичну залежність кутової швидкості двигуна w під час вибігу від характеру механічного моменту навантаження [30]:

$$w = g^{-1} \sqrt{\frac{1}{1 + (g - 1)t/t}}, \quad (1.9)$$

де t – механічна стала часу механізму; g – показник, що характеризує механічну характеристику машини: $g=0$ при незмінному моменті опору; в разі лінійної залежності механічного моменту від кутової швидкості $g=1$; «вентиляторній» механічній характеристиці відповідає $g=2$.

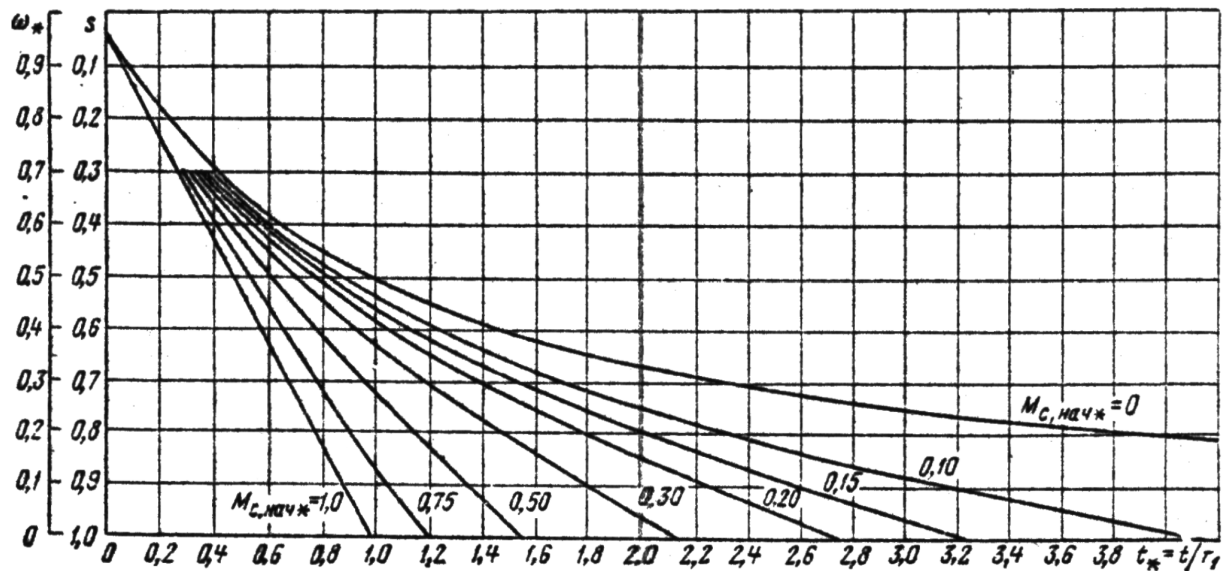


Рис. 1.19. Криві вибігу для агрегата з механізмом, що має вентиляторний момент опору, при зміні відносного рівня моменту опору механізму $M_{с.нач*}$, отримані І.А. Сиромятниковим [29]; s , ω_* – ковзання та відносна кутова частота обертання двигуна; t_* – відносний час (в долях часу прискорення агрегата)

Характерною особливістю групового вибігу асинхронних двигунів різної потужності і рівнів навантаження слід вважати утворення зрівнювальних струмів в мережі живлячих кабелів, що супроводжується обміном енергії [29]. При цьому, в генераторному режимі функціонують ті двигуни, що при індивідуальному вибігу знижують швидкість обертання меншою мірою, ніж інші.

Таким чином, експонента зворотної ЕРС одиночного асинхронного двигуна, або узагальнена ЕРС, обумовлена сукупністю зворотних енергетичних потоків групи двигунів різних потужностей в режимі вибігу, має бути врахована при розрахунку показників електробезпеки в колі витоку струму на землю після захисного відключення мережі.

Дослідження процесів в системі "кабель - двигун" при захисному відключенні мережі [13, 17, 24, 31] дали підстави вважати, що існує безліч співвідношень "довжина кабелю / переріз жили", стосовно яких виникають небезпечні початкові струми витоки (більше 25 мА), обумовлені дією ЕРС

обертання двигуна. Проте реальний процес в мережі після її захисного відключення обумовлюється загальною дією на коло витoku ЕРС обертання усіх раніше включених двигунів. Тому актуальним є встановлення характеру протікання і кількісних параметрів процесів, обумовлених спільною дією на коло витoku струму на землю з боку ЕРС обертання групи двигунів технологічної дільниці шахти в режимі їх вільного вибігу [32-35].

Розглянемо схему дільничної електромережі (рис. 1.20), параметри якої наведено в табл. 1.2, причому прийняті наступні припущення [36]: лінійна напруга U_H трифазної мережі становить 660 В; початкова величина ЕРС кожного двигуна - $0,9U_H$; однофазний виток струму на землю ($R_{yT} = 1$ кОм) виник в кабелі електроживлення комбайна (М1) в момент t_1 ; захисне відключення мережі відбулося в момент t_2 ; всі контактори (КМ1-КМ6) були ввімкнені до момента зниження напруги в мережі до рівня $0,4U_H$ (t_3); ємності ізоляції гнучких кабелів ($C_{изи}$) однакові в кожній з трьох фаз та відповідають питомим параметрам кабеля i -го споживача з урахуванням його довжини; активні опори ізоляції кабелів ($R_{изи}$) однакові в кожній з трьох фаз відповідного i -го кабеля, однакові для кабеля кожного споживача та складають $R_{из} > 31$ кОм для всієї мережі.

ЕРС обертання, що наводиться в статорі асинхронного двигуна полем струмів ротора, визначається із співвідношення [31]:

$$u_{ep} = \frac{L_m}{L_p} j(1-S)w_o y_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{jw_o(1-s)t}, \quad (1.10)$$

де L_m – індуктивність намагнічування АД; L_p – повна індуктивність ротора; s та w_o – ковзання та синхронна частота обертання ротора.

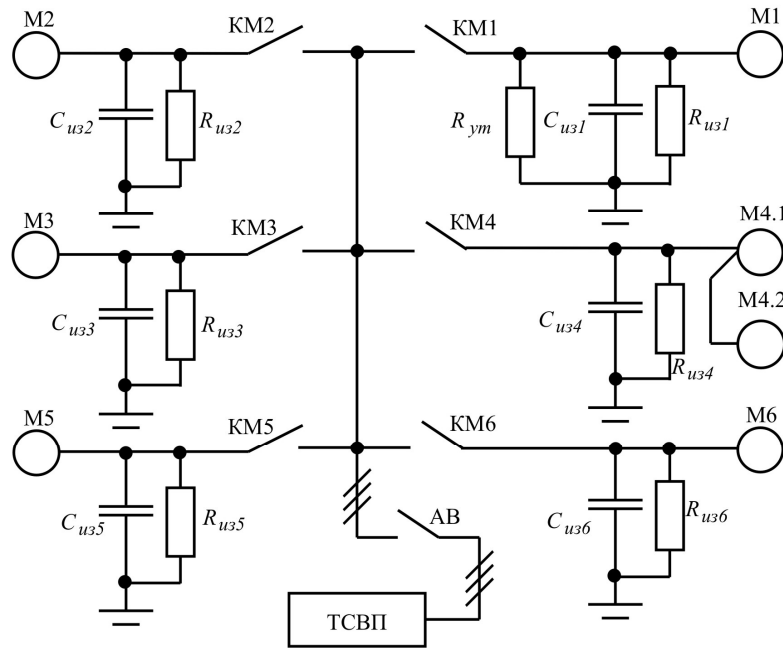


Рис. 1.20. Розрахункова схема електромережі дільниці шахти

Таблиця 1.2

Основні параметри електромережі дільниці шахти

№	Тип споживача	Номінальні параметри АД			Параметри гнучких кабелів		
		потужність, кВт	струм, А	$\cos \varphi$	перетин жили, мм ²	довжина, м	питома ємність ізоляції, мкФ/фазу/км
1	Комбайн	210	231	0,855	70	300	0,87
2	Конвеєр лави (верхній привод)	110	121,6	0,85	25	300	0,424
3	Конвеєр лави (нижній привод)	110	121,6	0,85	25	50	0,424
4	Конвеєр штрека	2x110	243,2	0,85	70	50	0,87
5	Маслостанція СНТ-32	55	62,5	0,86	16	50	0,363
6	Станція зрошення	30	35,1	0,84	10	50	0,345

Стала часу затухання струму ротора визначається виразом:

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_H}{I_0 r_p w_0}, \quad (1.11)$$

де r_p – активний опір обмотки ротора АД; U_ϕ – фазна напруга статора двигуна в режимі неробочого ходу; $K_H = 1,1$ (для АД з повітряним

охолодженням) – коефіцієнт, що враховує насичення магнітної системи АД;
 I_0 – струм неробочого ходу АД.

В той же час, на тривалість зниження швидкості обертання ротора АД суттєво впливає приведений момент інерції $J_{\text{пр}}$ привода та статичний момент опору M_c [11]:

$$t_T = J_{\text{пр}} \int_{w_2}^0 \frac{dw}{-M_c} = \frac{J_{\text{пр}} w_2}{M_c}, \quad (1.12)$$

де w_2 – частота обертання ротора двигуна при $M = M_c$.

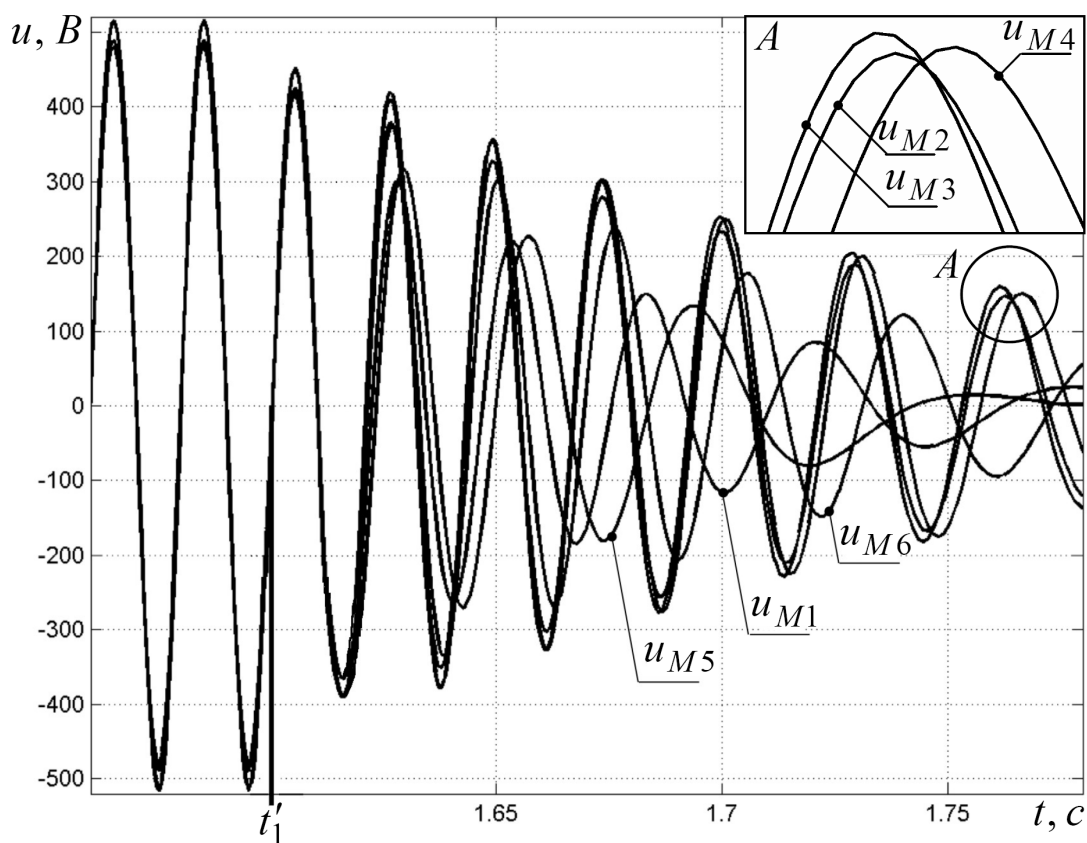


Рис. 1.21. ЕРС обертання двигунів для розімкненої мережі

Згідно припущення, що синхронно з АВ відключаються контактори всіх пускачів (в момент t_l) та з урахуванням залежностей (1.10)-(1.12), можна встановити, що миттєві значення ЕРС обертання роторів різних за потужністю двигунів при зниженні можуть приймати значення, різні за амплітудою, частотою та знаком (рис. 1.21). Завдяки цьому можуть

формуватися умови підтримання у двигуновому режимі окремих АД за умови, що контактори пускачів залишаються ввімкненими. Під час вибігу в такому випадку двигуни споживачів дільниці створюють в мережі системи трифазних напруг, що знижується експоненціально. Вказана ЕРС підтримує струм в колі витoku на землю (рис. 1.22). З моменту t_3 відключення контакторів через припинення взаємного впливу двигунів збільшується інтенсивність гальмування роторів АД (рис. 1.23).

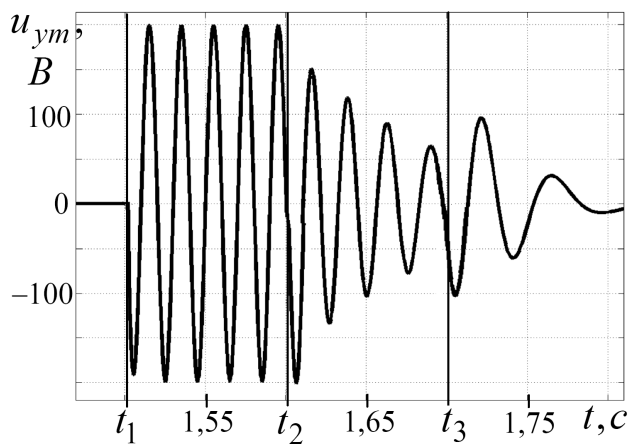


Рис. 1.22. Діаграма зміни напруги на опорі R_{ym} кола однофазного витoku струму на землю

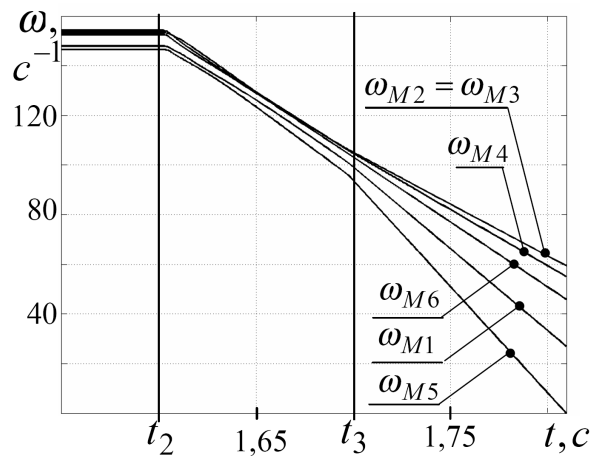


Рис. 1.23. Діаграма зміни частот обертання двигунів М1-М6 під час вибігу

Таким чином, з моменту відключення напруги в електромережі дільниці шахти двигуни споживачів спільно генерують систему ЕРС, яка: підтримує пускачі у ввімкненому стані та обумовлює руховий режим роботи окремих двигунів споживачів; обумовлює протікання струму в колі однофазного витoku на землю, чим негативно впливає на рівень електробезпеки.

2 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС З ДЖЕРЕЛАМИ ДВОБІЧНОГО УТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ЯК ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Математична модель дільничного електротехнічного комплексу

Аналіз відомих досліджень свідчить, що задача математичного моделювання електротехнічного комплексу дільниці шахти за наявності однофазного витоку струму на землю вирішується в два етапи. На першому етапі має бути обґрунтована модель силових елементів мережі, яка дозволяє визначити напругу в аварійній точці. В подальшому слід виконати моделювання параметрів ізоляції кабельної мережі сукупно з опором кола витоку, що, з урахуванням величини напруги в місці витоку, дасть змогу оцінити ступінь електроураження людини за умови торкання струмоведучого елемента електромережі.

Обґрунтування математичної моделі ЕТК дільниці може бути виконане, зокрема, на основі запропонованих К. П. Ковачем та І. Рацем рівнянь в операторній формі [26], які описують функціонування багатодвигунової електротехнічної системи. В цьому випадку до відомих залежностей доцільно внести корективи з метою врахування особливостей конфігурації дільничного комплексу [37; 38]. Зокрема, врахувати параметри гнучких кабелів, характер зниження частоти обертання двигуна кожного споживача після відключення напруги живлення, взяти до уваги самовільне відключення комутаційних апаратів відгалужень під час вибігу двигунів. Операторні провідності відгалужень системи $Y_i(p)$ визначаються параметрами схем заміщення відгалужень та частотами обертання ω_i двигунів, причому останні залежать від вектора напруги \bar{u} в загальній частині мережі (рис. 2.1) [39].

Перехідний процес при груповому вибігу двигунів доцільно моделювати за умови збереження тотожності нулю суми операторних провідностей відгалужень системи:

$$\sum_{i=1}^n Y_i(p) = 0. \quad (2.1)$$

Обчислені в результаті розв'язання рівняння (2.1) величини p визначають вектор напруги в загальній частині мережі \bar{u} . Встановлено, що розв'язати наведене рівняння числовими методами із застосуванням сучасних засобів комп'ютерного моделювання є можливим лише для обмеженого діапазону зміни параметрів елементів системи. Труднощі із обчисленням рішень виразу (2.1) для деяких значень параметрів (зокрема, в разі близького до номінального навантаження двигунів) унеможливають розгляд такого підходу як припустимого при аналізі процесів в дільничному електротехнічному комплексі.

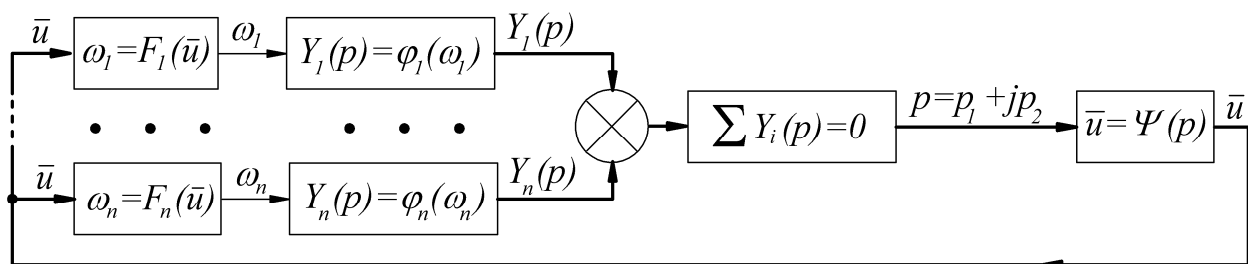


Рис. 2.1. Узагальнена структурна схема математичної моделі групового вибігу двигунів споживачів ЕТК ДШ, що передбачає збереження тотожності нулю суми операторних провідностей відгалужень системи

Інший варіант обґрунтування математичної моделі ЕТК ДШ передбачає використання метода просторового вектора [26], – коли спільна дія всіх трьох фаз виражається єдиною комплексною величиною:

$$\bar{x} = \frac{2}{3}(x_a + a \cdot x_b + a^2 x_c), \quad (2.2)$$

де x_a, x_b, x_c – миттєві значення фізичної величини x трифазної системи;

$a = e^{j120^\circ}$ - фазовий множник.

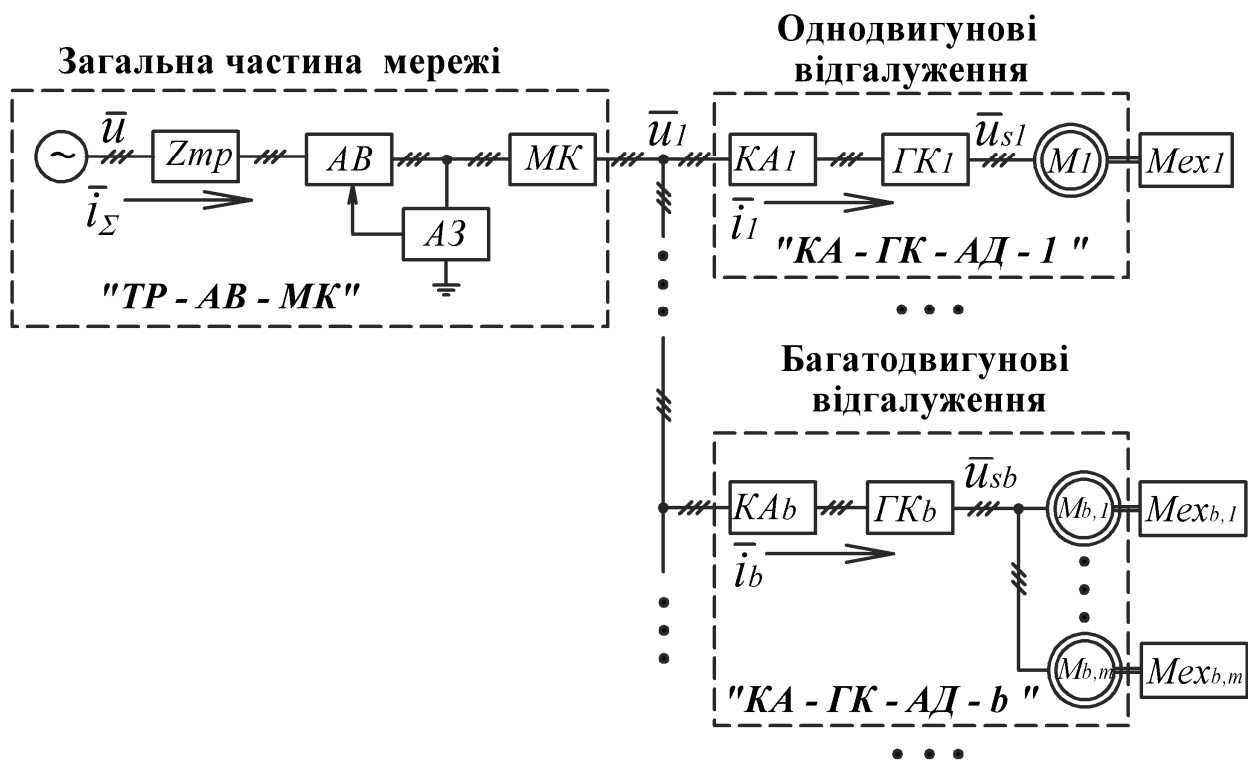


Рис. 2.2. Структурна схема ЕТК ДШ, що прийнята для моделювання

Структурно силова частина дільничного ЕТК (рис. 2.2) включає загальну частину мережі, одновигунові (у кількості $b-1$) та багатодвигунові відгалуження (у кількості $n-b+1$, де n – загальна кількість відгалужень) [8]. До загальної частини мережі відноситься вторинна обмотка дільничного трансформатора (позначена джерелом напруги \bar{u} та опором Z_{mp}), автоматичний вимикач АВ розподільчого пристрою низької напруги ТП, апарат захисного знеструмлення кола витoku струму на землю АЗ та магістральний кабель МК. До складу відгалужень входять комутаційні апарати КА, гнучкі кабелі ГК та один або декілька асинхронних двигунів М споживачів ($Mех_j$). Просторовий вектор струму у загальній частині мережі позначено \bar{i}_Σ , а у відгалуженнях – \bar{i}_j , де $j = \overline{1, n}$ – номер відгалуження. \bar{u}_1 та \bar{u}_{sj} позначають просторові вектори напруги у загальній частині мережі та на затискачах статорів двигунів відповідно.

На схемі заміщення одновигунового відгалуження («КА–ГК–АД») ЕТК ДШ (рис. 2.3, а) прийняті наступні позначення [40; 41]: R_{KA} – активний

опір фази комутаційного апарату; R_K, L_K – активний опір та індуктивність гнучкого кабеля; R_s, R_r – активний опір фази статора та приведений активний опір фази ротора, відповідно; L_{sl}, L_{rl} – індуктивність розсіювання статора та ротора (що приведений до статора), відповідно; L_m – індуктивність намагнічування двигуна; \bar{y}_r – просторовий вектор потокозчеплення ротора; ω – швидкість обертання ротора двигуна; \bar{i}, \bar{i}_r – просторові вектори струму у статорному колі та струму ротора двигуна, відповідно.

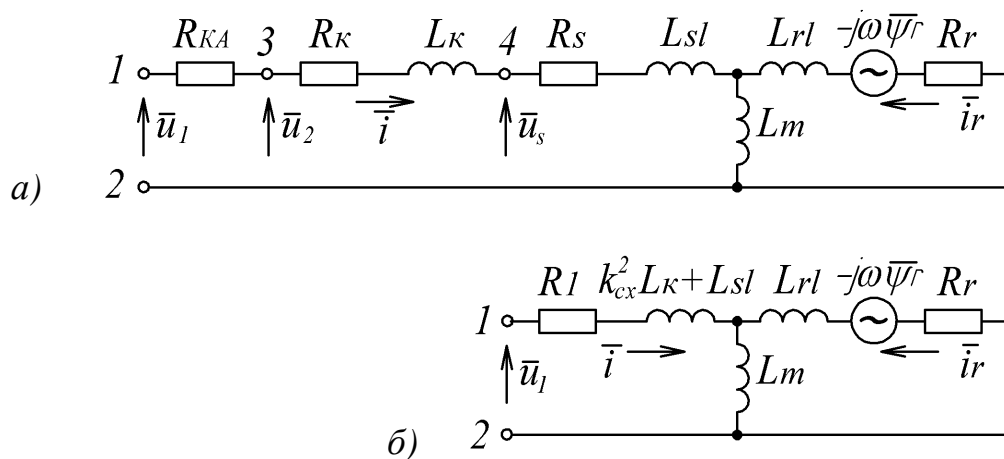


Рис. 2.3. Схема заміщення однодвигунового відгалуження («КА – ГК – АД») ЕТК ДШ: а) вихідна; б) розрахункова

Наведена схема заміщення є коректною при з'єднанні обмоток двигуна за схемою «зірка» (Y). З'єднання статорних обмоток згідно схеми «трикутник» (Δ) викликає необхідність у перерахунку параметрів «трикутника» до еквівалентної «зірки». Через складність схеми заміщення відгалуження «КА – ГК – АД» розрахунки в даному випадку доцільно вести у такій послідовності. Опори гнучкого кабеля та комутаційного апарата відгалуження мають бути внесені з необхідними коефіцієнтами у гілки трикутника фазних обмоток статора АД. Отримаємо схему заміщення відгалуження, де фазні опори всіх елементів ввімкнені у сторони трикутника. Така схема може бути проаналізована за схемою заміщення (рис. 2.3, а) за умови перерахунку струмів та напруг до еквівалентної «зірки». Для

врахування схеми з'єднання статорних обмоток двигуна відгалуження в аналітичні вирази потрібно ввести схемний коефіцієнт:

$$k_{cx} = \begin{cases} 1, & \text{схема } Y; \\ \sqrt{3}, & \text{схема } \Delta. \end{cases} \quad (2.3)$$

На розрахунковій схемі заміщення відгалуження (рис. 2.3) позначено:

$$R_1 = k_{cx}^2 (R_{KA} + R_K) + R_S. \quad (2.4)$$

На основі законів Кірхгофа за умови симетрії трифазної системи, запишемо рівняння електричної рівноваги у нерухомій системі координат. Додаючи до них основне рівняння динаміки двигуна, отримаємо систему рівнянь, що описує процеси у відгалуженні “КА – ГК – АД” [42]:

$$\begin{cases} \bar{y}_1 = \int (\bar{u}_1 - \bar{i} R_1) dt + \bar{y}_1(0); \\ \bar{y}_r = \int (j\omega \bar{y}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{y}_r(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_c) dt + \omega(0), \end{cases} \quad (2.5)$$

де \bar{y}_1 – просторовий вектор потокозчеплення статора АД та ГК; M – електромагнітний момент двигуна, який обчислюється згідно залежності [26]:

$$M = -1,5 \bar{y}_r \times \bar{i}_r = -1,5 \text{Im}[\hat{y}_r \bar{i}_r]. \quad (2.6)$$

Усі розрахунки, що стосуються АД, відносяться до дво полюсних асинхронних машин. Якщо асинхронна машина багатополюсна, механічні параметри перераховуються на еквівалентну дво полюсну машину згідно залежностей [26]:

– колова швидкість

$$\omega = p \omega'; \quad (2.7)$$

– обертаючий момент

$$M = M' / p; \quad (2.8)$$

– момент інерції

$$J = J' / p^2, \quad (2.9)$$

де дійсні параметри машини позначені рискою; p – кількість пар полюсів машини.

Всі три фази асинхронних двигунів вважаються симетричними. Іншими припущеннями є наступні. Ротори всіх двигунів є короткозамкненими, виконані у вигляді простої білячої клітки. Для кожного АД крива намагнічування сталі – прямолінійна, втрати в сталі відсутні. Кожна машина має циліндричний ротор, сили намагнічування та поля ротора розподіляються синусоїдально, тобто не враховуються просторові вищі гармонічні складові сил та полів намагнічування. Не враховується насичення шляхів розсіювання, взаємний вплив потоків розсіювання та головного магнітного потоку.

Просторові вектори струму у статорному колі та струму ротора двигуна, відповідно, обчислюються за наступними залежностями [26]:

$$\bar{i} = (L_r \bar{y}_1 - L_m \bar{y}_r) / (L_1 L_r - L_m^2); \quad (2.10)$$

$$\bar{i}_r = (L_1 \bar{y}_r - L_m \bar{y}_1) / (L_1 L_r - L_m^2), \quad (2.11)$$

причому

$$L_1 = k_{cx}^2 L_k + L_{sl} + L_m; \quad (2.12)$$

$$L_r = L_{rl} + L_m. \quad (2.13)$$

Зв'язок просторового вектора \bar{u}_1 , утвореного з фазних напруг еквівалентного «трикутника» відгалуження, з аналогічним вектором \bar{u}_{1e} , утвореним з фазних напруг еквівалентної «зірки», встановлює залежність:

$$\bar{u}_1 = k_{cx} \bar{u}_{1e}. \quad (2.14)$$

Струм відгалуження \bar{i} , що обраховано для еквівалентного «трикутника», може бути перераховано у струм для еквівалентної «зірки» \bar{i}_e за формулою:

$$\bar{i}_e = k_{cx} \bar{i}. \quad (2.15)$$

Вважаючи комутації КА ідеальними (відбуваються миттєво за відсутності електричної дуги), припустимо, що при замкнених контактах $R_{KA} = R_{KA \min}$, а при розімкнених - $R_{KA} = R_{KA \max}$, тоді:

$$R_{KA} = \begin{cases} R_{KA \max}, & \text{якщо } b = 1; \\ R_{KA \min}, & \text{якщо } b = 0, \end{cases} \quad (2.16)$$

де b – змінна, що визначає стан контактів КА: при $b = 1$ контакти розімкнені, при $b = 0$ – замкнені.

Оскільки існує декілька способів відключення комутаційного апарату відгалуження, значення змінної b визначається за допомогою логічної операції «АБО»:

$$b = b' \vee b'' \vee b''' , \quad (2.17)$$

де b' – змінна, що визначає наявність команди обслуговуючого персоналу на відключення контактору ($b' = 1$ – розімкнути контакти КА); b'' – змінна, що приймає значення $b'' = 1$ при самовільному відключенні КА через зниження напруги на котушці керування; b''' – змінна, що дорівнює логічній одиниці при наявності інших команд на відключення КА (наприклад, від максимального струмового захисту і т.і.).

З метою складання математичної моделі захисту мінімальної напруги контактора визначимо значення змінної b'' :

$$b'' = \text{sign}(1 - \text{sign}x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x > 0; \\ 1, & \text{якщо } x \leq 0, \end{cases} \quad (2.18)$$

де $x = U_1 - k_z U_{\phi n}$; U_1 – ефективне значення фазної напруги на вході контактора; $U_{\phi n}$ – номінальне значення фазної напруги; k_z – відносне значення напруги, при якому комутаційний апарат відключається захистом мінімальної напруги. Функція sign довільного аргументу d визначається наступним чином:

$$\text{sign}d = \begin{cases} 1, & \text{якщо } d > 0 \\ 0, & \text{якщо } d = 0. \\ -1, & \text{якщо } d < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Для врахування випадкового характеру самовільного відключення КА під час вибігу двигунів вводиться безперервна випадкова величина K_z , реалізації якої k_z визначають відносні значення напруги відключення комутаційного апарата. Параметри розподілення величини K_z : математичне очікування a , середнє квадратичне відхилення s . При моделюванні роботи декількох відгалужень у складі ЕТК ДШ, вважатимемо, що i -й комутаційний апарат характеризується своєю випадковою величиною K_{zi} . При цьому величини K_{zi} є однаково розподіленими (характеризуються однаковими параметрами a та s) та взаємно незалежними випадковими величинами.

Значення просторового вектора напруги на затискачах статора АД визначатимуться згідно залежності:

$$\bar{u}_s = \bar{i}R_s + L_s \cdot d\bar{i} / dt + L_m \cdot d\bar{i}_r / dt. \quad (2.20)$$

В разі з'єднання фаз двигуна у «трикутник», просторовий вектор, утворений з фазних напруг еквівалентної «зірки», обчислюється за залежністю, що аналогічна (2.14):

$$\bar{u}_{se} = \bar{u}_s / k_{cx}. \quad (2.21)$$

Отримані залежності (2.3) – (2.21) являють собою математичну модель (рис. 2.4) відгалуження “КА – ГК – АД”, що враховує стохастичне самовільне відключення КА при зниженні напруги керування.

Процеси у гнучкому кабелі та комутаційному апараті багатодвигунового відгалуження при кількості двигунів $m=1,2,3,\dots$ (рис. 2.5) описуються диференційним рівнянням (рис. 2.6):

$$\bar{u}_{se} = \bar{u}_{1e} - (R_{KA} + R_K)\bar{i}_e - L_K \cdot d\bar{i}_e / dt. \quad (2.22)$$

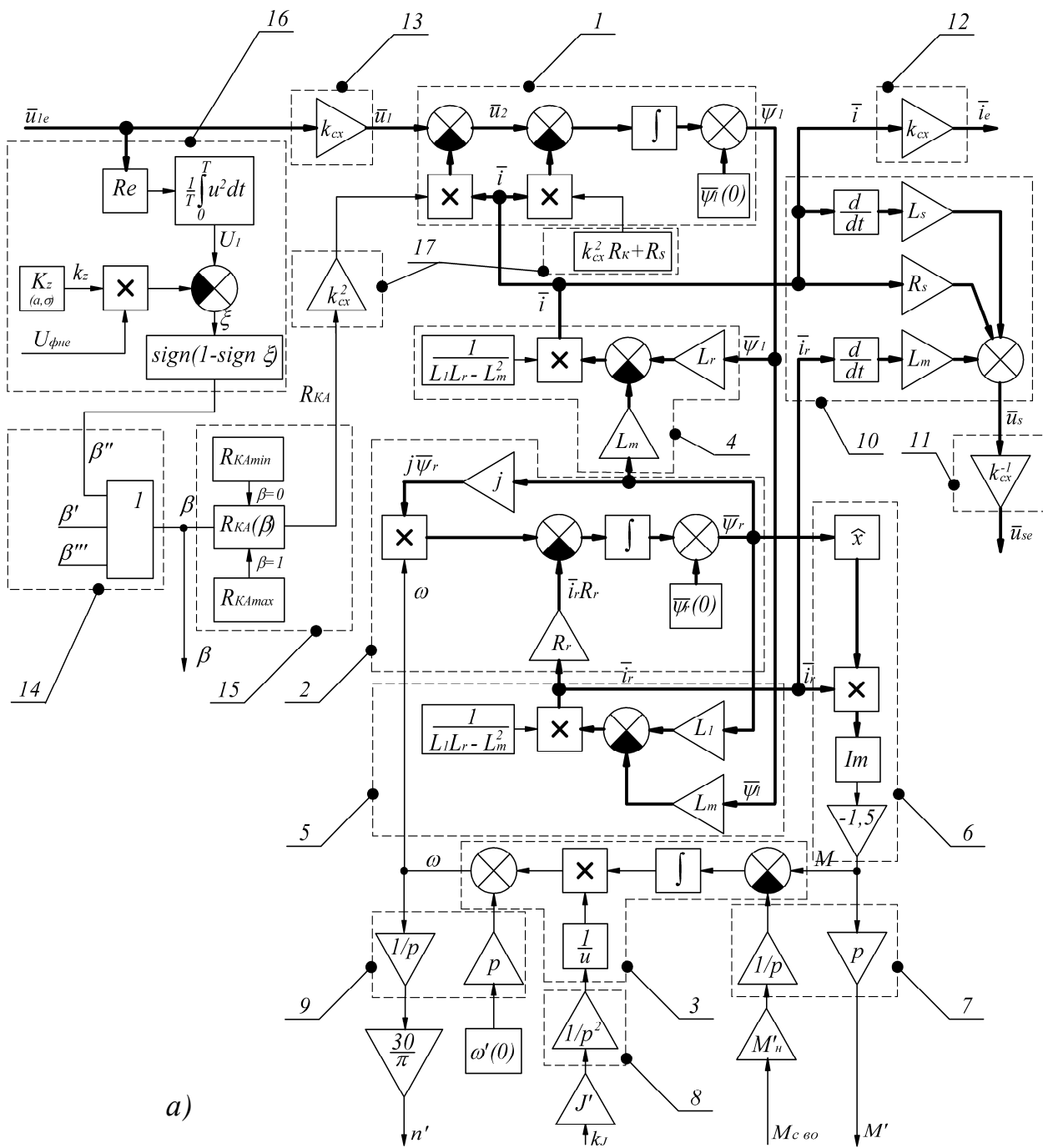


Рис. 2.4. Структурна схема математичної моделі відгалуження «КА – ГК – АД»: а – загальний вид; б – єдиним блоком; позиції 1–17 розшифровані в табл. А.1 (додаток А)

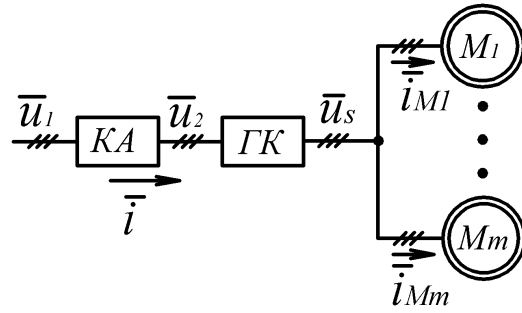


Рис. 2.5. Структурна схема відгалуження при живленні m двигунів через один гнучкий кабель

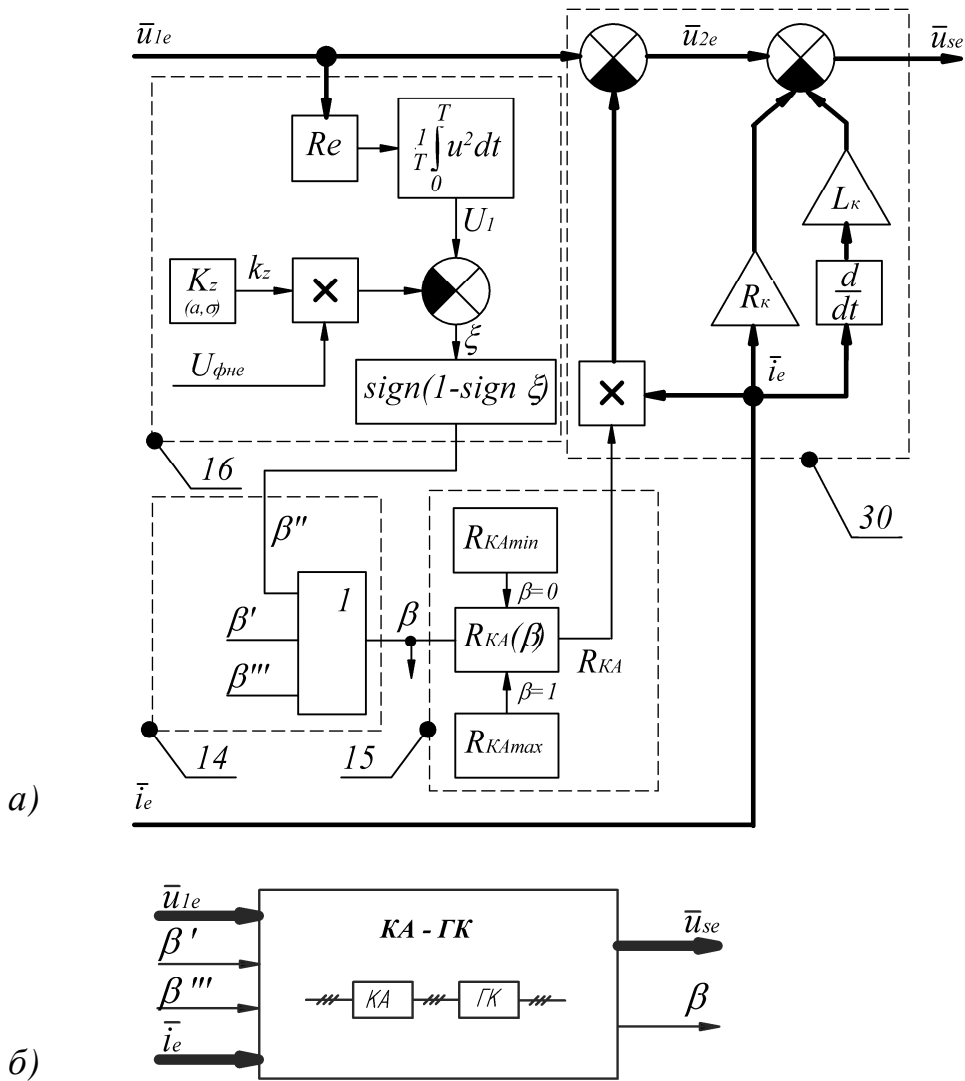


Рис. 2.6. Структурна схема математичної моделі комутаційного апарата та гнучкого кабеля відгалуження ЕТК ДШ з декількома двигунами: а – розгорнутий вид; б – єдиним блоком; позиції 14-16, 30 розшифровані в табл. А.1 (додаток А)

Кожний АД багатодвигунового відгалуження описується системою рівнянь [26]:

$$\begin{cases} \bar{y}_s = \int (\bar{u}_s - \bar{i}_M R_s) dt + \bar{y}_s(0); \\ \bar{y}_r = \int (jw\bar{y}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{y}_r(0); \\ w = \frac{1}{J} \int (M - M_c) dt + w(0), \end{cases} \quad (2.23)$$

де \bar{y}_s – просторовий вектор потокозчеплення статора двигуна.

Просторові вектори струму статора \bar{i}_s та ротора \bar{i}_r двигуна обчислюються за залежностями:

$$\bar{i}_M = (L_r \bar{y}_s - L_m \bar{y}_r) / (L_s L_r - L_m^2); \quad (2.24)$$

$$\bar{i}_r = (L_s \bar{y}_r - L_m \bar{y}_1) / (L_s L_r - L_m^2), \quad (2.25)$$

де $L_s = L_{sl} + L_m$.

Структурна схема моделі АД, що функціонує у складі багатодвигунового відгалуження, в основі якої лежать рівняння (2.23), наведена на рис. 2.7.

При складанні моделі багатодвигунового відгалуження слід враховувати перший закон Кірхгофа:

$$\bar{i}_{Me} = \sum_j \bar{i}_{Mej}. \quad (2.26)$$

Миттєві значення потужності асинхронної машини за відомими значеннями просторових векторів \bar{u}_{se} та \bar{i}_e можуть бути обчислені згідно залежності [26]:

$$p = p_A + p_B + p_C = 1,5 \operatorname{Re}[\bar{u}_{se} \cdot \hat{i}_e], \quad (2.27)$$

де p_A , p_B та p_C – миттєві значення потужностей фаз А, В та С відповідно; \hat{i}_e – комплексно–спряжений до \bar{i}_e вектор.

Якщо протягом довільного часового інтервалу $[t', t'']$ асинхронна машина функціонувала у руховому ($p > 0$) або генераторному ($p < 0$) режимі, то

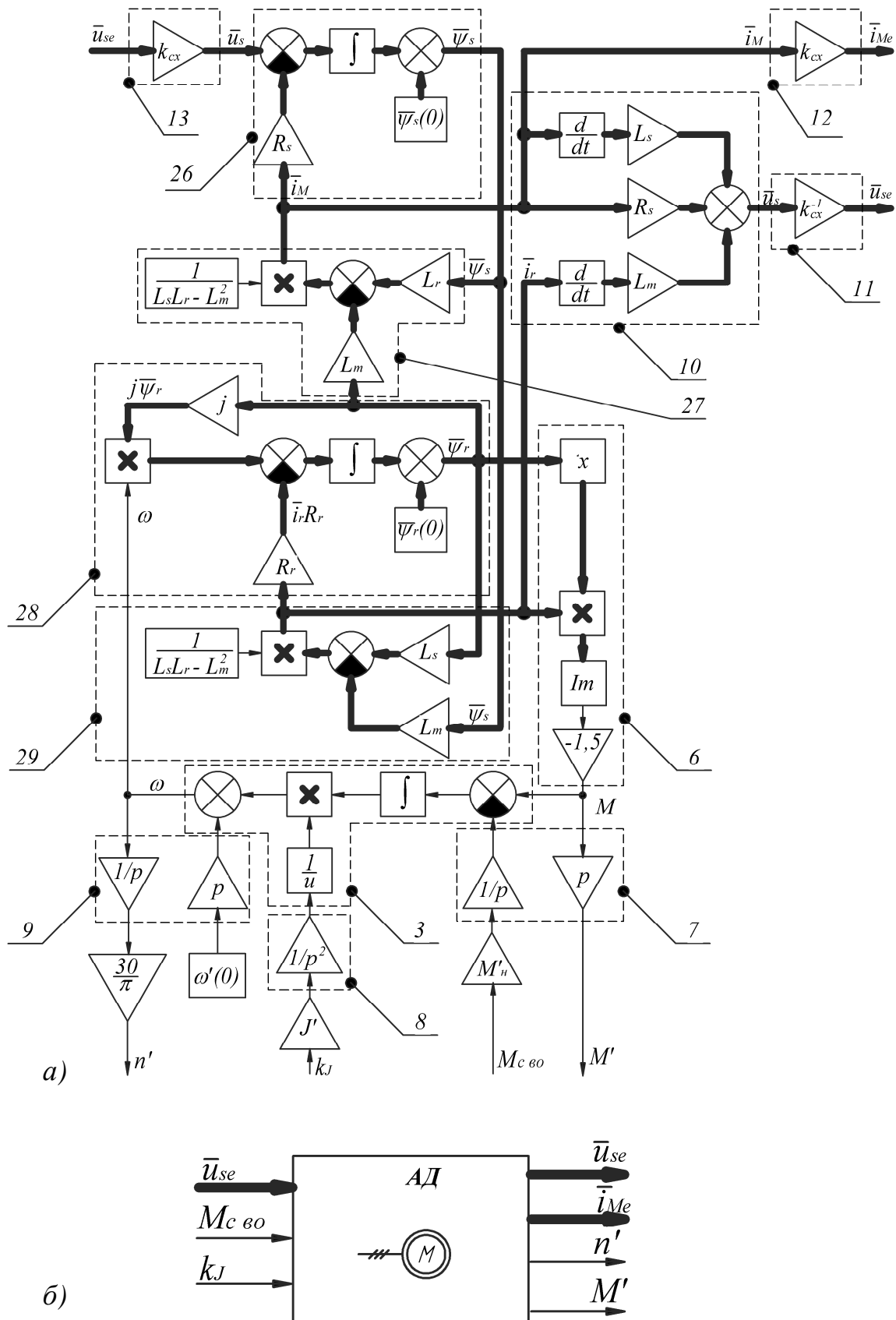


Рис. 2.7. Структурна схема математичної моделі асинхронного двигуна при функціонуванні у складі багатодвигунового відгалуження: а – розгорнутий вид; б – єдиним блоком; позиції розшифровані в табл. А.1 (додаток А)

енергія W , яку ця машина спожила ($W > 0$) або віддала ($W < 0$) на вказаному часовому інтервалі, може бути обчислена за відомою залежністю [26]:

$$W = \int_{t'}^{t''} p dt. \quad (2.28)$$

Якщо на часовому інтервалі $[t', t'']$ режим роботи машини змінюється (змінюється знак p), то обраховане за (2.28) значення W визначатиме різницю між абсолютними значеннями спожитої ($W_\partial > 0$) та відданої ($W_2 < 0$) енергій:

$$W = \int_{t'}^{t''} p dt = |W_\partial| - |W_2| = W_\partial + W_2. \quad (2.29)$$

Знак обрахованого за залежністю (2.29) значення W дозволить визначити той режим роботи, протягом якого була переміщена найбільша кількість енергії. Додатне значення $W > 0$ визначає $|W_\partial| > |W_2|$, тобто протягом рухового режиму роботи було передано більше енергії, аніж прийнято протягом функціонування машини в якості генератора. Від'ємне значення $W < 0$ визначає протилежну умову: $|W_\partial| < |W_2|$.

Для обчислення значень W_∂ та W_2 доцільно використовувати наступні залежності:

$$W_\partial = \int_{t'}^{t''} p q(p) dt; \quad (2.30)$$

$$W_2 = \int_{t'}^{t''} p q(-p) dt, \quad (2.31)$$

де $q(p) = \begin{cases} 1, & p \geq 0 \\ 0, & p < 0 \end{cases}$ – функція Хевісайда.

Коректність формул (2.30) та (2.31) може бути перевірена шляхом підстановки виразів для обчислень W_∂ та W_2 у (2.29) з урахуванням залежності $p[q(p) + q(-p)] = p$, яка випливає із визначення функції Хевісайда.

Обґрунтуємо математичну модель загальної частини мережі. На рис. 2.8 наведена схема заміщення загальної частини мережі “ТР–АВ–МК” без

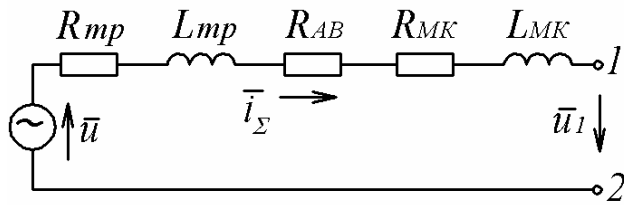


Рис. 2.8. Схема заміщення загальної частини мережі “ТР–АВ–МК”

урахування параметрів апарата захисного знеструмлення кола витoku струму на землю. На схемі прийняті наступні позначення: R_{mp} , L_{mp} – активний опір та індуктивність фази вторинної обмотки силового трансформатора; R_{MK} , L_{MK} – активний опір та індуктивність фази магістрального кабеля; R_{AB} – активний опір фази автоматичного вимикача.

Запишемо диференційне рівняння, що описує процеси у схемі заміщення, наведеній на рис. 2.8:

$$\bar{u}_1 = \bar{u} - (R_{mp} + R_{AB} + R_{MK})\bar{i}_\Sigma - (L_{mp} + L_{MK})\frac{d\bar{i}_\Sigma}{dt}. \quad (2.32)$$

Вважаючи, що на виході дільничного трансформатора є симетрична трифазна напруга прямої послідовності та сталої частоти, визначимо просторовий вектор \bar{u} наступною залежністю:

$$\bar{u} = \sqrt{2}U_\phi e^{j2\pi ft}, \quad (2.33)$$

де U_ϕ – ефективне значення фазної ЕРС, що наводиться у вторинній обмотці трансформатора, її значення не залежить від схеми з’єднання вторинних обмоток трансформатора; $f=50$ Гц – частота напруги мережі. В разі з’єднання вторинних обмоток дільничного трансформатора за схемою «зірка», нейтральна точка є ізольованою.

Комутації АВ приймаються ідеальними, тобто такими, що відбуваються за безкінечно малий проміжок часу за відсутності електричної дуги. Визначимо R_{AB} в функції стану автоматичного вимикача: припустимо,

що при замкнених його контактах $R_{AB} = R_{AB\min}$, а при розімкнених - $R_{AB} = R_{AB\max}$, тоді:

$$R_{AB} = \begin{cases} R_{AB\max}, & \text{якщо } a = 1; \\ R_{AB\min}, & \text{якщо } a = 0, \end{cases} \quad (2.34)$$

де a – змінна, що визначає стан контактів автоматичного вимикача: при $a = 1$ контакти АВ розімкнені, при $a = 0$ – замкнені.

Оскільки АВ може бути відключений різними шляхами, значення змінної a визначається за допомогою логічної операції «АБО» (оператор “ \vee ”):

$$a = a' \vee a'' \vee a''', \quad (2.35)$$

де a' – змінна, що визначає наявність команди обслуговуючого персоналу на відключення автоматичного вимикача ($a' = 1$ – розімкнуті контакти АВ); a'' – змінна, що приймає значення $a'' = 1$ при наявності команди від незалежного розчеплювача на відключення АВ; a''' – змінна, що дорівнює логічній одиниці при наявності інших команд на відключення автоматичного вимикача (наприклад, від максимального струмового розчеплювача, нульового розчеплювача напруги і т.і.).

Припущення про ідеальний характер відключення АВ (тобто про стрибкоподібну зміну опору R_{AB} з $R_{AB\min}$ до $R_{AB\max}$) передбачає стрибкоподібне зниження струму у загальній частині мережі. Однак, останнє суперечить першому закону комутації, згідно якого струм через індуктивність (в даному випадку – індуктивності L_{mp} та L_{MK}) не може змінюватися стрибкоподібно. Враховуючи це, приймемо, що з моменту відключення автоматичного вимикача індуктивності L_{mp} та L_{MK} перестають братися до уваги при аналізі процесів у системі. Таке припущення не призведе до огрублення параметрів моделі, оскільки після відключення АВ тільки параметри ізоляції магістрального кабеля впливають на стан кола витoku струму на землю.

Нехтування індуктивностями L_{mp} та L_{MK} після захисного відключення АВ передбачається врахувати введенням до рівняння (2.32) інверсної до a величини \bar{a} . Тоді вираз (2.32), з урахуванням (2.33), матиме вигляд:

$$\bar{u}_1 = \sqrt{2}U_{\phi} e^{j2pft} - (R_{mp} + R_{AB} + R_{MK}) \bar{i}_{\Sigma} - (L_{mp} + L_{MK}) \bar{a} \frac{d\bar{i}_{\Sigma}}{dt}. \quad (2.36)$$

Залежність (2.36) дійсна при з'єднанні вторинної обмотки трансформатора за схемою «зірка». В разі з'єднання вторинної обмотки у «трикутник», його параметри необхідно перерахувати на еквівалентне з'єднання «зіркою». Для цього вводиться схемний коефіцієнт k_{cx} , що визначається залежністю (2.3). З його урахуванням диференціальне рівняння (2.36), що описує процеси у загальній частині мережі буде мати вигляд:

$$\bar{u}_{1e} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi} e^{j2pft}}{k_{cx}} - \left(\frac{R_{mp}}{k_{cx}^2} + R_{AB} + R_{MK} \right) \bar{i}_{\Sigma e} - \left(\frac{L_{mp}}{k_{cx}^2} + L_{MK} \right) \bar{a} \frac{d\bar{i}_{\Sigma e}}{dt} \quad (2.37)$$

В разі виникнення витоку струму на землю АЗ сформує команду на відключення незалежного розчеплювача АВ, що може бути відображено зміною значення величини a'' . Значення вказаного параметра має формуватися моделлю АЗ.

З метою складання математичної моделі апарата захисту від витоків струму на землю обґрунтуємо функцію, що описує алгоритм його роботи:

$$a''_{ав.с.} = \begin{cases} 1, & R_g \leq R_g^*; \\ 0, & R_g > R_g^*, \end{cases} \quad (2.38)$$

де $a''_{ав.с.}$ – змінна, що визначає наявність аварійного стану в системі ($a''_{ав.с.}=0$ – аварійний стан відсутній; $a''_{ав.с.}=1$ – в системі наявний виток струму на землю); R_g – опір кола витоку (в разі відсутності витоку струму $R_g \rightarrow \infty$); R_g^* – гранично припустимий опір кола витоку струму на землю.

Час t , що витрачається апаратом захисту на ідентифікацію наявності аварійного стану та формування команди на відключення силового

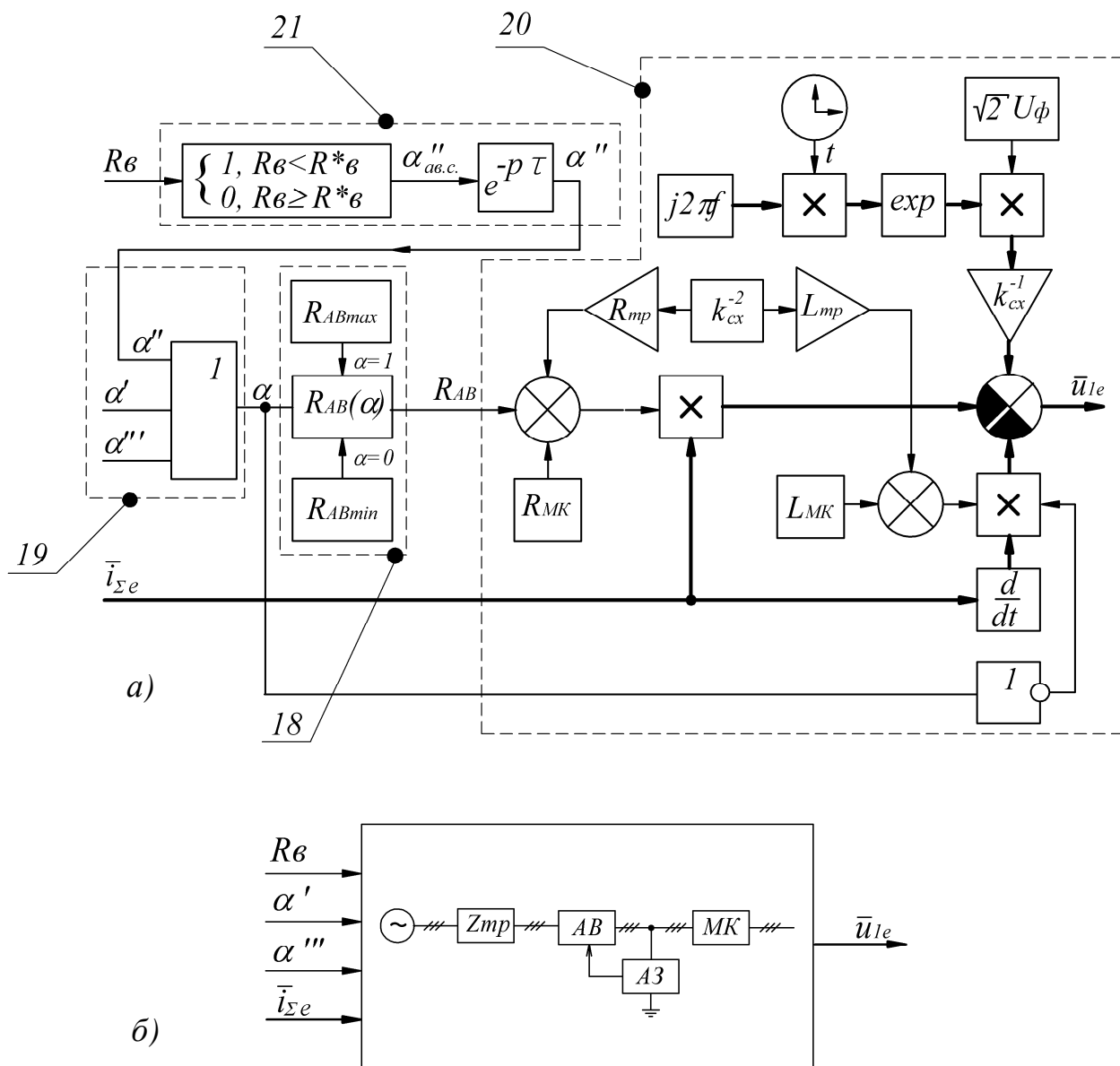


Рис. 2.9. Структурна схема моделі “TP–AB–MK”: а - розгорнутий вид; б - єдиним блоком, розшифрування позицій 18-21 подано в табл. А.1 (додаток А)

комутаційного апарату, може бути врахований шляхом введення до моделі АЗ ланки запізнення з передавальною функцією:

$$W(p) = e^{-pt} . \quad (2.39)$$

Значення запізнення t визначається згідно [4] та становить: для мереж напругою 660 В – не більше 0,1 с; для мереж 1140 В – не більше 0,07 с.

Тоді сигнал на відключення АВ a'' обраховується за залежністю:

$$a'' = e^{-pt} \cdot a''_{ав.с.} . \quad (2.40)$$

Наведені залежності (2.37) – (2.40) являють собою математичну модель загальної частини мережі “ТР – АВ – МК”, що враховує відключення системи автоматичним вимикачем в разі виникнення витоку струму на землю (рис. 2.9). Розшифрування позицій 18–21, що позначені на цьому рисунку, подано в таблиці А.1 (додаток А).

При формуванні моделі ЕТК ДШ враховано, що згідно першого закону Кірхгофа алгебраїчна сума струмів у відгалуженнях дорівнює струмові у загальній частині мережі, тобто виконується залежність:

$$\bar{i}_{\Sigma e} = \sum_{j=1}^n \bar{i}_{je} . \quad (2.41)$$

Обґрунтовані математичні моделі відгалужень та загальної частини мережі, а також співвідношення (2.41) дозволяють скласти структурну схему математичної моделі ЕТК ДШ, яка наведена на рис. 2.10.

2.2. Математична модель кола однофазного витоку струму на землю

При дослідженні стану кола однофазного витоку струму на землю використовується однофазна схема заміщення, наведена на рис. 2.11 [13], де позначено: u_{ϕ} - фазна напруга у місці витоку (в разі представлення всієї системи у вигляді трифазного джерела, з'єднаного у «зірку»); R_g – опір кола витоку; C_{i3} , R_{i3} – сукупна ємність та активний опір ізоляції трьох фаз мережі, що впливають на стан кола витоку струму на землю; $L_{\partial p}$ – індуктивність компенсуючого дроселя (активний опір дроселя нехтується); i_{∂} – струм витоку на землю. Джерелом напруги u_{ϕ} до моменту захисного відключення мережі є дільнична трансформаторна підстанція, а після цього моменту – згасаюча ЕРС обертання двигунів споживачів ЕТК [43].

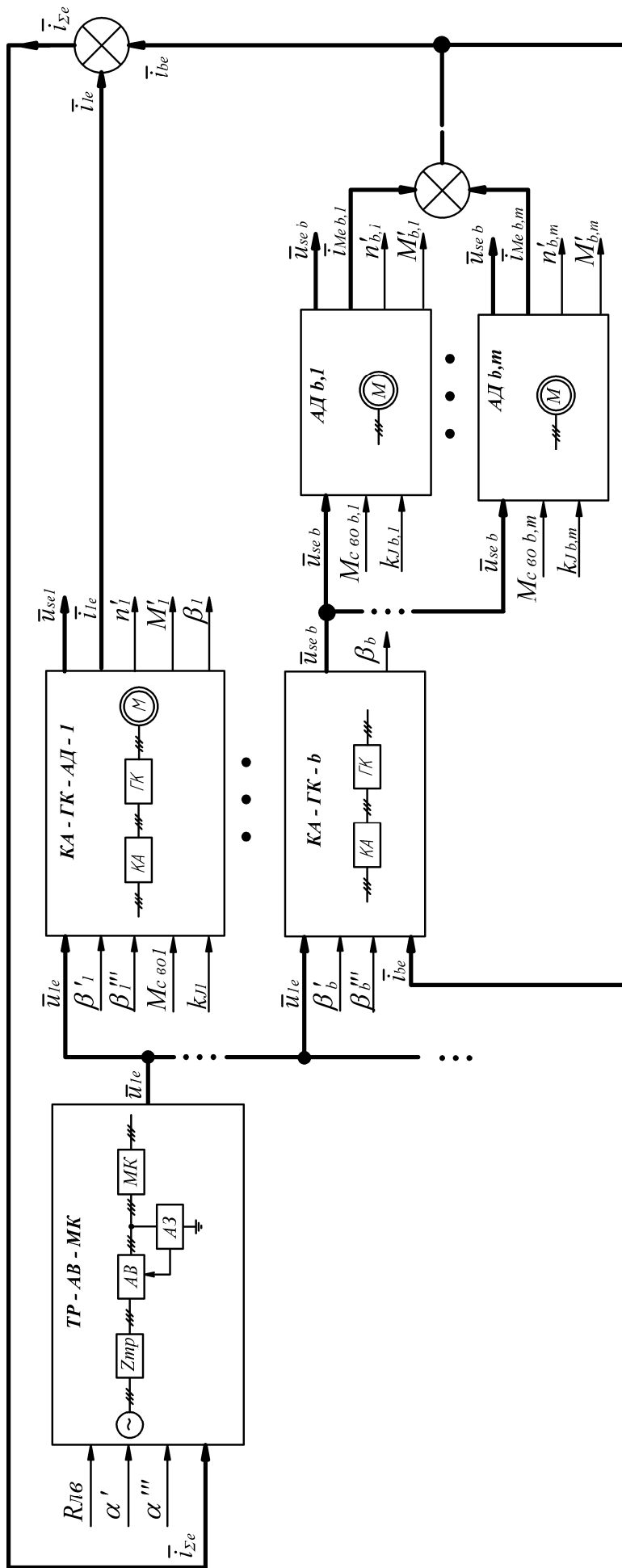


Рис. 2.10. Структурна схема моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти

Ємності та активні опори ізоляції фаз кабелів відносно землі приймаються симетричними. Міжфазні ємності кожного кабеля не враховуються. Опір кола однофазного витоку струму на землю R_g відповідає опору тіла людини за найгірших умов та складає 1 кОм (згідно ГОСТ 22929–78 [4]).

Сукупні параметри ізоляції трьох фаз мережі C_{i3} та R_{i3} визначені з урахуванням відповідних фазних величин наступними співвідношеннями:

$$C_{i3} = 3C_{i3\phi}; \quad R_{i3} = R_{i3\phi}/3, \quad (2.42)$$

де $C_{i3\phi}$, $R_{i3\phi}$ – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції фази кабелів, що мають електричний зв'язок із місцем виникнення витоку струму на землю.

В разі виникнення витоку на затискачах двигуна одного з відгалужень, напруга u_ϕ дорівнює фазній напрузі статора даного двигуна при з'єднанні обмоток у еквівалентну «зірку».

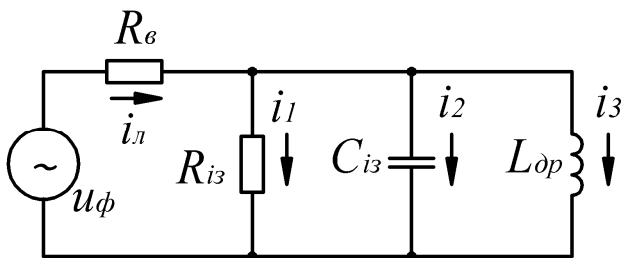


Рис. 2.11. Схема заміщення кола однофазного витоку струму

При цьому не враховується виникнення асиметрії напруг мережі через наявність однофазного витоку струму на землю, що дозволяє значно спростити аналіз процесів в системі, не призводячи до значних неточностей при розрахунках. Якщо виток струму стався у фазі А відгалуження, то $u_\phi = \text{Re}(\bar{u}_{se})$.

Враховуючи зміну конфігурації системи, що розглядається, під час вибігу двигунів через стохастичне самовільне відключення контакторів, значення $C_{i3\phi}$ та $R_{i3\phi}$ не лишатимуться сталими [44]. Обчислити вказані величини у довільний момент перебігу аварійної ситуації можна за допомогою виразів [42]:

$$C_{i3\phi} = \bar{b}_k \left(C'_{i3\phi} + \sum_{i=1}^n \bar{b}_i C''_{i3\phi i} \right) + b_k C''_{i3\phi k} = f(C'_{i3\phi}, \{C''_{i3\phi i}\}, \{b_i\}, k); \quad (2.43)$$

$$R_{i3\phi} = \left[\bar{b}_k \left(\frac{1}{R'_{i3\phi}} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{b}_i}{R''_{i3\phi i}} \right) + \frac{b_k}{R''_{i3\phi k}} \right]^{-1} = f(R'_{i3\phi}, \{R''_{i3\phi i}\}, \{b_i\}, k), \quad (2.44)$$

де символ \bar{b} позначає інверсоване значення змінної стану КА b (2.17); k – номер відгалуження, де стався виток струму на землю (приймає одно зі значень $i=1 \div n$, де n – загальна кількість відгалужень); $C'_{i3\phi}$, $R'_{i3\phi}$ – ємність та активний опір ізоляції фази магістрального кабеля, відповідно; $C''_{i3\phi i}$, $R''_{i3\phi i}$ – те ж саме – гнучкого кабеля i -го відгалуження ($i=1 \div n$); $\{C''_{i3\phi i}\}$, $\{R''_{i3\phi i}\}$ – вектори параметрів ізоляції гнучких кабелів; $\{b_i\}$ – вектор змінних стану комутаційних апаратів відгалужень системи.

Зв'язок між фактичними та питомими параметрами ізоляції кабеля з урахуванням довжини останнього можна встановити за допомогою залежностей:

$$C = \frac{l \cdot C_{i3\phi num}}{1000}, \quad (2.45)$$

$$R = \frac{1000 \cdot R_{i3\phi num}}{l}, \quad (2.46)$$

де C – ємність ізоляції фази кабеля, Ф; $C_{i3\phi num}$ – питома ємність ізоляції фази кабеля даного типу, Ф/км; R – активний опір ізоляції фази кабеля, Ом; $R_{i3\phi num}$ – питомий активний опір ізоляції фази кабеля даного типу, Ом·км; l – довжина кабеля, м.

Якість налаштування компенсуючого дроселя оцінюється коефіцієнтом розладу ν , значення якого рекомендується приймати в межах $\nu_{np1,2} = \pm 0,1$ при величині коефіцієнта втрат дроселя $p \leq 0,1$ [13]. З метою моделювання стохастичного характеру похибки налаштування компенсатора при реконфігурації мережі приймемо, що коефіцієнт розладу ν

є випадковою безперервною нормально розподіленою величиною з математичним очікуванням m , та стандартним відхиленням S_y .

Індуктивність компенсуючого дроселя обчислюється за залежністю:

$$L = \frac{1}{w^2 C_{i3} (1 - \nu)}, \quad (2.47)$$

де w – частота напруги в системі.

Приймається припущення про аперіодичний характер переналаштовування автокомпенсуючого дроселя при зміні ємності ізоляції мережі. Врахування цього процесу можливе аперіодичною ланкою першого порядку, на вхід якої подаватимуться миттєві значення індуктивності дроселя L (2.47), що змінюються стрибкоподібно зі зміною ємності ізоляції мережі, а на виході цієї ланки будуть присутні миттєві значення індуктивності реального дроселя L_{dp} :

$$W(p) = \frac{1}{T_{ак} p + 1}, \quad (2.48)$$

де p – оператор Лапласа; $T_{ак}$ – стала часу, що характеризує час переналаштовування автокомпенсатора. Значення останнього параметра не повинно перевищувати 0,1 с згідно ГОСТ 22929–78 [4]. Приймаючи, що за цей час індуктивність дроселя досягає 95% від усталеного значення, стала часу складає $T_{ак} = 0,1 / 3 = 0,033$ с.

Після відключення комутаційного апарата аварійного відгалуження компенсуючий дросель не впливає на стан кола витoku струму на землю, що може бути враховано введенням до математичної моделі кола витoku змінної стану КА аварійного відгалуження \bar{b}_k (при ввімкненому КА аварійного відгалуження $\bar{b}_k = 1$, при вимкненому $\bar{b}_k = 0$). З метою реалізації можливості дослідження стану системи без урахування пристрою компенсації вводиться логічна змінна $a_{ак}$, яка дорівнює одиниці при наявності в системі компенсатора, а при його відсутності $a_{ак} = 0$:

$$a_{ак} = \begin{cases} 0, & \text{компенсатор відсутній;} \\ 1, & \text{автокомпенсатор наявний.} \end{cases} \quad (2.49)$$

За нульових початкових умов та з урахуванням змінних $a_{ак}$ та \bar{b}_k процеси у схемі заміщення (рис. 2.11) описуються системою рівнянь, які складені на основі законів Кірхгофа (введено додаткову змінну i_4):

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{R_{i3} C_{i3}} \int i_2 dt; \\ i_2 = \frac{1}{R_\phi} (u_\phi - i_1 R_{i3}) - i_1 - i_3; \\ i_3 = a_{ак} \bar{b}_k \int i_4 dt; \\ i_4 = \frac{1}{L_{оп} C_{i3}} \int i_2 dt; \\ i_l = i_1 + i_2 + i_3. \end{cases} \quad (2.50)$$

Кількість електрики, що пройшла через опір кола однофазного витоку струму на землю за інтервал часу $[t', t'']$, обчислюється згідно залежності:

$$q = \int_{t'}^{t''} I_l dt, \quad (2.51)$$

де I_l – ефективне значення струму витоку.

Початком аварійного процесу вважається момент торкання людиною елемента електрообладнання, що знаходиться під напругою. Кінцем аварійного процесу вважається момент досягнення амплітудою ЕРС двигуна аварійного відгалуження 3% від початкового значення.

Структурна схема математичної моделі кола однофазного витоку струму на землю з урахуванням наявності пристрою автокомпенсації ємнісної складової струму витоку, що визначається виразами (2.42) – (2.51), наведена на рис. 2.12. До складу моделі пристрою автоматичної компенсації ємнісної складової струму витоку (позиція 23), окрім блоків для реалізації залежностей (2.47) та (2.48), входять блоки для виявлення момента реконфігурації мережі. Блок « $\frac{d}{dt} \sum b_i$ », обчислюючи похідну за часом від суми логічних змінних стану комутаційних апаратів відгалужень, формує на

виході імпульс при кожній зміні параметрів ізоляції мережі. За кожним імпульсом блок «G_n» видає нову реалізацію коефіцієнта розладу ν , яка надходить до блоку обчислення величини індуктивності дроселя L за виразом (2.47), що дозволяє враховувати стохастичний характер похибки автоматичного налаштування компенсатора при зміні конфігурації системи.

Вплив на величину кількості електрики через опір кола витoku на землю з боку факторів, що змінюються випадково, визначає її імовірнісний характер. Позначивши сукупність реалізацій випадкової величини кількості електрики Q та припустивши нормальне розподілення даної величини, обґрунтуємо критерій оцінки потенційної електронебезпеки ЕТК ДШ конкретної конфігурації. В якості критерія оберемо імовірність того, що в конкретних умовах випадкова величина Q прийме значення, яке перевищує граничну величину $Q_{нрпн} = 50$ мА·с [4], тобто імовірність $P(Q > Q_{нрпн})$. Висновок про те, чи становить конкретна конфігурація системи потенційну небезпеку електроураження людини в разі виникнення аварійної ситуації, може бути зроблений на основі порівняння обрахованого значення імовірності $P(Q > Q_{нрпн})$ із прийнятим граничним значенням $P_{зр}$ [45]. Величина $P_{зр}$ визначає максимально припустиму імовірність перевищення нормованого значення загальної кількості електрики через опір кола витoku за час аварійного процесу.

В разі виконання нерівності

$$P(Q > Q_{нрпн}) \leq P_{зр} \quad (2.52)$$

дільничний електротехнічний комплекс вважається таким, що не становить потенційної небезпеки. ЕТК ДШ вважається потенційно електронебезпечним при виконанні умови:

$$P(Q > Q_{нрпн}) > P_{зр}. \quad (2.53)$$

Запропонований критерій споріднений традиційним критеріям оцінки ефективності засобів вибухо– та іскробезпеки рудникового

електрообладнання [13]. При обґрунтуванні значення P_{zp} слід мати на увазі наступне. При оцінці вибухобезпеки засобів фланцевого захисту їх ефективність вважається достатньою, якщо імовірність вибуху метано–повітряної суміші під час випробувань не перевищує 10^{-3} , а при оцінці іскробезпеки електрообладнання, призначеного для роботи у загазованій виробці, – якщо імовірність вибуху під час випробувань не перевищує 10^{-8} . ГОСТ 12.1.010–76 [46] в якості критерія вибухобезпеки встановлює вірогідність виникнення вибуху на будь–якій ділянці протягом року не більше 10^{-6} . Враховуючи наведені дані, встановимо граничне значення критерія $P_{zp}=10^{-6}$: ЕТК ДШ буде вважатися таким, що не є потенційно електронебезпечним, якщо на 10^7 нещасних випадків в 10 або менше випадках буде перевищено граничну величину $Q_{нрпн}$.

За умови відомих вибірових характеристик розподілення величини Q імовірність $P(Q > Q_{нрпн})$ може бути обрахована за залежністю:

$$P(Q > Q_{нрпн}) = 0,5 - \Phi\left(\frac{Q_{нрпн} - \bar{Q}}{s}\right), \quad (2.54)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz$ – функція Лапласа, [47]; \bar{Q} , s – відповідно,

вибіркові значення математичного очікування та середнього квадратичного відхилення загальної кількості електрики через опір тіла людини за термін існування аварійного процесу.

Таким чином, з метою дослідження процесів в електротехнічному комплексі дільниці шахти при однофазному витоку струму на землю, базуючись на відомих наукових дослідженнях, обґрунтована математична модель, яка враховує вплив на стан аварійної точки конфігурації мережі, параметрів та режимів функціонування елементів ЕТК (рис. 2.13).

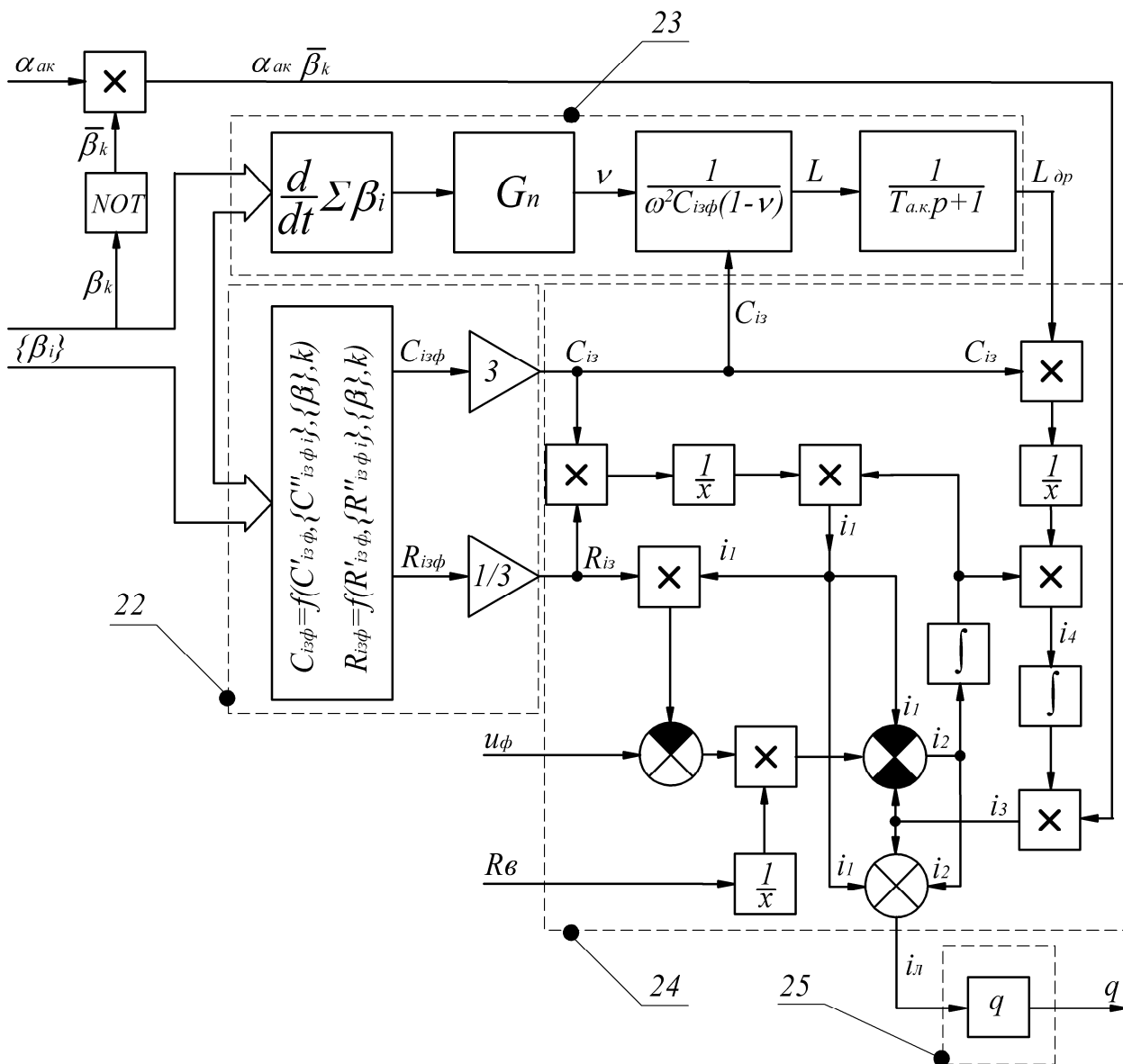


Рис. 2.12. Модель кола витоку струму на землю; позиції 22–25 розшифровані в табл. А.1 (додаток А)

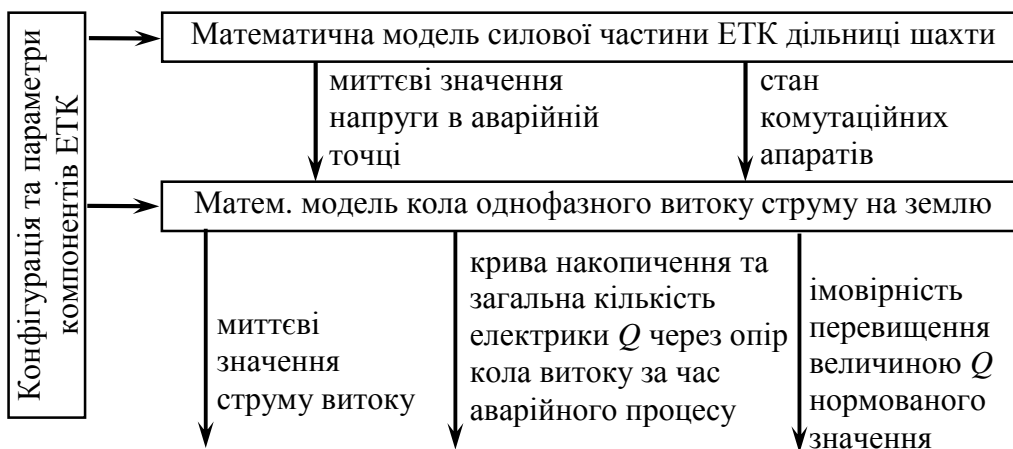


Рис. 2.13. Узагальнена схема математичного моделювання процесів в електротехнічному комплексі дільниці шахти при однофазному витоку струму на землю

3 ВПЛИВ ЗВОРТНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ШАХТНИХ ДІЛЬНИЧНИХ МЕРЕЖ

3.1 Моделювання та аналіз процесів у дільничному ЕТК при однофазному витокі струму на землю

Торкання людиною фази електромережі ідентифікується як утворення кола витокі струму на землю з активним опором $R_g = 1 \text{ кОм}$. В цьому разі дослідження стану кола витокі на землю доцільно робити шляхом моделювання процесів в мережі реальної вугледобувної дільниці. Розглянемо схему типового електротехнічного комплексу дільниці шахти напругою живлення 660 В [48], що наведена на рис. 3.1. Електроспоживачі дільниці живляться від двох дільничних трансформаторних підстанцій КТПВ–630/6–0,69 (ДТП1 та ДТП2). Комбайн ГШ–500 (з двома двигунами різання ЭКВ4–250, двома двигунами ЭКВ2,5–30 для механізму подачі та одним двигуном потужністю 4 кВт для систем гідроприводу) живиться через два паралельні кабелі КГЭШ 3x95 від ДТП1. Від ДТП2 живляться: скребковий конвеєр СПЦ–230, дві насосні станції СНТ–32, кріплення «Глінік» та лебідка ЛГКН.

Моделюватиметься частина ЕТК даної дільниці, що живиться від ДТП2 (рис. 3.2), параметри елементів наведені у табл. 3.1. Витік струму на землю через коло опором $R_g = 1 \text{ кОм}$ виникає на затискачах статора двигуна М1 першого відгалуження. Структурна схема комп'ютерної моделі, що відповідає обґрунтованій математичній моделі для випадку семи відгалужень ($n = 7$), наведена на рис. А.1 у додатку А. Структурні схеми підсистем цієї комп'ютерної моделі наведені у додатку А на рис. А.2 та А.3, відповідно.

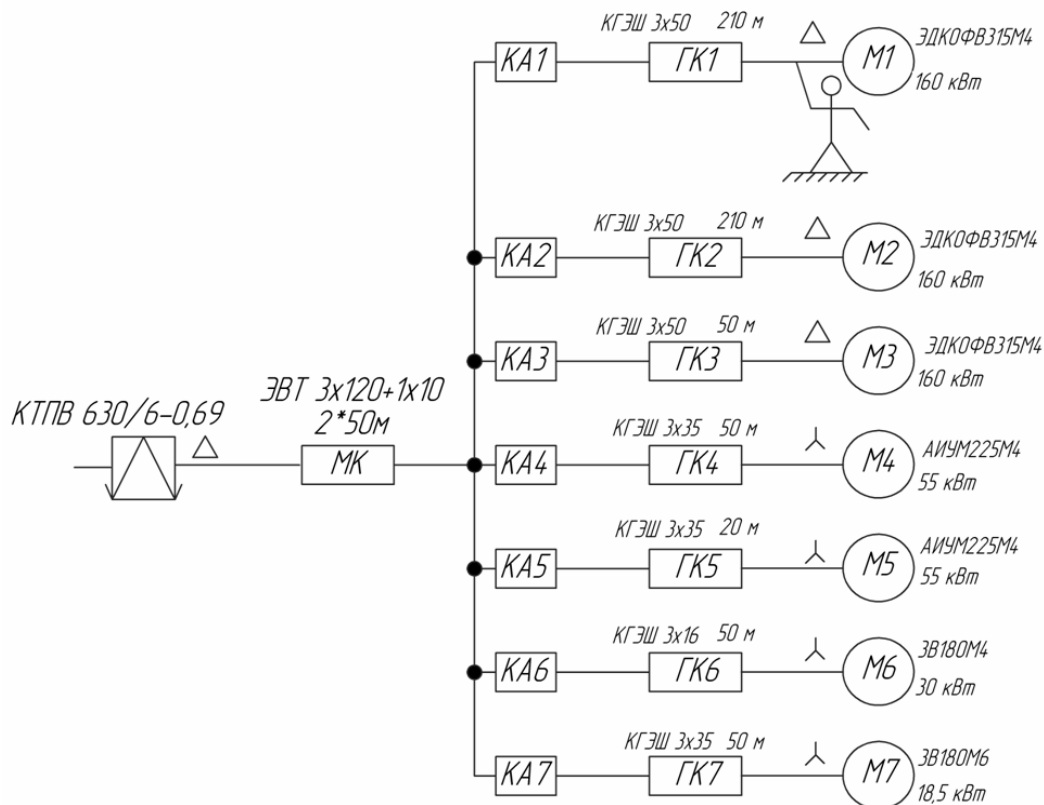


Рис. 3.2. Схема ЕТК ДШ напругою 660 В, прийнята для моделювання

Комп'ютерна модель кола однофазного витоку струму на землю наведена на рис. А.4 (додаток А). При цьому залежності (2.43) та (2.44) реалізовані спеціальною підсистемою (додаток А, рис. А.5). Імовірність $P(Q > Q_{nrun})$ оцінювалася за допомогою наведеної на рис. А.6 (додаток А) моделі. Дані схем заміщення АД обраховані за їх технічними характеристиками (додаток А, табл. А.2) згідно методики [29]. Параметри комп'ютерних моделей (додаток А, табл. А.3–А.5) задавалися за допомогою діалогових вікон (додаток А, рис. А.7).

В подальшому на діаграмах прийняті наступні позначення: t_1 – момент виникнення однофазного витоку струму на землю в колі двигуна першого відгалуження ЕТК ДШ; t_2 – момент захисного відключення АВ; t_3 – момент самовільного відключення КА аварійного відгалуження; t_4 – момент затухання ЕРС двигуна аварійного відгалуження, визначається за

досягненням амплітудою ЕРС обертання 3% від початкового значення; t_{KA1} , ..., t_{KA7} – моменти самовільного відключення КА відгалужень системи. В даному випадку аварійним є відгалуження №1, тому $t_{KA1} = t_3$.

Моделювання витоку струму на землю в ЕТК проводилося за різних режимів функціонування КА відгалужень (табл. 3.2).

Таблиця 3.1

Характеристика елементів ЕТК ДШ напругою 660 В

№ відгалуження	Двигун		Гнучкий кабель		Машина, механізм
	Тип	Потужність, кВт	Тип	Довжина, м	
1	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	210	конвеєр СПЦ–230
2	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	210	
3	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	50	
4	АИУМ225М4	55	КГЭШ 3х35	50	насосна станція СНТ–32
5	АИУМ225М4	55	КГЭШ 3х35	20	насосна станція СНТ–32
6	ЗВ180М4	30	КГЭШ 3х16	50	кріплення «Глінік»
7	ЗВ180М6	18,5	КГЭШ 3х35	50	лебідка ЛКГН

Таблиця 3.2

Прийняті для моделювання режими функціонування КА відгалужень протягом аварійного режиму в ЕТК ДШ напругою 660 В

№	Режим функціонування КА відгалужень під час аварійного режиму	Параметри розподілення відносних значень напруг самовільного відключення КА відгалужень		
		a , в.о.	S , в.о.	
1	Відключаються одночасно з АВ	самовільне відключення не відбувається		
2	Постійно ввімкнені			
3	Відключаються при досягненні напруги 0,5 номінального рівня	0,5	0	
4	Стохастичне самовільне відключення	КА1	0,3	0,06
		КА2	0,7	
		КА3	0,4	
		КА4	0,5	
		КА5	0,4	
		КА6	0,6	
		КА7	0,3	

Режим одиночного вибігу двигунів споживачів ЕТК ДШ після захисного відключення напруги живлення обумовлюється примусовим відключенням, одночасно із автоматичним вимикачем, КА всіх відгалужень мережі. Порухення електричного зв'язку між двигунами обумовлює відсутність зрівнювальних струмів у відгалуженнях. Характер затухання зворотної ЕРС АД кожного відгалуження та зниження частоти обертання його ротора визначаються параметрами даного двигуна та умовами його вибігу (рис. 3.3) [36; 49]. Ідентичність двигунів відгалужень № 1–3 (ЭДКОФВ315М4) та № 4, 5 (АИУМ225М4) визначають співпадання кривих зворотних ЕРС та частот обертання роторів даних АД.

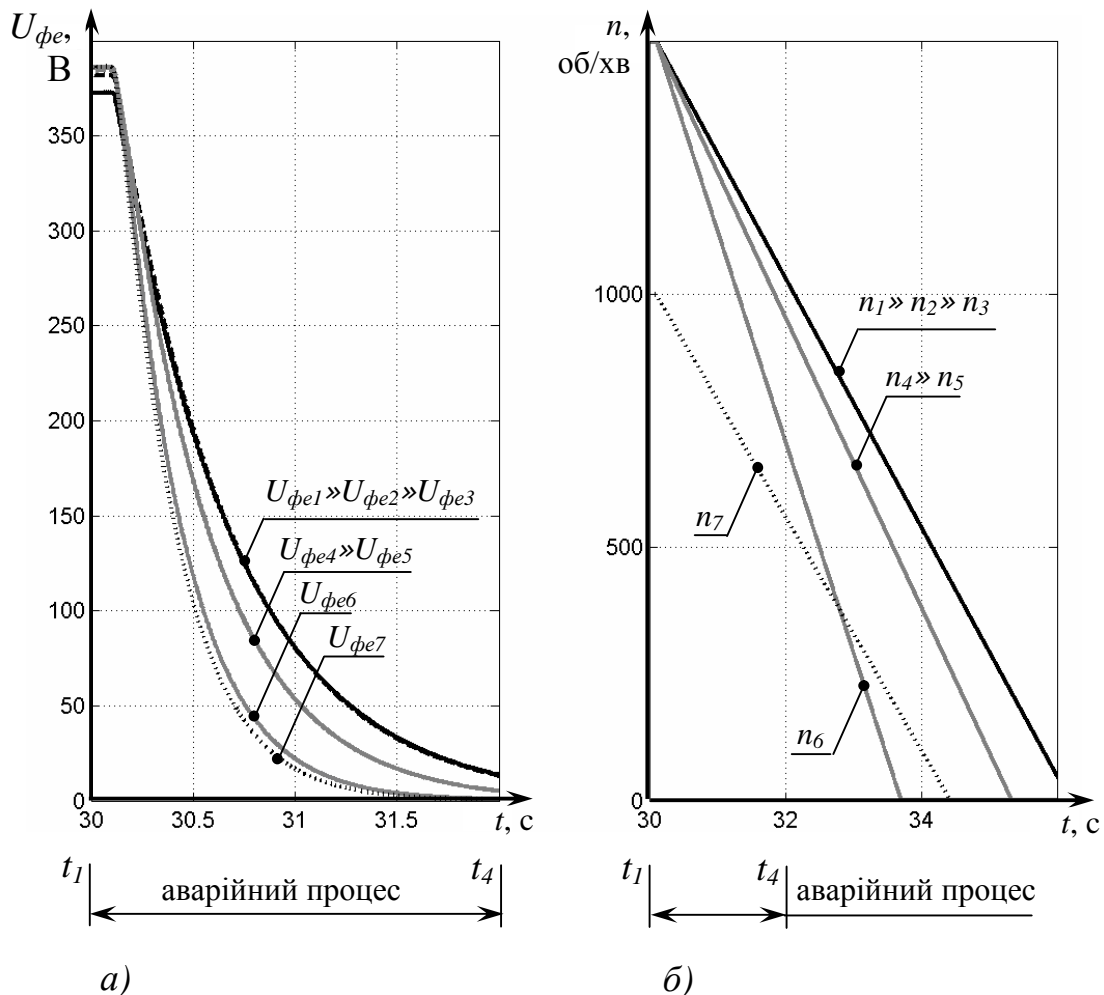


Рис. 3.3. Діаграми ефективних значень фазних ЕРС вибігу (а) та частот обертання роторів (б) двигунів споживачів ЕТК ДШ напругою 660 В в режимі одиночного вибігу

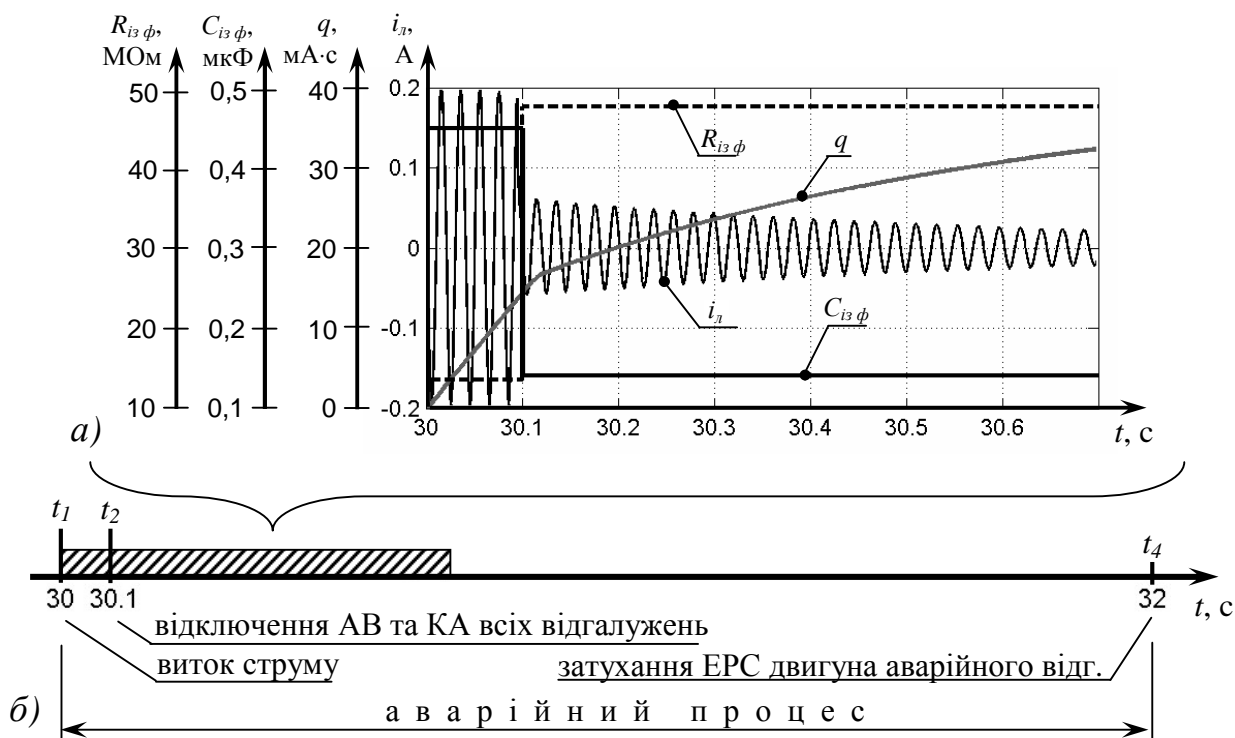


Рис. 3.4. Діаграми, отримані в результаті моделювання аварійного процесу в ЕТК ДШ напругою 660 В при відключенні КА відгалужень одночасно з автоматичним вимикачем: *a* – струм однофазного витоку на землю i_n , крива накопичення кількості електрики через опір аварійної точки q , ємність $C_{iz\phi}$ та активний опір $R_{iz\phi}$ ізоляції фази кабельної мережі; *б* – вісь для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), що зображений на діаграмі *a*; компенсація ємнісної складової струму витоку відсутня

До моменту t_2 захисного відключення АВ за відсутності компенсації ємнісної складової струму витоку на землю стан аварійної точки визначається напругою живлення та параметрами ізоляції кабельної мережі ЕТК ДШ. Після одночасного із АВ відключення КА всіх відгалужень стан кола витоку визначають зворотна ЕРС двигуна аварійного відгалуження та параметри ізоляції його гнучкого кабеля (рис. 3.4). Це обумовлює зміну амплітудних значень струму витоку на землю i_n та, відповідно, характеру накопичення значень кількості електрики q , що пройшла через опір аварійної точки від початку аварійного процесу до поточного моменту.

Якщо комутаційні апарати відгалужень лишаються ввімкненими протягом перебігу аварійного процесу, реалізуються умови для групового вибігу двигунів. Двигуни лишаються електрично з'єднаними протягом

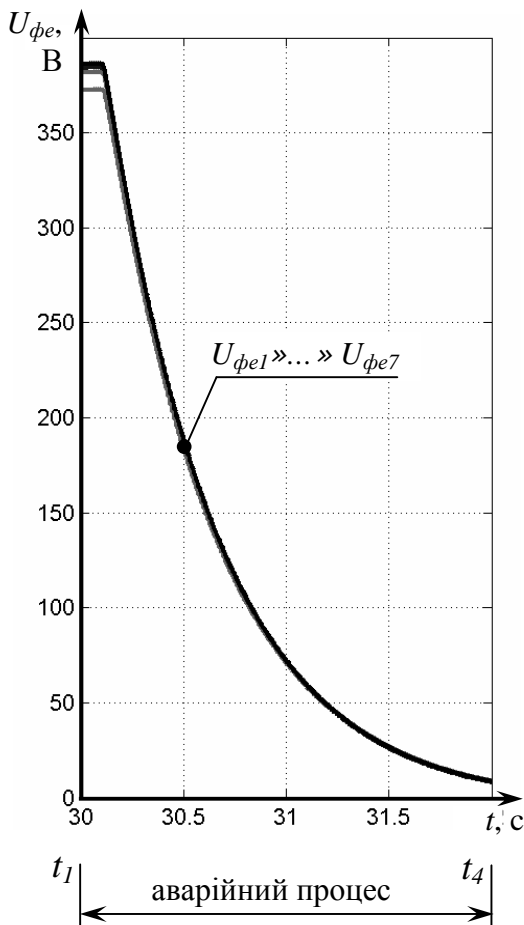


Рис. 3.5. Діаграма ефективних значень зворотної фазної ЕРС при груповому вибігу двигунів споживачів ЕТК ДШ напругою 660 В

вибігу, загальна частина мережі зрівнює зворотні ЕРС двигунів (рис. 3.5), у відгалуженнях протікають зрівнювальні струми (рис. 3.6). Через незначні величини останніх падінням напруги в гнучких кабелях можна нехтувати [42].

Фази зрівнювальних струмів відгалужень не є однаковими через неможливість порушення першого закону Кірхгофа для загальної частини мережі. Це, при однакових фазних співвідношеннях зворотних ЕРС двигунів, визначає функціонування деяких АД у двигуновому, а інших – у генераторному режимах [50; 51]. Діаграми електромагнітних моментів та миттєвих значень потужності двигунів під час групового вибігу (рис. 3.7) свідчать, що після захисного відключення АВ двигуни відгалужень № 4–7 функціонують в двигуновому режимі, споживаючи енергію,

яку віддають АД відгалужень № 1–3, що перейшли у генераторний режим.

Стан кола однофазного витоку струму на землю визначається ЕРС групового вибігу двигунів та (через незмінність конфігурації ЕТК ДШ) параметрами ізоляції кабельної мережі (рис. 3.8).

Однчасне самовільне відключення КА всіх відгалужень при зниженні напруги у загальній частині мережі до 0,5 номінального рівня визначає знаходження двигунів відгалужень у режимі групового вибігу протягом ввімкненого стану комутаційних апаратів, тобто на інтервалі $[t_2, t_3]$ (рис. 3.9). Між двигунами протікають зрівнювальні струми, у загальній частині мережі формується ЕРС групового вибігу.

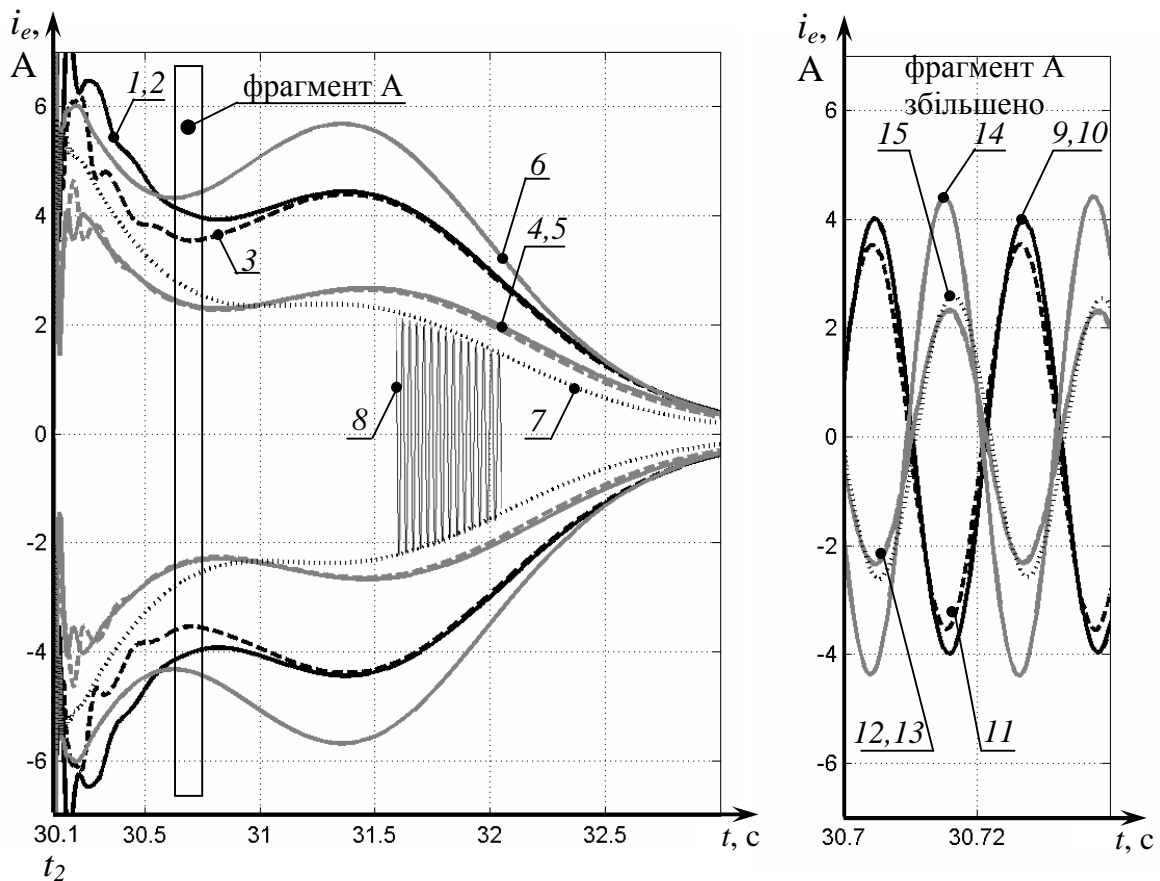


Рис. 3.6. Діаграми зрівнювальних струмів у відгалуженнях під час групового вибігу двигунів: 1-7 – огинаючі амплітуд миттєвих значень зрівнювальних струмів відгалужень i_{1e} - i_{7e} відповідно у додатній та від'ємній напівпрощинах; 8 – фрагмент діаграми миттєвих значень струму сьомого відгалуження i_{7e} ; 9-15 – миттєві значення зрівнювальних струмів відгалужень i_{1e} - i_{7e} , відповідно

Після самовільного відключення всіх відгалужень двигуни переходять до режиму одиночного вибігу. Зворотна ЕРС кожного АД визначається його параметрами та умовами вибігу. Струм однофазного витoku на землю при даному режимі функціонування КА відгалужень підтримується (рис. 3.10): від початку аварійного процесу (момент t_1) до захисного відключення АВ (момент t_2) – напругою мережі; після моменту t_2 до відключення КА відгалужень (t_3) – ЕРС групового вибігу двигунів; під час одиночного вибігу двигуна аварійного відгалуження – його ЕРС обертання. Зміна конфігурації мережі у момент самовільного відключення КА відгалужень спричиняє стрибкоподібну зміну параметрів ізоляції кабельної мережі, які визначають

стан аварійної точки. Зміна у момент t_3 впливаючої на стан аварійної точки ЕРС обертання та реконфігурація мережі призводить до зміни характеру затухання струму виток на землю.

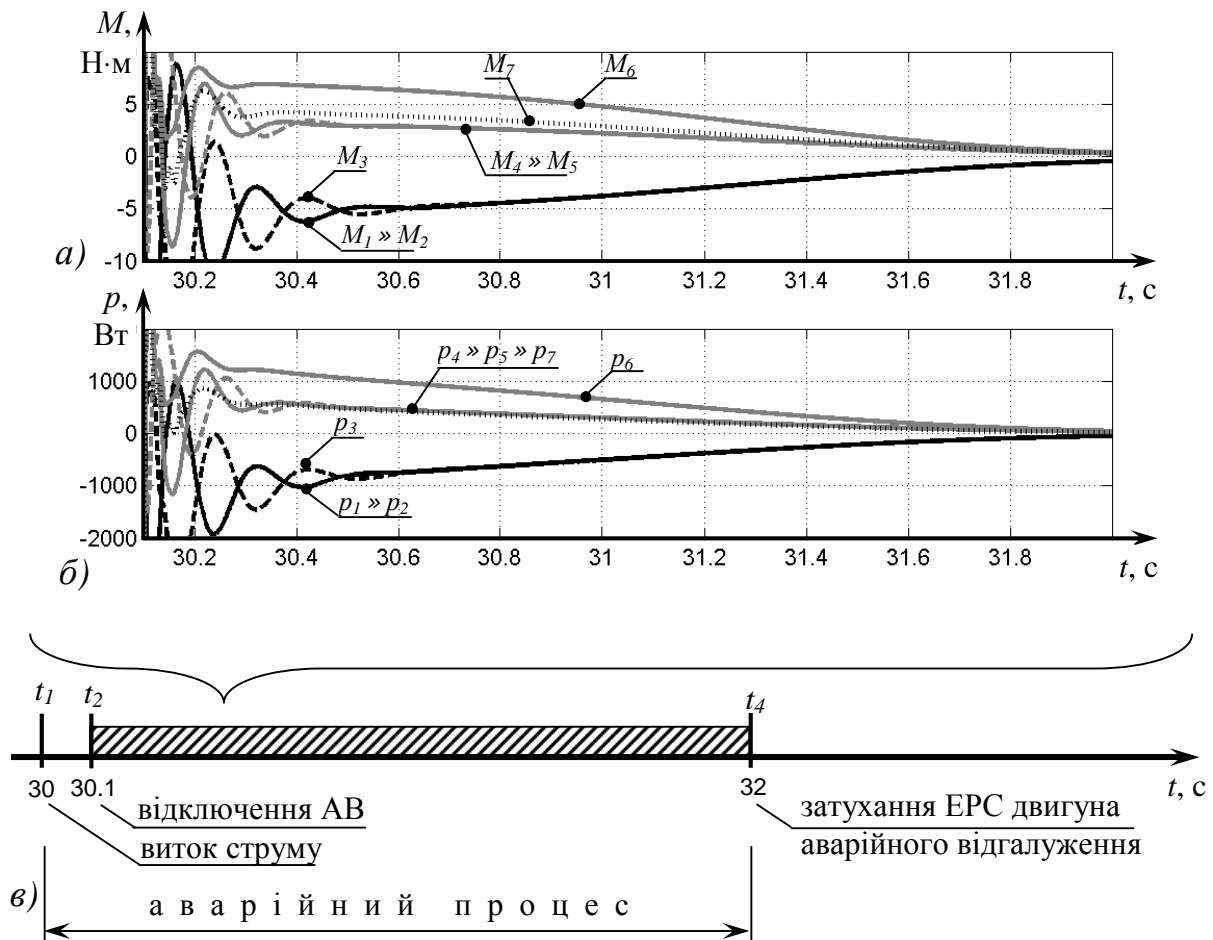


Рис. 3.7. Діаграми електромагнітних моментів (а) та миттєвих значень потужності (б) двигунів ЕТК ДШ напругою 660 В під час групового вибігу; вісь (в) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), що відображений на діаграмах а та б

Комп'ютерне моделювання аварійного процесу при відсутності в системі пристрою компенсації ємнісної складової струму виток на землю та при стохастичному характеру самовільного відключення КА відгалужень підтверджує, що від моменту t_1 виникнення кола виток через опір $R_{\Gamma}=1$ кОм до моменту t_2 захисного відключення АВ струм виток на землю підтримується напругою мережі та визначається сукупними параметрами ізоляції магістрального та гнучких кабелів. Кількість електрики, що пройшла

через опір кола виток протягом вказаного інтервалу, складає 14,3 мА·с (рис. 3.11, б).

Після захисного відключення мережі, двигуни переходять до режиму групового вибігу, який характеризується наявністю у системі групової ЕРС обертання (рис. 3.12; 3.13, а), яка підтримує струм виток (рис. 3.11, б). Через відмінність параметрів, двигуни обмінюються потужностями (рис. 3.14, а), що супроводжується протіканням зрівнювальних струмів у відгалуженнях та наявністю електромагнітних моментів АД (рис. 3.13, а) [50]. Зниження частот обертання роторів двигунів визначається, головним чином, характером навантаження (рис. 3.15).

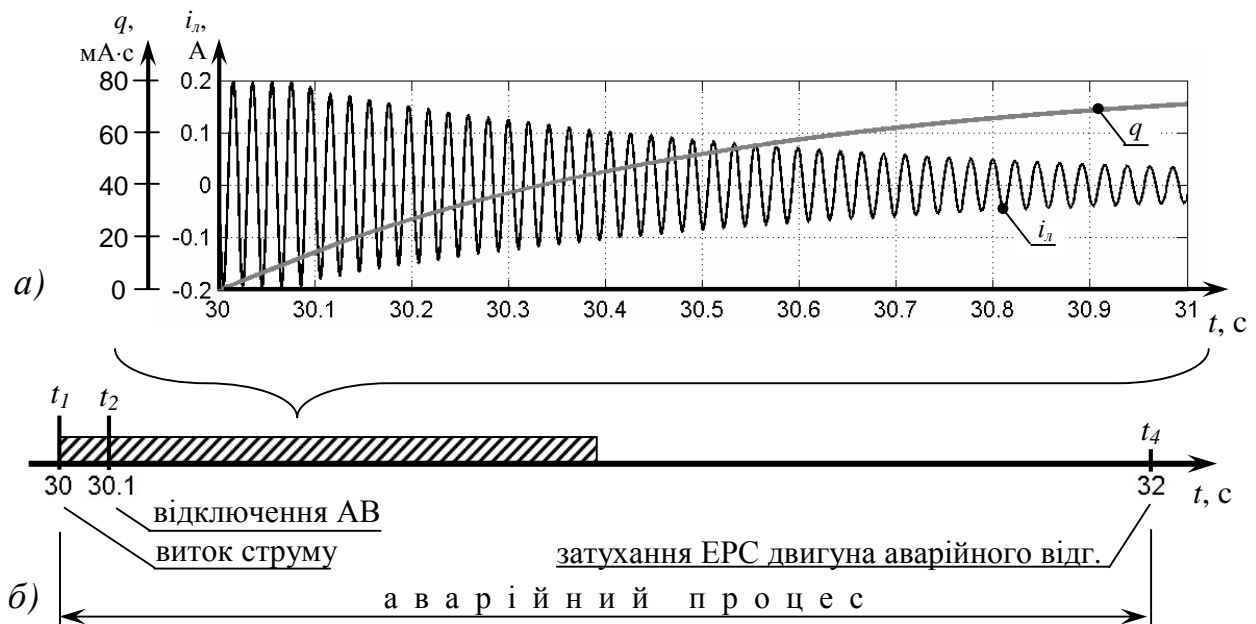


Рис. 3.8. Діаграми миттєвих значень струму виток на землю i_n та кількості електрики q через опір аварійної точки (а) у мережі напругою 660 В за умови постійно ввімкненого стану КА відгалужень та при відсутності компенсації ємнісної складової струму виток на землю; вісь (б) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображають

Експоненціальне затухання групової ЕРС двигунів (рис. 3.12) призводить до зменшення напруги на котушках керування комутаційних апаратів відгалужень, що стає причиною самовільного відключення останніх (табл. 3.2; рис. 3.11, а).

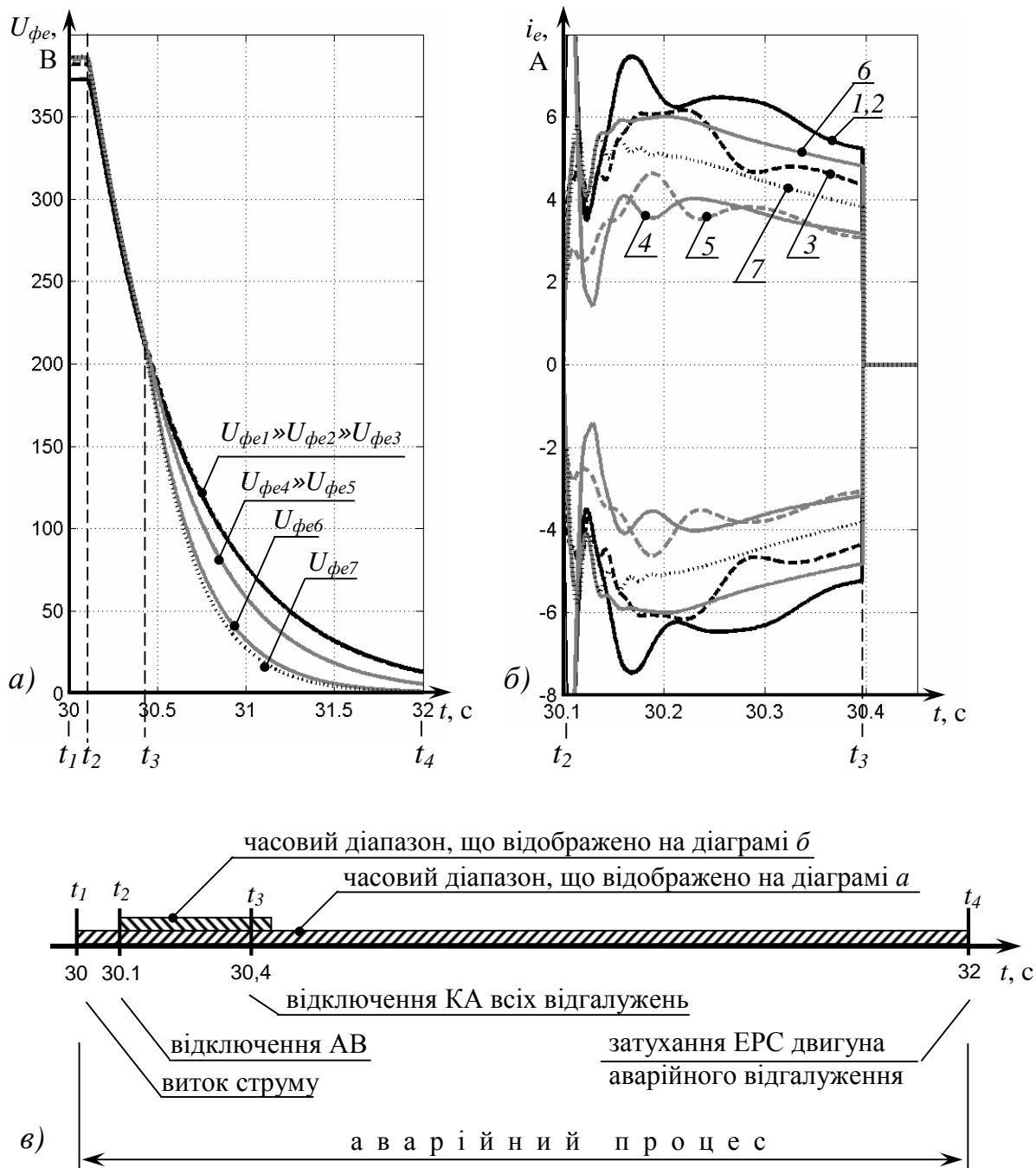


Рис. 3.9. Діаграми ефективних значень зворотніх ЕРС двигунів $U_{\phi e1} - U_{\phi e7}$ (а, фазні величини) та огинаючих амплітуд миттєвих значень зрівнювальних струмів відгалужень (б, позначення 1-7 відповідають номеру відгалуження) під час аварійного процесу в ЕТК ДШ напругою 660 В при відключенні КА відгалужень в момент зниження напруги в мережі до 50% від номінального рівня; вісь (в) для ілюстрації часових діапазонів, що зображені на діаграмах а та б

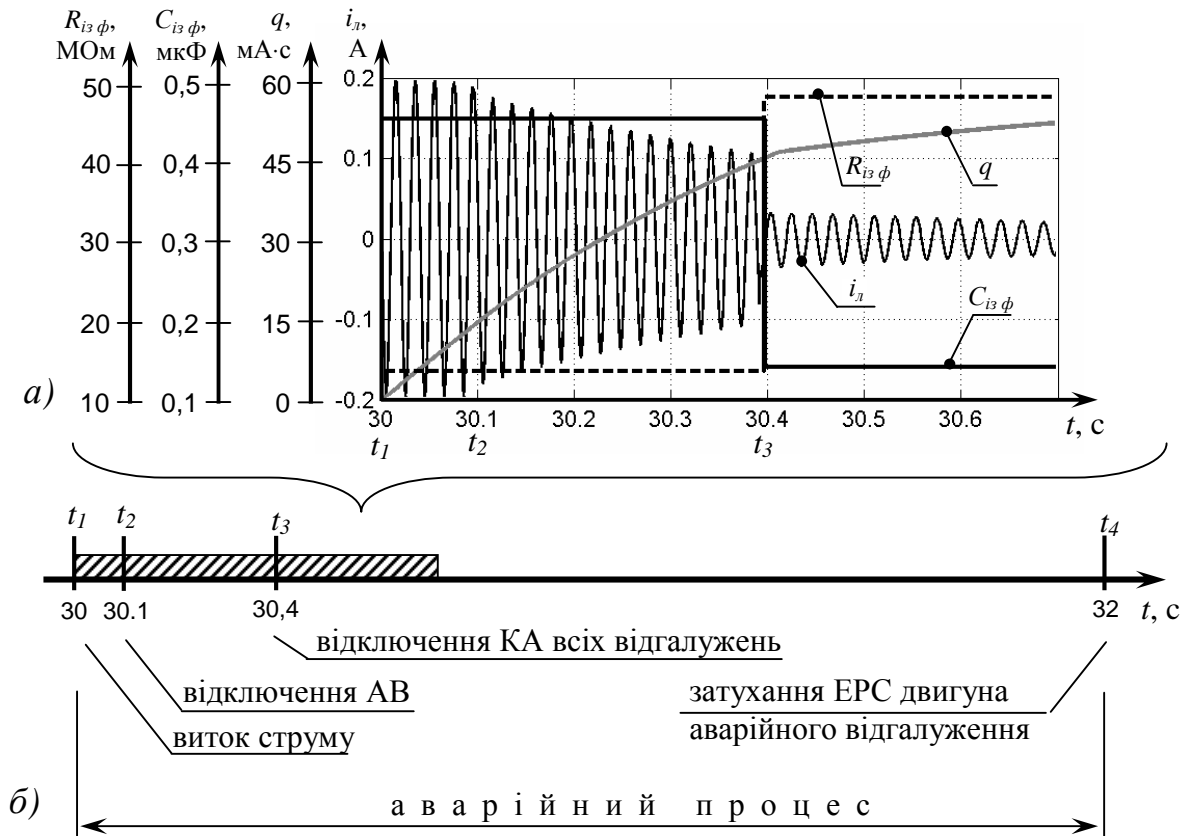


Рис. 3.10. Діаграми струму витoku $i_{л}$, накопичення кількості електрики q через опір аварійної точки, ємності $C_{із\phi}$ та активного опору $R_{із\phi}$ ізоляції фази кабельної мережі в умовах ЕТК ДШ напругою 660 В (а) при відключенні КА відгалужень по зниженні напруги у мережі до 50% від номінального рівня; вісь (б) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображають діаграми а

Так, наприклад, момент самовільного відключення комутаційного апарата шостого відгалуження (КА6) $t_{КА6}$ визначає перехід двигуна М6 до режиму одиночного вибігу, зрівнювальний струм у шостому відгалуженні перестає протікати, електромагнітний момент двигуна М6 стає тотожним нулю (рис. 3.13, а). Обмін потужністю між двигуном М6 та двигунами, що лишилися у групі, припиняється (рис. 3.14, а). Вихід двигуна М6 з групи впливає на стан двигунів, що продовжують знаходитися в режимі групового вибігу: діаграми свідчать про зміну амплітуди зрівнювальних струмів відгалужень №1 та №3 (рис. 3.13, а). Під час групового вибігу двигун М6 працював у руховому режимі, що підтверджують діаграми миттєвих значень потужності p_6 цього АД (рис. 3.14, а): $p_6 > 0$. З відключенням відгалуження

№6 змінюється конфігурація та, відповідно, параметри ізоляції кабельної мережі, яка має електричний зв'язок із аварійною точкою (рис. 3.11, б). Аналогічні процеси мають місце при самовільному відключенні комутаційних апаратів інших відгалужень системи (додаток А, табл. А.6). Моменти реконфігурації системи для даної реалізації аварійного процесу дозволяє встановити діаграма, наведена на рис. 3.11, а.

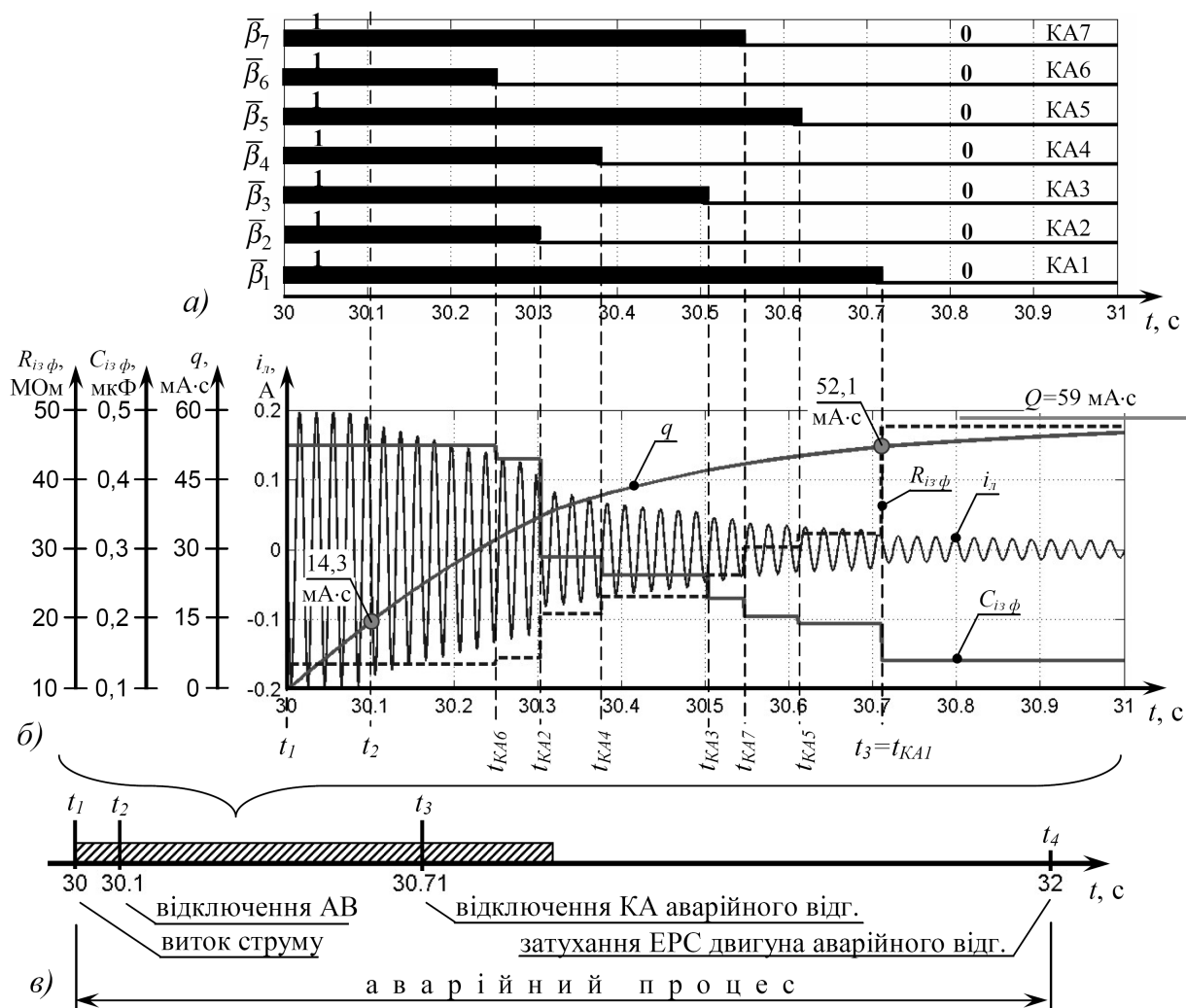


Рис. 3.11. Діаграми, отримані в результаті моделювання аварійного процесу в ЕТК ДШ напругою 660 В, що характеризують стан комутаційних апаратів відгалужень (а), величину струму витоків на землю i_{Δ} , накопичення кількості електрики q через опір кола витоків та параметри ізоляції мережі $C_{i3\phi}$, $R_{i3\phi}$, які впливають на стан кола витоків, (б); вісь (в) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображений на діаграмах; пристрій компенсації ємнісної складової струму витоків на землю відсутній

Складаючи згідно наведених даних енергетичний баланс системи встановлено, що сумарна енергія $\sum W_{2i}$, віддана двигунами системи протягом їх функціонування в генераторному режимі, дорівнює сумарній енергії $\sum W_{\partial i}$, яка спожита іншими двигунами під час роботи в руховому режимі, з припустимою для технічних розрахунків похибкою 0,4%. Це свідчить про виконання закону збереження енергії.

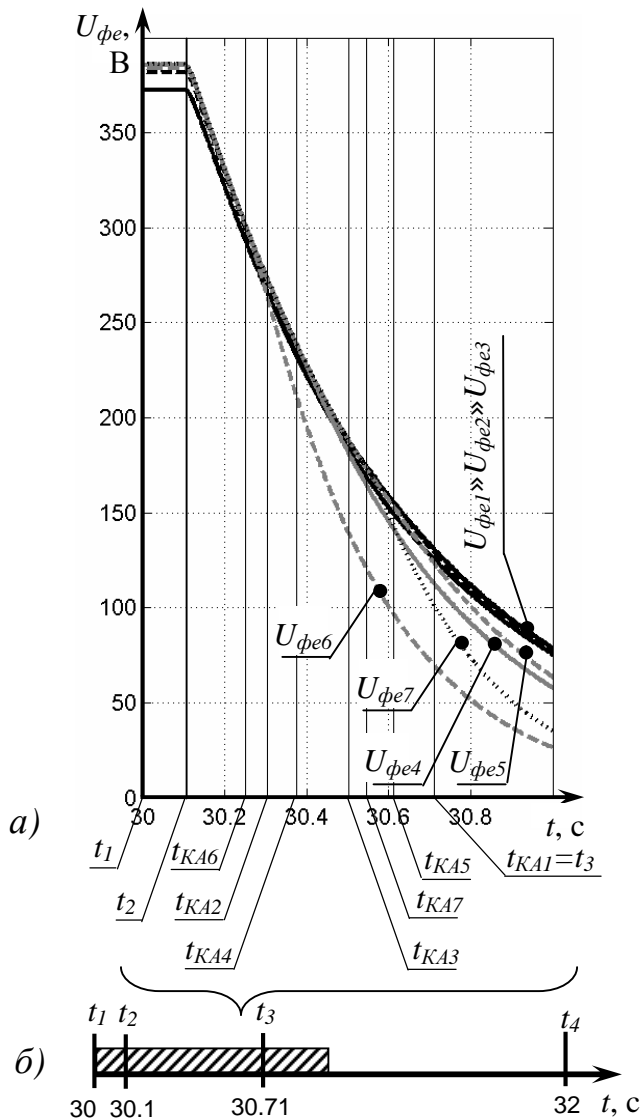


Рис. 3.12. Діаграми ефективних значень ЕРС обертання двигунів (а, фазні величини) при стохастичному самовільному відключенні КА відгалужень після захисного відключення АВ в умовах ЕТК ДШ напругою 660 В; вісь (б) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображають діаграми а

Режим групового вибігу триває, доки електрично з'єднаними між собою є як мінімум два двигуни, які генерують спільну ЕРС обертання після відключення напруги живлення. В даному випадку режим групового вибігу закінчується з відключенням КА відгалуження №5 у момент t_{KA5} , після чого

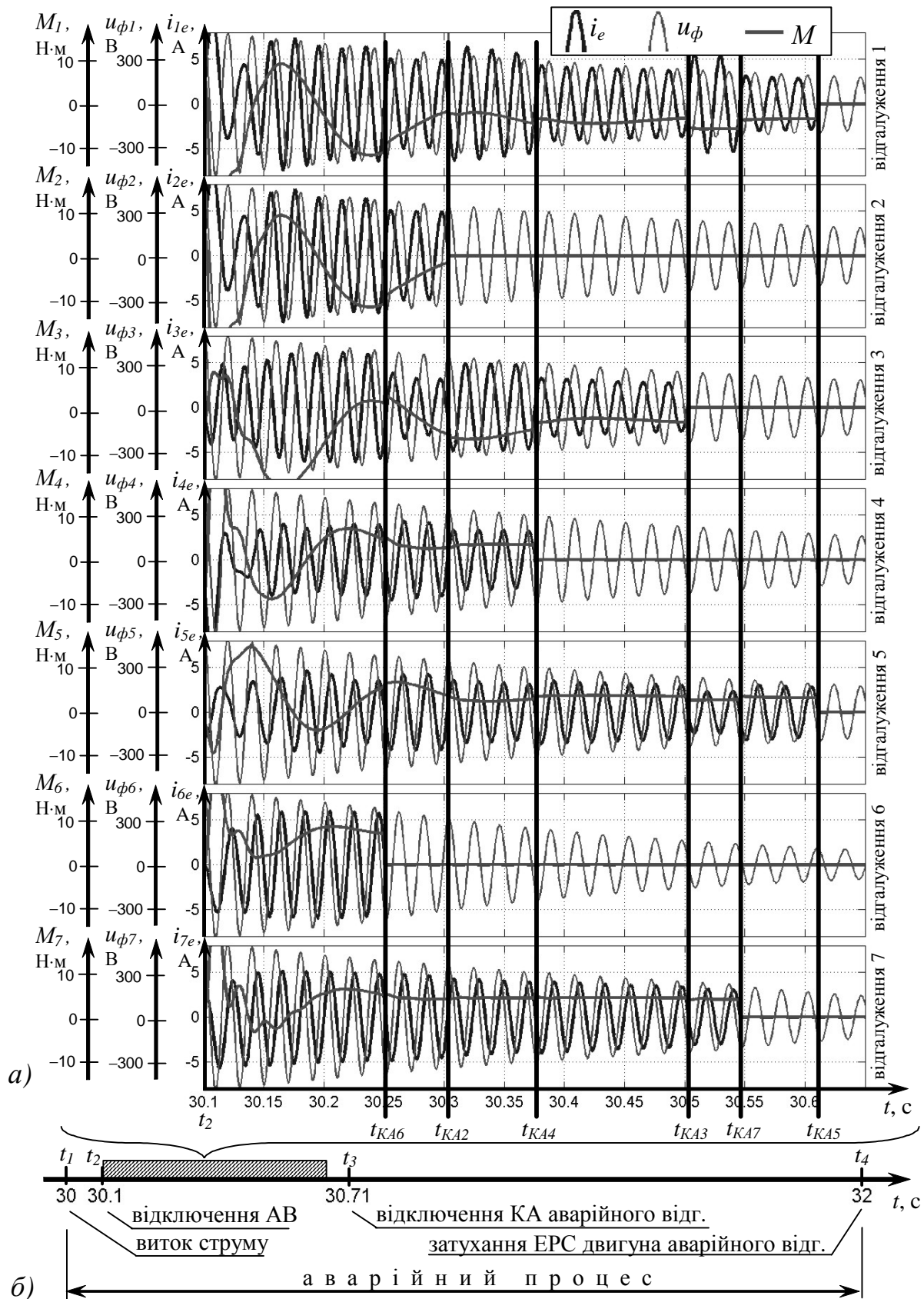


Рис. 3.13. Діаграми (а), що відображають характер зміни струмів відгалужень i_e , фазних ЕРС u_ϕ та електромагнітних моментів M двигунів після захисного відключення ЕТК ДШ напругою 660 В та вісь (б) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображений на діаграмах а

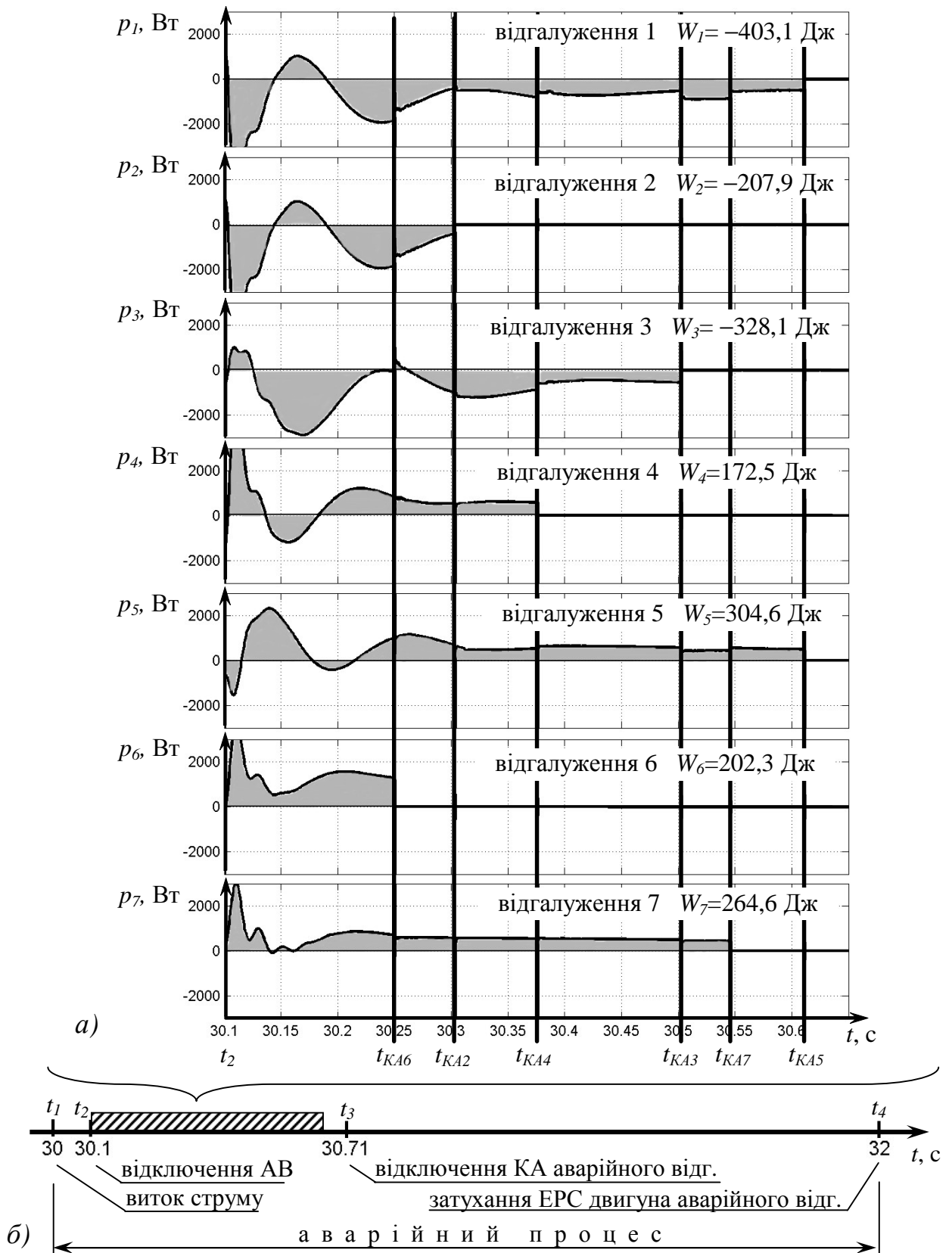


Рис. 3.14. Діаграми (а), що відображають миттєві значення потужності двигунів після захисного відключення ЕТК ДШ напругою 660 В, та вісь (б) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображений на діаграмах а

двигун аварійного відгалуження М1 переходить до режиму одиночного вибігу, генеруючи відповідну зворотну ЕРС, яка підтримує струм витоку. Оскільки КА1 аварійного відгалуження лишається ввімкненим, на стан кола витоку струму на землю впливають сукупні параметри ізоляції магістрального та гнучкого кабеля ГК1 аварійного відгалуження (рис. 3.11, б).

Самовільне відключення комутаційного апарата аварійного відгалуження (КА1) в момент $t_{КА1}$ спричинило зміну параметрів ізоляції, що впливають на стан кола витоку. Момент t_4 досягнення амплітудою ЕРС двигуна аварійного відгалуження 3% від початкового значення є кінцем аварійного процесу. Загальна кількість електрики, що пройшла через опір кола витоку за час аварійного процесу, у даному випадку склала 59 мА·с, в тому числі за рахунок ЕРС обертання двигунів – 44,7 мА·с.

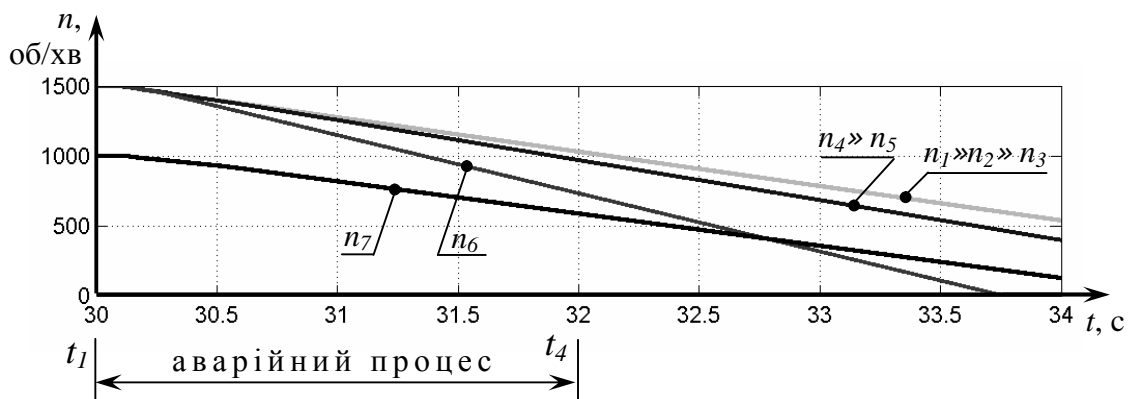


Рис. 3.15. Діаграми зміни частоти обертання роторів двигунів системи напругою 660 В після початку аварійного процесу

Наявність в системі пристрою автоматичної компенсації ємнісної складової струму витоку на землю дозволяє покращити електробезпеку стану аварійної точки з початку аварійної ситуації (момент t_1) до моменту t_3 самовільного відключення комутаційного апарата аварійного відгалуження (рис. 3.16, в). Ємнісна складова струму витоку на землю не компенсується повністю через переналаштовування автокомпенсатора при стохастичній

зміні конфігурації мережі, що ілюструє порівняння діаграм реактивних опорів ємності трьох фаз мережі $x_C = 1/(wC_{i3})$ та індуктивності компенсуючого дроселя $x_L = wL_k$ при самовільному відключенні КА (рис. 3.16, б). Ефективність компенсації також визначається коефіцієнтом розладу автокомпенсатора ν , що при моделюванні приймав випадкові значення згідно прийнятих припущень (рис. 3.16, а). Після самовільного відключення комутаційного апарата аварійного відгалуження (момент t_3) подальша компенсація ємнісної складової струму витoku на землю є неможливою, оскільки порушено електричний зв'язок компенсуючого дроселя з аварійною точкою, що, відносно кола витoku, рівноцінно виконанню умови $x_L \rightarrow \infty$ (рис. 3.16, б). Після моменту t_3 стан кола витoku обумовлюється зворотною ЕРС двигуна та параметрами ізоляції кабеля аварійного відгалуження. Загальна кількість електрики, що пройшла через опір кола витoku струму на землю за час аварійного процесу при наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витoku, для даної реалізації аварійного процесу становить 15 мА·с, з яких 12,2 мА·с обумовлені зворотною ЕРС двигунів.

Прийнята для моделювання витoku струму на землю схема ЕТК ДШ напругою 1140 В (рис. 3.17) складається із трансформаторної підстанції КТПВ 1250/6–1,2, що живить вугільний комбайн «Кузбасс–500», скребковий конвеєр СП330 та насосну станцію СНД 200/32 (табл. 3.3). Комп'ютерне моделювання проводилося згідно наведеної у додатку А (рис. А.8) моделі. Внутрішня структура використаних у вказаній моделі підсистем, які відповідають одно– та багатодвигуновим відгалуженням ЕТК, наведена на рис. А.3 та А.9 (додаток А). Параметри схем заміщення асинхронних двигунів обчислені за їх технічними характеристиками (додаток А, табл. А.7) згідно методики [29]. Характеристики елементів системи наведені в табл. А.8 та А.9 (додаток А).

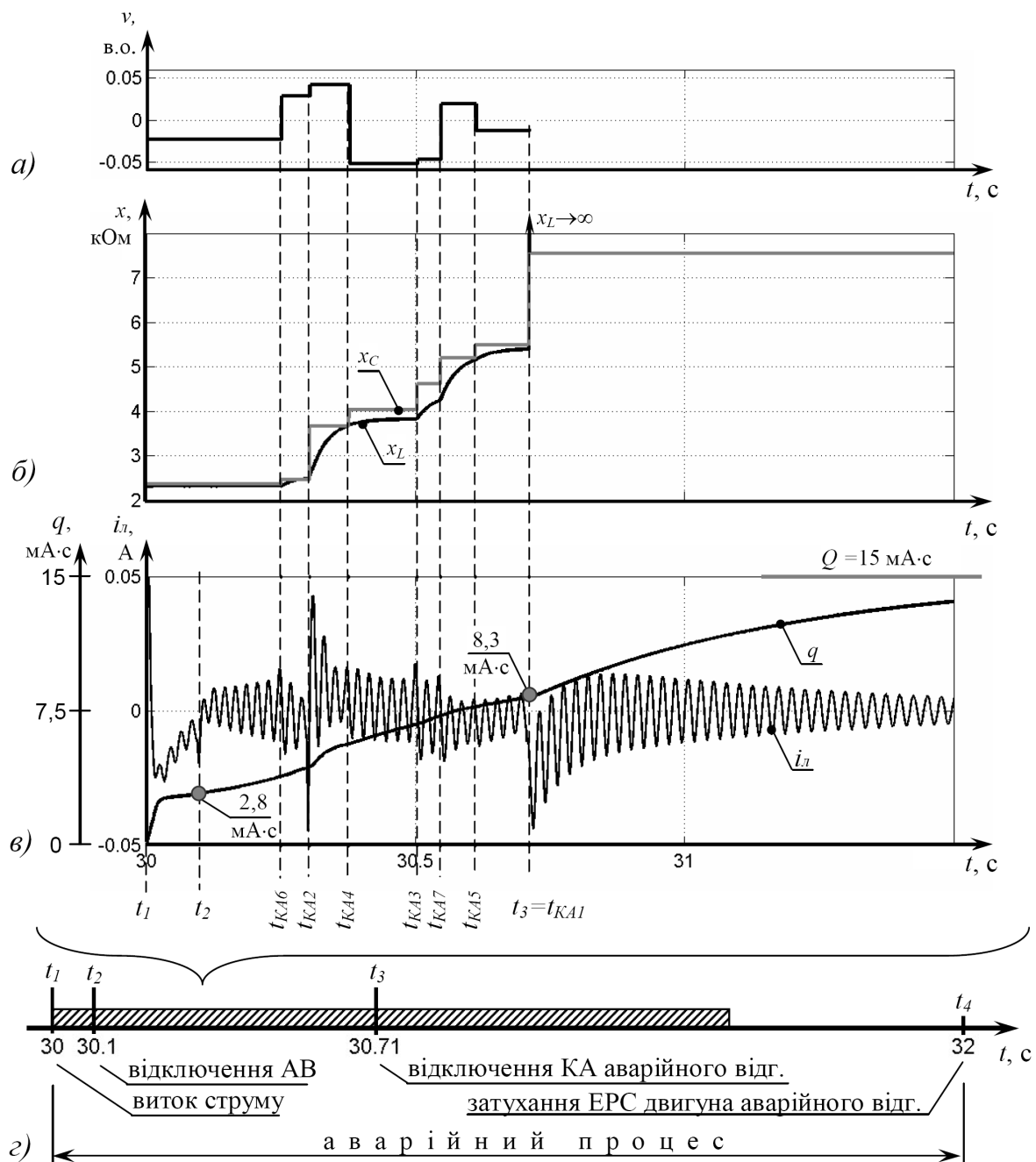


Рис. 3.16. Діаграми, отримані для ЕТК ДШ напругою 660 В, що характеризують стан кола витoku струму на землю за наявності пристрою автоматичної компенсації ємнісної складової струму витoku: *a* – випадкові значення коефіцієнта розладу автокомпенсатора v ; *b* – ємнісний опір ізоляції трьох фаз мережі відносно землі x_C та індуктивний опір автокомпенсатора x_L ; *c* – миттєві значення струму витoku i_L та характер накопичення кількості електрики через опір кола витoku q ; *z* – вісь для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображений на діаграмах

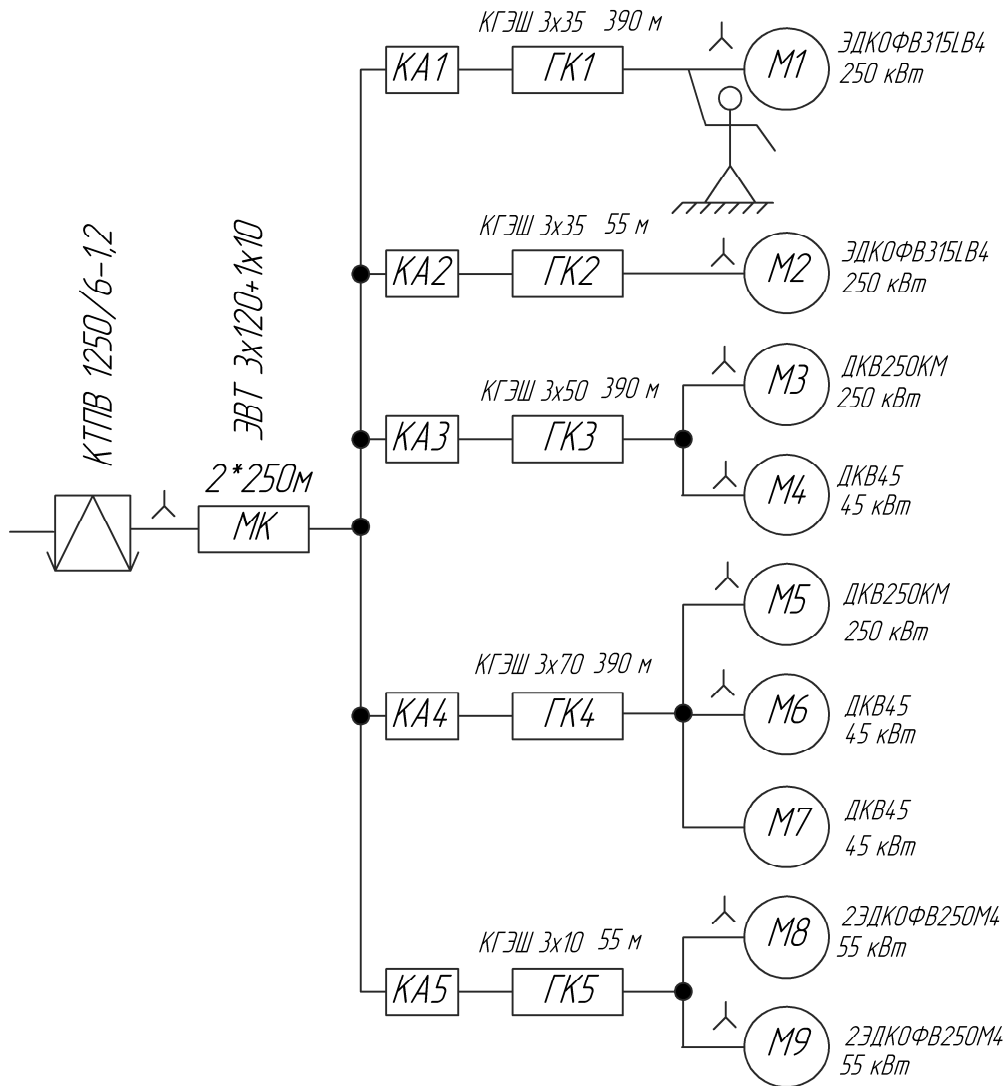


Рис. 3.17. Схема ЕТК ДШ напругою 1140 В, прийнята для моделювання

Модель кола однофазного витоку струму на землю аналогічна наведеній у додатку А (рис. А.4 та А.5), однак складена для випадку п'яти відгалужень мережі. Параметри моделі кола витоку наведені в табл. А.10 (додаток А). Діаграми, наведені на рис. 3.18, відображають один з варіантів протікання аварійного процесу в дільничному ЕТК напругою 1140 В за відсутності пристрою компенсації ємнісної складової струму витоку на землю. До моменту t_2 захисного відключення напруги живлення амплітудне значення струму через опір кола витоку $R_{лв}=1$ кОм перевищує 600 мА. Під час вибігу двигунів струм витоку знижується через зменшення їх зворотних

ЕРС. Діаграми також відображають стохастичну зміну параметрів ізоляції кабелів ($C_{iz\phi}, R_{iz\phi}$) внаслідок реконфігурації мережі при самовільному відключенні комутаційних апаратів відгалужень у моменти $t_{KA1}, \mathbf{K}, t_{KA5}$.

Таблиця 3.3

Характеристика елементів ЕТК ДШ напругою 1140 В,
що прийняті для моделювання

№ відгалуження	Двигун			Гнучкий кабель марки КГЭШ		Найменування споживача		
	позна-чення	Тип	Потужність, кВт	перетин жили, мм ²	довжина, м			
1	M1	ЭДКОФВ315LB4	250	35	390	конвеєр СП330, привідний блок	верхній	
2	M2	ЭДКОФВ315LB4	250	35	55		нижній	
3	M3	ДКВ250КМ	250	50	390	комбайн «Кузбасс-500», блок різання	перший	виконавчий орган
	M4	ДКВ45	45					подача
4	M5	ДКВ250КМ	250	70	390		другий	виконавчий орган
	M6	ДКВ45	45					подача
	M7	ДКВ45	45			гідропривід		
5	M8	2ЭДКОФВ250М4	55	10	55	насосна станція СНД200/32, агрегат	перший	
	M9	2ЭДКОФВ250М4	55				другий	

Наявність похибки пристрою автоматичної компенсації, його переналаштовування під час стохастичної реконфігурації мережі та нездатність покращити стан аварійної точки після самовільного відключення КА аварійного відгалуження не дозволяють підтримувати на належному рівні параметри електробезпеку стану ЕТК напругою 1140 В (рис. 3.19), що потребує застосування додаткових технічних рішень із прискорення знеструмлення кола витoku на землю при захисному відключенні мережі.

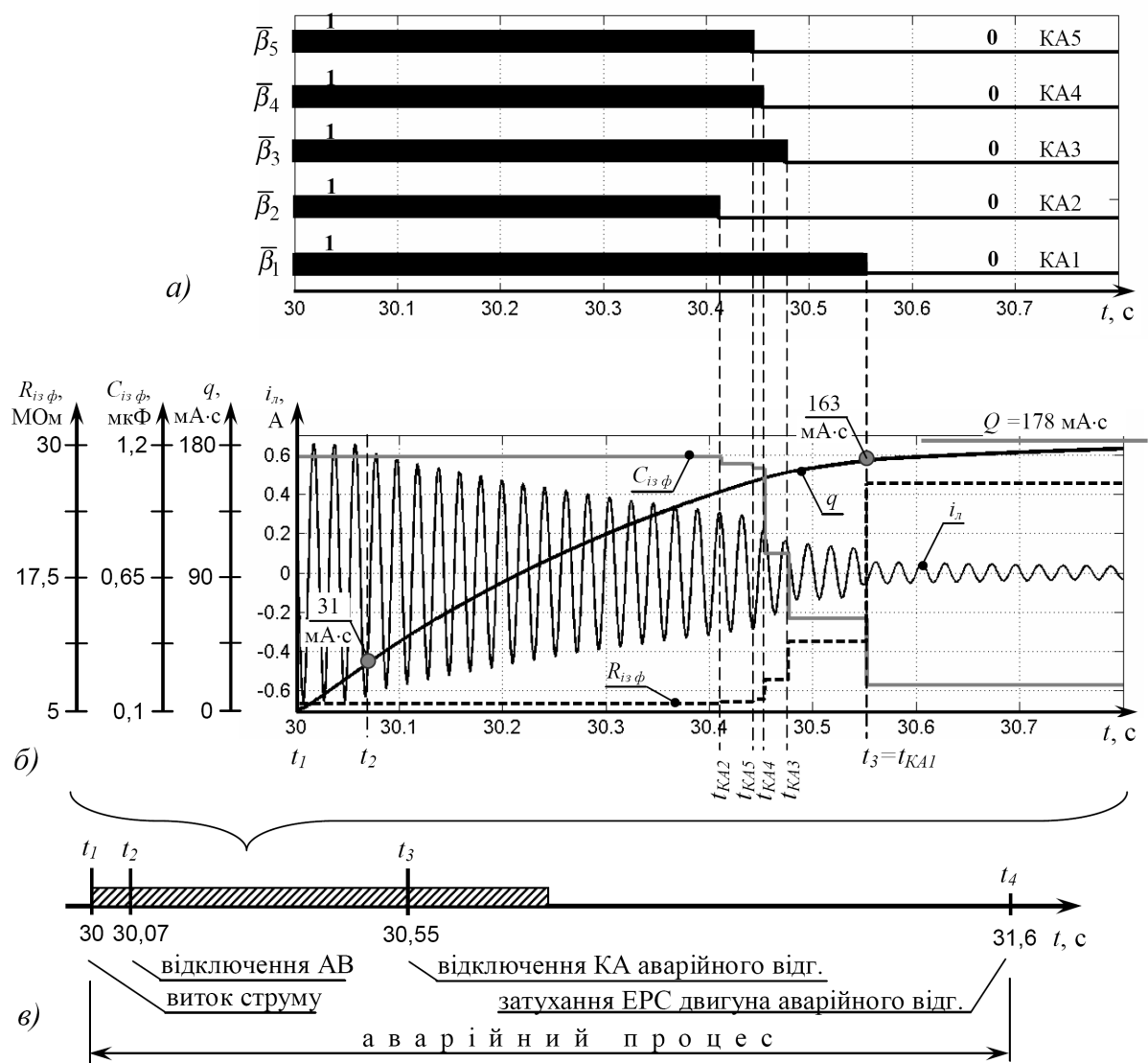


Рис. 3.18. Діаграми, отримані в результаті моделювання аварійного процесу в ЕТК ДШ напругою 1140 В, що характеризують стан комутаційних апаратів відгалужень (а), величину струму витoku на землю i_n , накопичення кількості електрики через опір кола витoku на землю q та параметри ізоляції мережі $C_{iz\phi}$, $R_{iz\phi}$, які впливають на стан кола витoku, (б); вісь (в) для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображений на діаграмах; пристрій компенсації ємнісної складової струму витoku на землю відсутній

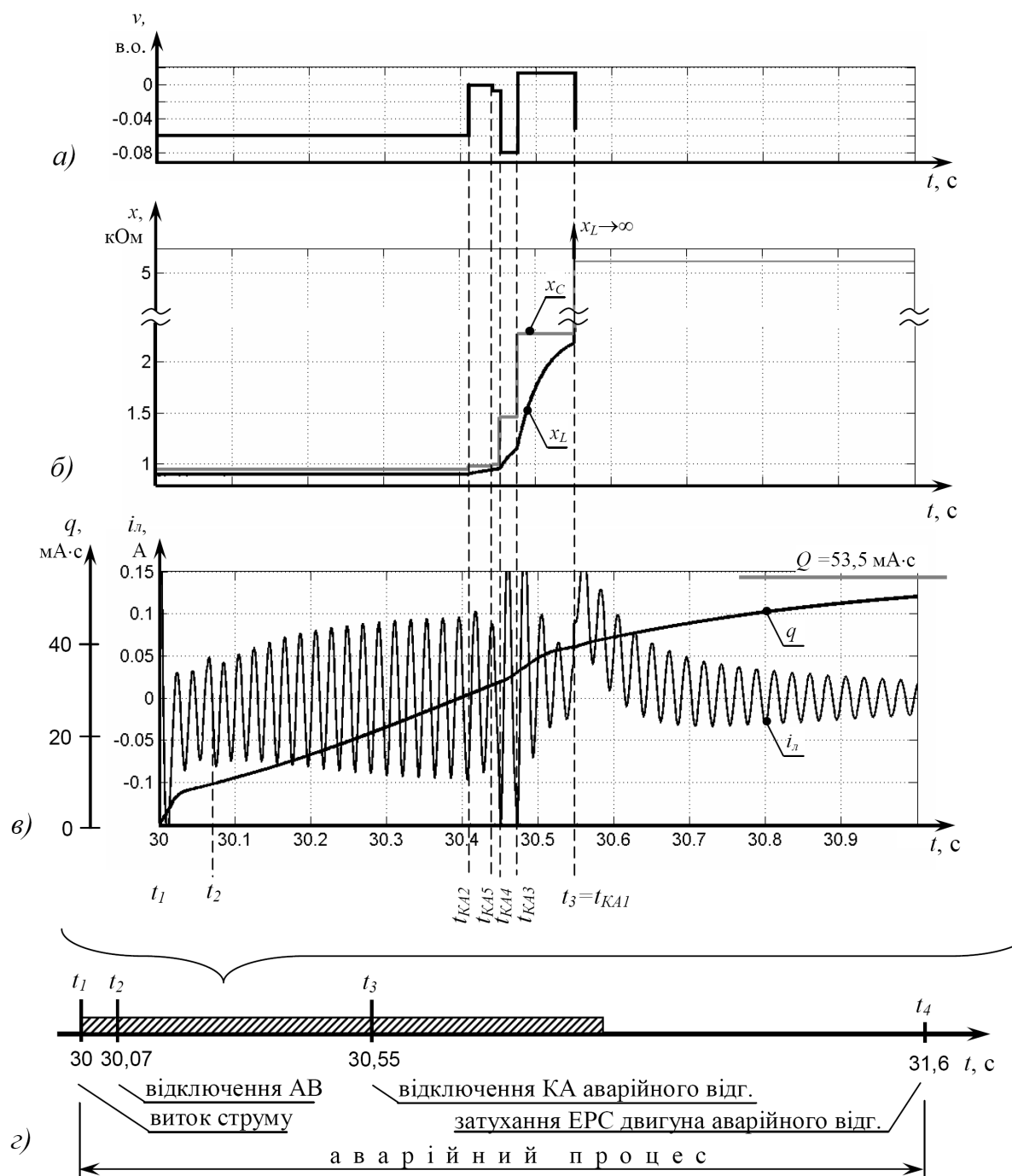


Рис. 3.19. Діаграми, отримані для ЕТК ДШ напругою 1140 В (наявна автокомпенсація ємнісної складової струму витоків): а – випадкові значення коефіцієнта розладу автокомпенсатора v ; б – ємнісний опір ізоляції трьох фаз мережі відносно землі x_C та індуктивний опір автокомпенсатора x_L ; в – миттєві значення струму витоків на землю i_L та крива накопичення кількості електрики через опір кола витоків на землю q ; г – вісь для ілюстрації часового діапазону (заштрихований), який відображений на діаграмах

3.2 Аналіз залежності стану безпеки експлуатації від параметрів та умов функціонування електротехнічного комплексу дільниці

Від моменту виникнення аварійної ситуації до захисного відключення автоматичного вимикача величина струму витoku на землю визначається рівнем живлячої напруги та сукупними параметрами ізоляції кабельної мережі дільничного ЕТК. Тривалість вказаного часового інтервалу, визначаючи величину відповідної кількості електрики через опір аварійної точки, залежить від часу відключення мережі за сигналом апарату захисту від витоків струму на землю. Після захисного відключення мережі, під час вибігу двигунів, через стохастичну реконфігурацію мережі на стан аварійної точки впливають параметри ізоляції кабелів та зворотні ЕРС двигунів тих відгалужень, які мають електричний зв'язок із аварійною точкою у конкретний момент часу. Характер стохастичної зміни конфігурації ЕТК ДШ після захисного відключення напруги живлення залежить від параметрів самовільного відключення комутаційних апаратів відгалужень.

Таким чином, електробезпека експлуатації ЕТК ДШ визначається (рис. 3.20): опором кола витoku струму на землю; рівнем живлячої напруги; тривалістю захисного відключення мережі; зворотною ЕРС двигунів споживачів; параметрами ізоляції кабелів електротехнічного комплексу; характером самовільного відключення комутаційних апаратів відгалужень.

Основні фактори, що впливають на умови формування та тривалість існування зворотної ЕРС двигунів споживачів, можуть бути розглянуті на прикладі відключення однодвигунового відгалуження ЕТК ДШ від напруги живлення (рис. 2.2). Після моменту відключення струм у відгалуженні та у статорній обмотці АД дорівнює нулю ($\bar{i} = 0$). Відповідно, є нульовим і електромагнітний момент двигуна ($M = 0$). За таких умов система рівнянь (2.5), що описує процеси у відгалуженні електротехнічного комплексу в системі координат статора двигуна, має вигляд:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = L_m \frac{d\bar{i}_r}{dt}; \\ \frac{d\bar{i}_r}{dt} = j\omega\bar{i}_r - \frac{\bar{i}_r}{T_r}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{-M_c}{J}, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $T_r = L_r / R_r$ – стала часу ротора; M_c , J – сталі моменти опору та інерції відповідно; ω – частота обертання ротора двигуна, що зменшується під час вибігу; \bar{i}_r – просторовий вектор вільного струму короткозамкненого ротора двигуна; \bar{u}_1 – просторовий вектор напруги у місці під'єднання ГК відгалуження до КА, дорівнює вектору напруги на затискачах статора АД (оскільки струм у відгалуженні відсутній); L_m – індуктивність головного магнітного контура двигуна.

Перше з рівнянь системи (3.1) ставить у відповідність просторовий вектор ЕРС обертання на затискачах статора двигуна вектору вільного струму ротора \bar{i}_r . Воно підтверджує, що саме вільний струм, що протікає деякий час у роторі після відключення АД від джерела живлення, є причиною наявності зворотної ЕРС двигуна. Вказаний вільний струм ротора визначається сталою часу ротора T_r та характером зниження частоти обертання ротора двигуна під час вибігу, на що вказує друге диференціальне рівняння системи (3.1). Зі збільшенням величини T_r час існування ЕРС обертання збільшується. Характер уповільнення ротора АД під час вибігу при сталих моментах опору і інерції визначається третім рівнянням системи (3.1). Зі збільшенням момента навантаження (або зменшенням момента інерції) абсолютне значення похідної швидкості за часом збільшується, уповільнення ротора відбувається більш інтенсивно, що прискорює зниження ЕРС обертання. Це супроводжується зменшенням часу існування небезпечних рівнів зворотної ЕРС і, відповідно, зниженням загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу.



Рис. 3.20. Структурна схема для ілюстрації впливу на електробезпеку ЕТК ДШ параметрів елементів та режимів їх роботи

Аналіз диференційних рівнянь (3.1), що описують перехідні процеси у відгалуженні ЕТК ДШ після відключення його від джерела живлення, дозволив встановити фактори впливу на зворотну ЕРС вибігу двигуна споживача: стала часу ротора; моменти механічного навантаження та інерції на валу двигуна (рис. 3.20). Перший з перелічених факторів визначається параметрами двигуна споживача, два інших – конструктивними особливостями та умовами функціонування навантаження. Такий аналіз призводить до висновку про вплив на стан електробезпеки дільничного ЕТК не тільки параметрів його елементів, а й умов експлуатації АД споживачів.

Самовільне відключення комутаційних апаратів відгалужень внаслідок зниження ЕРС вибігу двигунів призводить до зміни параметрів кабельної мережі, що впливають на величину струму витоку на землю. Величина напруги самовільного відключення КА конкретного відгалуження визначає тривалість впливу параметрів ізоляції його гнучкого кабеля на стан аварійної

точки. Припущення про нормальне розподілення відносного значення напруги самовільного відключення комутаційного відгалуження дозволяє розглядати параметри нормального розподілення цієї величини в якості факторів впливу на стан електробезпеки ЕТК ДШ (рис. 3.20).

Розглянемо випадок виникнення однофазного витоку струму на землю в ЕТК ДШ за умови збереження ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень під час аварійного процесу. До цього часу було встановлено, що ефективне значення струму витоку від моменту t_1 виникнення витоку струму на землю до моменту t_2 захисного відключення мережі від живлячої підстанції обчислюється за залежністю [17], А:

$$I'_l = \frac{U_l}{\sqrt{3} \sqrt{R_g^2 + \frac{1}{9w^2 C_{iz\phi}^2}}}, \quad (3.2)$$

де U_l - ефективне значення лінійної напруги мережі, В; R_g - опір кола однофазного витоку струму на землю, Ом; w - колова частота напруги мережі, рад/с; $C_{iz\phi}$ - ємність ізоляції фази мережі відносно землі, Ф/фаза.

За вказаний часовий інтервал через опір тіла людини проходить кількість електрики, що визначається виразом (рис. 3.21), А·с:

$$Q_1 = I'_l(t_2 - t_1) = I'_l \cdot \Delta t_{зг}, \quad (3.3)$$

де $\Delta t_{зг} = t_2 - t_1$ - тривалість виявлення апаратом захисту аварійного стану та відключення мережі, с.

Встановлено [13], що експоненціально затухаюча зі сталою часу T зворотна ЕРС обертання від момента t_2 до момента $t_4 \approx t_2 + 4T$ (зниження ЕРС обертання до 3% від початкового значення) спричиняє протікання через опір тіла людини відповідної складової струму витоку (рис. 3.21):

$$I_{л2}|_{t \geq t_2} = I'_l e^{-\frac{t-t_2}{T}}. \quad (3.4)$$

Кількість електрики через опір тіла людини за часовий проміжок (t_2, t_4) дорівнює визначеному інтегралу, А·с:

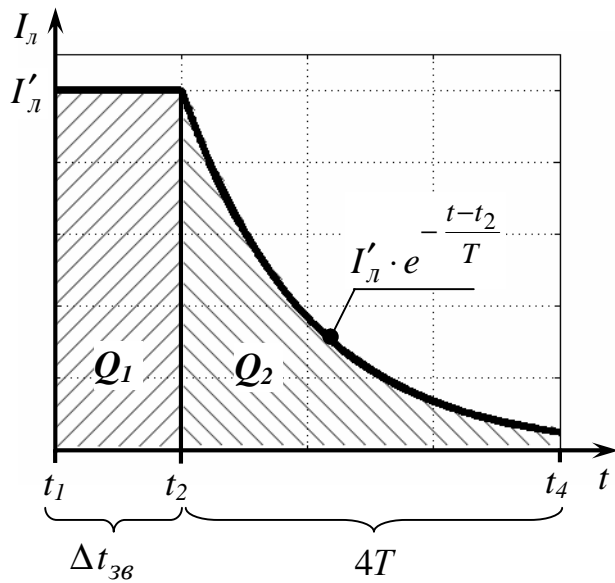


Рис. 3.21. Діаграма зміни ефективного значення струму витoku на землю в ЕТК ДШ за умови збереження ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень протягом аварійного процесу (t₁, t₄) дорівнює, А·с:

$$Q = Q_1 + Q_2 = I'_l \cdot (\Delta t_{36} + T) = \frac{U_l \cdot (\Delta t_{36} + T)}{\sqrt{3} \sqrt{R_g^2 + \frac{1}{9w^2 C_{i3\phi}^2}}}. \quad (3.8)$$

Останній вираз дозволяє обчислити загальну кількість електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу в ЕТК ДШ за умови ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень протягом аварійного процесу. Аналіз даного виразу свідчить, що стала часу затухання зворотної ЕРС двигунів впливає на величину кількості електрики в тій же мірі, що і час захисного відключення мережі.

Тривалість захисного відключення мережі при виникненні витoku через опір $R_g=1$ кОм не повинна перевищувати згідно ГОСТ 22929-78 [4]: для мереж напругою $U_l=380$ В та $U_l=660$ В – величини $\Delta t_{36}=0,1$ с; для мереж $U_l=1140$ В - величини $\Delta t_{36}=0,07$ с. Підставляючи ці числові значення змінних до виразу (3.8), маємо:

$$Q_2 = \int_{t_2}^{t_4} I_{l2} dt, \quad (3.5)$$

Обчислюючи інтеграл (3.5), отримаємо:

$$Q_2 = I'_l \cdot T \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2-t_4}{T}} \right). \quad (3.6)$$

Враховуючи, що $t_4 - t_2 \approx 4T$,

вираз $1 - e^{-\frac{t_2-t_4}{T}}$ дорівнює $0,982 \approx 1$, тоді:

$$Q_2 = I'_l \cdot T. \quad (3.7)$$

Загальна кількість електрики через опір людини за час аварійного

$$Q|_{380B} = \frac{380T + 38}{\sqrt{3 \cdot 10^6 + \frac{1}{2,9 \cdot 10^5 C_{i3\phi}^2}}}, \text{ A}\cdot\text{c}; \quad (3.9)$$

$$Q|_{660B} = \frac{660T + 66}{\sqrt{3 \cdot 10^6 + \frac{1}{2,9 \cdot 10^5 C_{i3\phi}^2}}}, \text{ A}\cdot\text{c}; \quad (3.10)$$

$$Q|_{1140B} = \frac{1140T + 79,8}{\sqrt{3 \cdot 10^6 + \frac{1}{2,9 \cdot 10^5 C_{i3\phi}^2}}}, \text{ A}\cdot\text{c}, \quad (3.11)$$

де T - стала часу затухання зворотної ЕРС двигунів ЕТК ДШ, с; $C_{i3\phi}$ - ємність ізоляції фази мережі відносно землі, Ф/фаза.

Як свідчать залежності (3.9) – (3.11), загальна кількість електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу, при фіксації опору кола витoku та тривалості захисного відключення мережі на обумовлених стандартом рівнях, залежить від двох параметрів. Залежність величини Q від сталої часу затухання зворотної ЕРС двигунів T є лінійною, а від ємності ізоляції мережі – нелінійною. На рис. 3.22 представлені побудовані за наведеними залежностями діаграми, що ілюструють залежність загальної кількості електрики від ємності ізоляції мережі при різних рівнях сталих часу затухання ЕРС обертання. Криві, що відповідають нульовій сталій часу $T = 0$, характеризують стан системи за умови примусового гасіння зворотної ЕРС обертання двигунів після захисного відключення мережі. Для всіх рівнів напруги мережі (380В, 660В, 1140В) при зміні ємності ізоляції фази мережі від 0,1 до 3 мкФ/фаза згадані криві знаходяться нижче граничного рівня загальної кількості електрики через опір тіла людини $Q_{нрпн} = 50 \text{ мА}\cdot\text{с}$. Це доводить ефективність застосування примусового гасіння зворотної ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки стану ЕТК ДШ.

Зміна конфігурації системи через самовільне відключення комутаційного апарату аварійного відгалуження під час вибігу двигунів до

цього часу враховувалося часом ввімкненого стану даного КА. Останній параметр вважався незмінним для комутаційного апарату визначеного типу [13]. Проте, різні рівні навантаження двигунів, або різна кількість двигунів, що одночасно вибігають, змінюють параметри затухання зворотної ЕРС, тим самим змінюється час ввімкненого стану комутаційних апаратів ЕТК після захисного відключення мережі. Більш коректною характеристикою стану КА під час вибігу двигунів є відносне значення напруги самовільного відключення a .

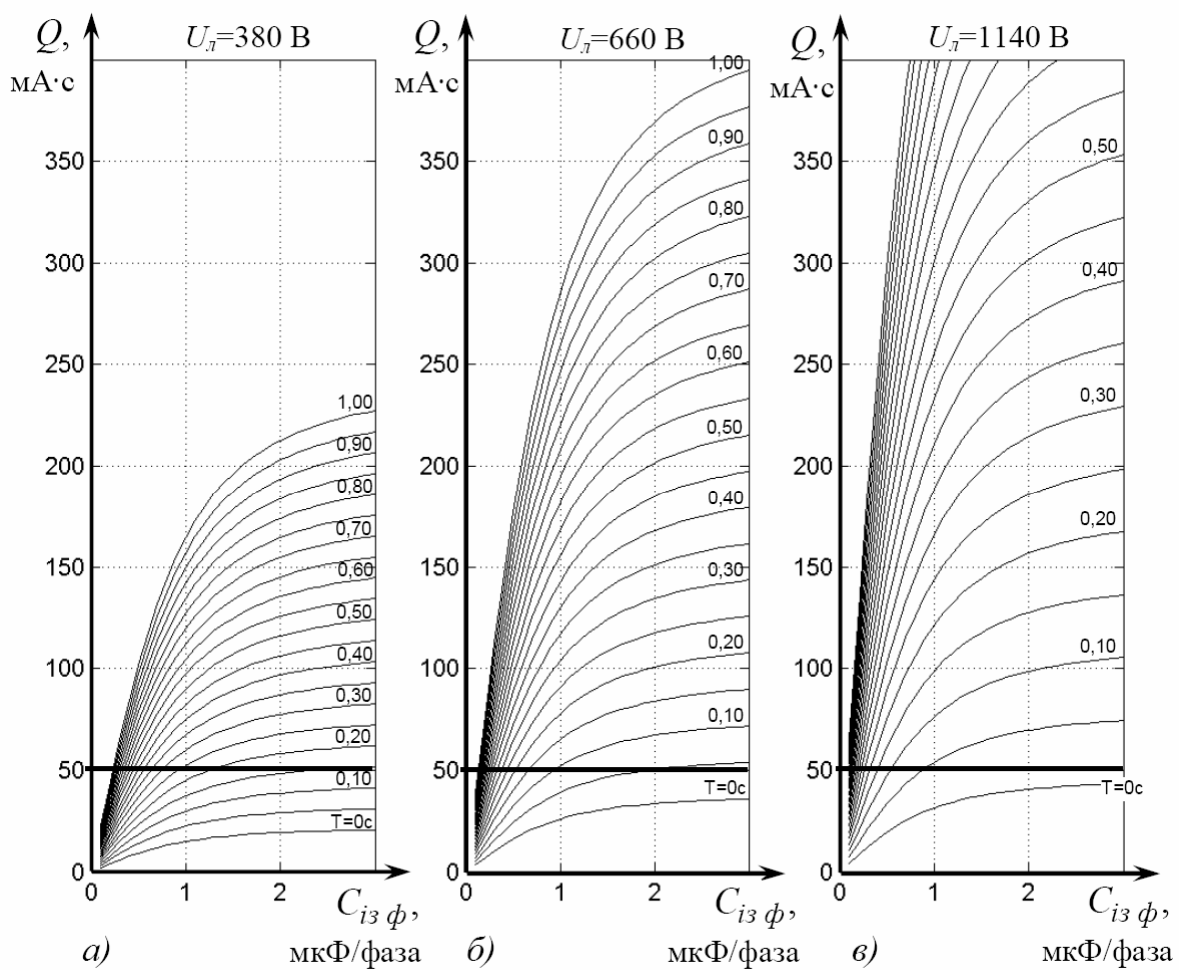


Рис. 3.22. Залежність загальної кількості електрики через опір тіла людини (1 кОм) за час аварійного процесу від ємності ізоляції фази мережі та сталої часу затухання зворотної ЕРС двигунів при виникненні витоку струму на землю в ЕТК ДШ за умови збереження ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень протягом аварійної ситуації: a – номінальна лінійна напруга мережі 380В; $б$ – 660 В; $в$ – 1140 В

Розглянемо аварійний процес витoku струму на землю в ЕТК ДШ за умови одночасного самовільного відключення КА всіх відгалужень при зниженні відносного значення ЕРС обертання до рівня a . ЕРС вибігу двигунів, знижуючись після моменту t_2 захисного відключення мережі зі сталою T' за експоненціальним законом $\exp\left(-\frac{t-t_2}{T'}\right)$, досягає значення a у момент t_3 (рис. 3.23, а). Вважаючи момент виникнення витoku струму на землю тотожним нулю ($t_1=0$), момент $t_2 = \Delta t_{3\phi}$, тоді для моменту самовільного відключення КА t_3 можна скласти рівняння:

$$\exp\left(-\frac{t_3 - \Delta t_{3\phi}}{T'}\right) = a, \quad (3.12)$$

звідки момент часу t_3 виражається як функція тривалості захисного відключення мережі $\Delta t_{3\phi}$, сталої часу затухання ЕРС двигунів системи T' та відносного значення напруги самовільного відключення КА a :

$$t_3 = \Delta t_{3\phi} - T' \ln a. \quad (3.13)$$

Від моменту виникнення аварійної ситуації $t_1=0$ до моменту t_2 захисного відключення напруги живлення ЕТК, тобто протягом часового інтервалу $t_2 - t_1 = t_2 = \Delta t_{3\phi}$, струм витoku I'_l на землю та кількість електрики Q_1 , що пройшла через опір кола витoku, визначаються залежностями (3.2) та (3.3) відповідно. Від моменту t_2 до моменту t_3 одночасного самовільного відключення КА відгалужень ЕРС вибігу групи двигунів та струм витoku на землю знижуються зі сталою часу T' . Відповідна кількість електрики через опір кола витoku становить (рис. 3.23, б):

$$Q_2 = \int_{t_2}^{t_3} I'_l e^{-\frac{t-t_2}{T'}} dt. \quad (3.14)$$

Враховуючи, що момент t_3 визначається залежністю (3.13) та величина t_2 дорівнює $\Delta t_{3\phi}$, обчислення останнього інтегралу дозволяє встановити кількість електрики, $A \cdot c$:

$$Q_2 = I'_l T'(1 - a). \quad (3.15)$$

Після моменту t_3 до закінчення аварійного процесу (момент t_4) струм витоку визначається параметрами кабеля аварійного відгалуження та сталою часу T'' затухання зворотної ЕРС двигуна відгалуження з витокom. Відповідна кількість електрики обчислюється за виразом:

$$Q_3 = \int_{t_3}^{t_4} I''_l e^{-\frac{t-t_2}{T''}} dt, \quad (3.16)$$

де $I''_l = \frac{U_l}{\sqrt{3} \sqrt{R_\phi^2 + \frac{1}{9W^2 C_{i3\phi av}^2}}}$ - струм витоку на землю, обумовлений ємністю

кабеля відгалуження з витокom струму на землю, А; $C_{i3\phi av}$ - ємність ізоляції відносно землі фази кабеля аварійного відгалуження, Ф/фаза.

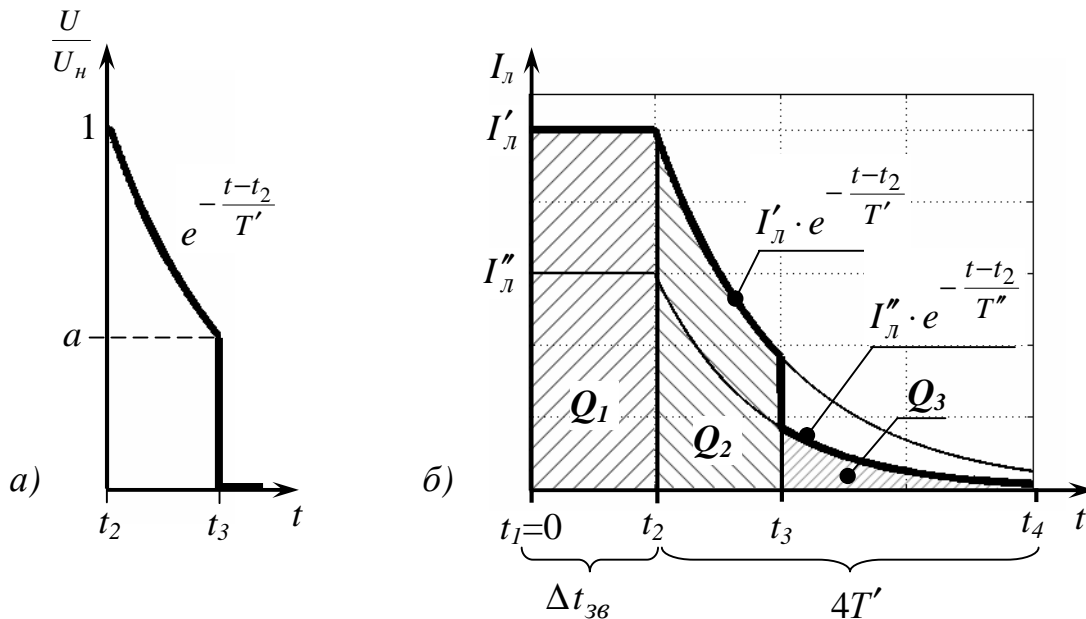


Рис. 3.23. Діаграми для ілюстрації аварійного процесу витоку струму на землю в ЕТК ДШ за умови одночасного самовільного відключення КА всіх відгалужень при зниженні відносного значення ЕРС обертання до рівня a : a – відносьне значення напруги на котушках комутаційних апаратів; δ – ефективне значення струму витоку на землю

Результатом обчислення інтеграла (3.15) у припущенні про достатньо велике значення верхньої границі ($t_4 \rightarrow \infty$) є вираз:

$$Q_3 = I''_l T'' a^{T'/T''}. \quad (3.17)$$

В разі одночасного самовільного відключення КА відгалужень при відносному рівні напруги a загальна кількість електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу може бути обчислена за залежністю:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = I'_l[\Delta t_{3\phi} + T'(1-a)] + I''_l T'' a^{T'/T''}. \quad (3.18)$$

Враховуючи вирази для обчислення величин струмів I'_e та I''_e , з останній вираз перетворюється на наступну залежність:

$$Q = \frac{U_l}{\sqrt{3}} \left[\frac{\Delta t_{3\phi} + T'(1-a)}{\sqrt{R_e^2 + \frac{1}{9w^2 C_{i3\phi}^2}}} + \frac{T'' \cdot a^{T'/T''}}{\sqrt{R_e^2 + \frac{1}{9w^2 C_{i3\phi av}^2}}} \right]. \quad (3.19)$$

Ця залежність дозволяє обчислити загальну кількість електрики через опір кола витoku за час аварійного процесу в ЕТК ДШ за умови одночасного самовільного відключення комутаційних апаратів всіх відгалужень мережі при зниженні відносного значення напруги в мережі до рівня a (в. о.) під час вибігу двигунів. Випадок $a = 0$ відповідає збереженню ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень протягом аварійного процесу, залежність (3.19) за таких умов відповідає обґрунтованій залежності (3.8).

Відключення КА відгалужень одночасно із захисним відключенням групового силового комутаційного апарату відповідає випадку $a = 1$. В цьому разі залежність (3.19) має вигляд:

$$Q = \frac{U_l}{\sqrt{3}} \left[\frac{\Delta t_{3\phi}}{\sqrt{R_e^2 + \frac{1}{9w^2 C_{i3\phi}^2}}} + \frac{T''}{\sqrt{R_e^2 + \frac{1}{9w^2 C_{i3\phi av}^2}}} \right]. \quad (3.20)$$

Таким чином, отримано аналітичні залежності, які дозволяють оцінювати параметри безпеки експлуатації ЕТК ДШ за умови функціонування комутаційних апаратів відгалужень протягом аварійного процесу у наступних режимах: збереження ввімкненого стану – залежність (3.8); одночасне із груповим силовим комутаційним апаратом відключення –

залежність (3.20); одночасне самовільне відключення КА всіх відгалужень при зниженні напруги під час вибігу двигунів до визначеного рівня – залежність (3.19).

Виявлення впливу на параметри безпеки експлуатації характеристик та умов функціонування елементів ЕТК ДШ при стохастичному самовільному відключенні комутаційних апаратів відгалужень під час вибігу двигунів можливе шляхом імітаційного дослідження системи з використанням комп'ютерної моделі, в основу якої покладена обґрунтована в п. 2.1 математична модель дільничного електротехнічного комплексу. В якості відгуку системи має бути розглянута загальна кількість електрики Q через опір кола однофазного витоку струму на землю за час аварійного процесу, яка є випадковою величиною.

В якості приклада, для комп'ютерного моделювання може бути прийнятий дільничний ЕТК номінальною лінійною напругою живлення 660 В, оснащений засобом захисного знеструмлення кола витоку струму на землю. Захисне відключення мережі від живлячої підстанції при виникненні витоку струму на землю має відбуватися за 0,1 с (згідно ГОСТ 22929–78 [4]) у припущенні про відсутність додаткових засобів зниження струму витоку на землю (компенсатора ємнісної складової струму витоку). До моменту виникнення однофазного витоку струму на землю через опір 1 кОм у складі ЕТК працював лише скребковий конвеєр, обладнаний двома приводними блоками номінальною потужністю 160 кВт кожний. Асинхронні двигуни, встановлені на конвеєрі, є технологічно зв'язаними, що дозволяє з задовільною точністю вважати моменти їх механічного навантаження однаковими при тотожних моментах інерції [52]. Розглянемо випадок виникнення витоку струму на землю у відгалуженні віддаленого приводного блоку конвеєра. Параметри нормального розподілення відносного значення напруги самовільного відключення комутаційних апаратів відгалужень фіксуються на рівнях: математичне очікування 0,5 в.о. [12; 17; 18],

стандартне відхилення 0,06 в.о. Це визначає знаходження значень вказаної випадкової величини у діапазоні $0,5 \pm 0,12$ в.о. з імовірністю 0,95.

Дослідженням має бути визначений зв'язок між параметрами ізоляції кабеля аварійного відгалуження ЕТК ДШ обґрунтованої конфігурації та загальною кількістю електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу. При зміні довжини очисного вибою в діапазоні 170–250 м, інтервалі пересування розподільчого пункту ділянки 50 м та враховуючи запас на провисання кабеля, довжина ГК до ближнього приводного блоку складе

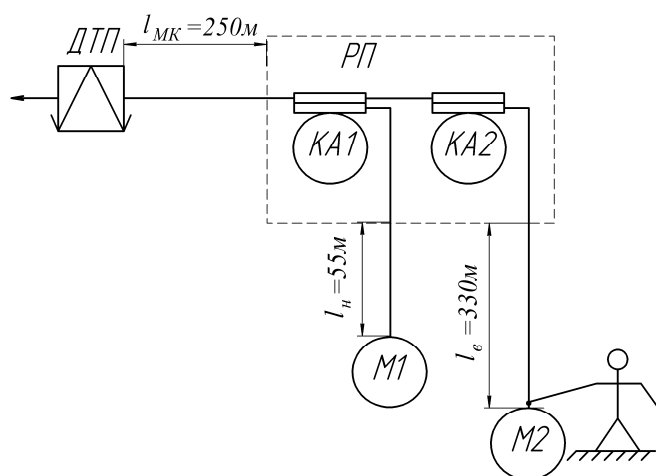


Рис. 3.24. Схема підключення двигунів скребкового конвеєра до розподільчого пункту ділянки, що використовується при імітаційному дослідженні

$l_n = 55$ м, до віддаленого – буде досягати 330 м. Довжина магістрального кабеля приймається $l_{MK} = 250$ м (рис. 3.24).

Отже, довжина кабеля аварійного відгалуження має розглядатися в якості фактора впливу x_1 на параметри електробезпеки експлуатації системи.

Структура та параметри комп'ютерної моделі ЕТК ДШ, яка прийнята для проведення імітаційного дослідження, наведені у додатку А (рис. А.10, табл. А.11–А.14). Програма для організації обчислень (додаток А, табл. А.15) передбачає виконання $m = 100$ паралельних спостережень для кожного рівня фактора впливу. Такий підхід дозволяє отримати в результаті імітаційного дослідження десять вибірок значень кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу, кожна з яких відповідає визначеній довжині кабеля аварійного відгалуження. Застосування до отриманих даних критерія згоди Колмогорова–Смирнова не дає підстав для відкидання гіпотези про нормальне розподілення вибірових даних за рівня значущості

0,05. Вибіркові значення математичного очікування \bar{Q} та дисперсії s^2 відгуку системи при кожному рівні фактора впливу наведені в табл. 3.4, рядки 3,4.

Таблиця 3.4

План та результати проведення імітаційного дослідження впливу довжини кабеля аварійного відгалуження на параметри електробезпеки експлуатації ЕТК ДШ

№ рядка	Дослід №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Параметр											
1	l_g	м	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330
2	x_1	рівні	-1	-0,78	-0,56	-0,33	-0,11	0,11	0,33	0,56	0,78	1
3	\bar{Q}	мА·с	64,83	65,94	67,06	68,16	69,25	70,33	71,41	72,49	73,67	74,62
4	s^2	(мА·с) ²	7,39	7,34	7,24	7,17	7,08	7,03	6,96	6,89	7,43	6,77

Статистична обробка отриманих в результаті імітаційного дослідження вибірових даних за методикою, що наведена у додатку А, дозволяє встановити наступне. Гіпотеза про однорідність вибірових дисперсій не була відкинута за рівня значущості 0,05 (критерій Кохрена). Під час проведення кореляційного аналізу обчислені вибірові значення коефіцієнту лінійної кореляції $\hat{r}=0,76$ та кореляційного відношення $\hat{r}_{y/x}=0,76$. Оскільки статистична значимість \hat{r} та $\hat{r}_{y/x}$ була підтверджена за рівня значущості 0,05, для перевірки гіпотези про лінійний вид залежності використано критерій криволінійності W^2 [53]. За цим критерієм гіпотезу про лінійний вид залежності між досліджуваними величинами не було відкинута за рівня значущості 0,05. При проведенні регресійного аналізу за методом найменших квадратів обрахуванням параметрів регресійної прямої встановлено наступне [54]:

$$\hat{Y}_1(x_1) = 69,78 + 4,91x_1. \quad (3.21)$$

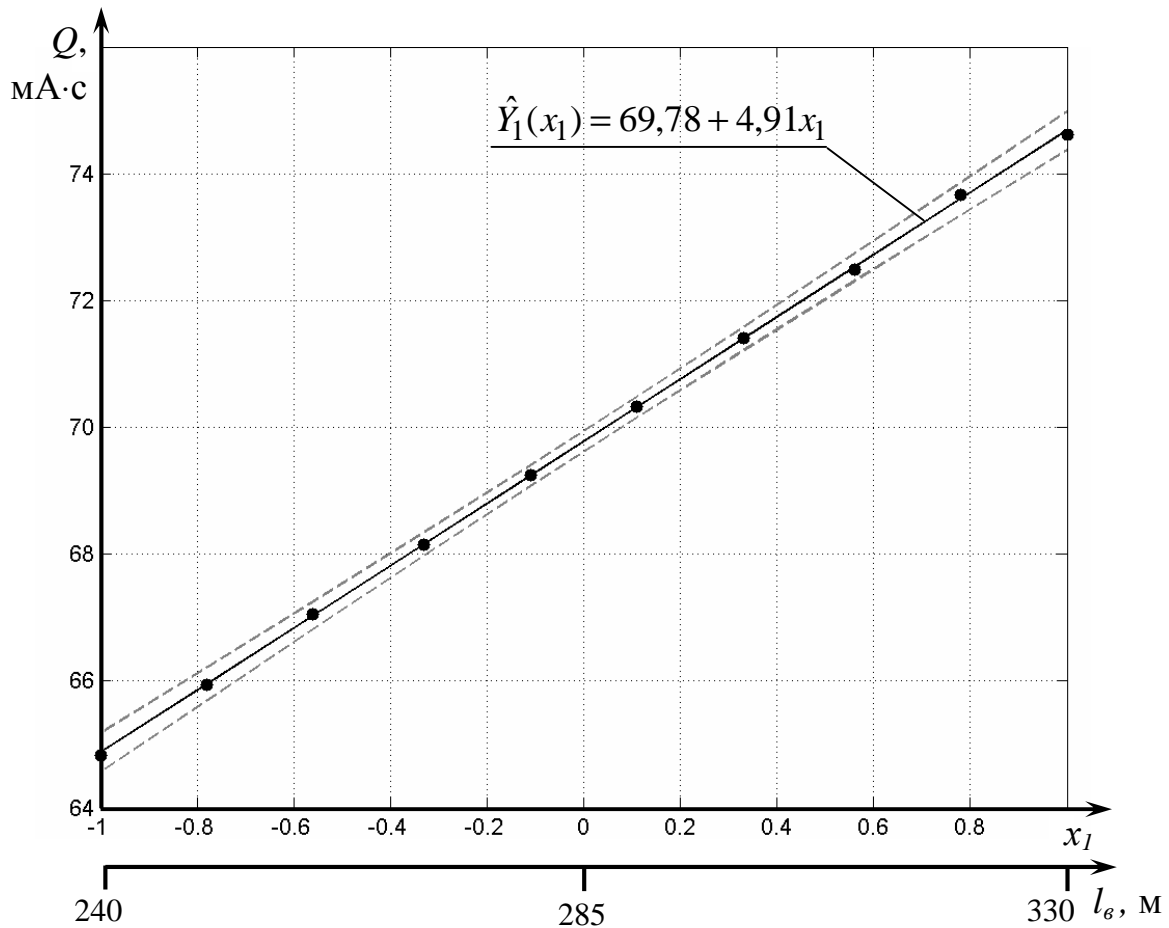


Рис. 3.25. Регресійна пряма \hat{Y}_1 , параметри якої обраховано за результатами імітаційного дослідження характеру впливу довжини кабеля аварійного відгалуження на параметри електробезпеки ЕТК ДШ; пунктиром позначені 95%-ві довірчі інтервали для істинних умовних середніх значень залежної змінної; точки відповідають вибілковим середнім кількості електрики через коло витoku струму на землю

Побудова 95%-вих довірчих інтервалів для регресійної прямої (рис. 3.25) дозволяє оцінити межі, в яких може знаходитися теоретичне середнє регресії при кожному фіксованому значенні аргумента із імовірністю 0,95.

Отримана в результаті імітаційного моделювання регресійна пряма свідчить про лінійну залежність загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу від довжини кабеля аварійного відгалуження. При моделюванні враховане стохастичну реконфігурацію мережі під час вибігу двигунів через самовільне відключення КА відгалужень. Гіпотеза про сталість умовної дисперсії відгуку системи при

зміні довжини кабеля із вибоком струму за прийнятого рівня значущості визнана такою, що не суперечить результатам комп'ютерного моделювання.

Для виявлення впливу рівня навантаження технологічно пов'язаних двигунів на параметри електробезпеки експлуатації ЕТК ДШ доцільно зафіксувати довжину кабеля аварійного відгалуження (на рівні 330 м) та змінювати механічний момент M_c на валах АД (фактор x_2) від 0,1 до 1 номінального значення (табл. 3.5, рядки 1,2) із припущенням про незмінність моменту інерції на валу двигуна при зміні навантаження [52; 55; 56]. Комп'ютерне моделювання та обробка результатів в цьому разі виконувалася аналогічно попередньому імітаційному дослідженню (додаток А).

Таблиця 3.5

План та результати проведення імітаційного дослідження впливу моменту навантаження технологічно зв'язаних двигунів на параметри електробезпеки експлуатації ЕТК ДШ

№ рядка	Дослід №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Параметр											
1	M_c	в.о.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
2	x_2	рівні	-1	-0,78	-0,56	-0,33	-0,11	0,11	0,33	0,56	0,78	1
3	\bar{Q}	мА·с	74,63	63,99	55,80	49,20	44,11	40,09	36,05	33,27	30,20	27,47
4	s^2	(мА·с) ²	6,64	5,49	3,81	2,40	3,16	2,38	2,04	1,46	1,30	1,13

Перевірка за критерієм згоди Колмогорова–Смирнова вибірових даних дозволяє встановити відсутність підстав відкидати гіпотезу про нормальне їх розподілення за рівня значущості 0,05. Вибіркові значення математичного очікування та дисперсії відгуку системи за кожного рівня фактора наведені в табл. 2.5 (рядки 3 та 4 відповідно). Гіпотеза про однорідність вибірових дисперсій була відкинута за рівня значущості 0,05 (обраховане значення критерія Кохрена 0,22 є більшим за критичне 0,15). Вищенаведене дозволяє прийняти гіпотезу про пропорційність умовних дисперсій залежної змінної $D(y/x)$ деякій функції $h^2(x)$: $D(y/x) = s^2 h^2(x)$ (додаток А). З використанням методу найменших квадратів встановлено, що

даним імітаційного моделювання з найменшою похибкою не протерічить лінія:

$$\hat{h}^2(x_2) = 10,87 - 11,57x_2 + 6,82x_2^2 \quad (3.22)$$

за оцінки генеральної дисперсії $\hat{S}^2 = 0,22$ (рис. 3.26). Застосування критерія однорідності Кохрена при прийнятому рівні значущості не дало підстав відкинути гіпотезу про однорідність нормованих дисперсій (обраховане

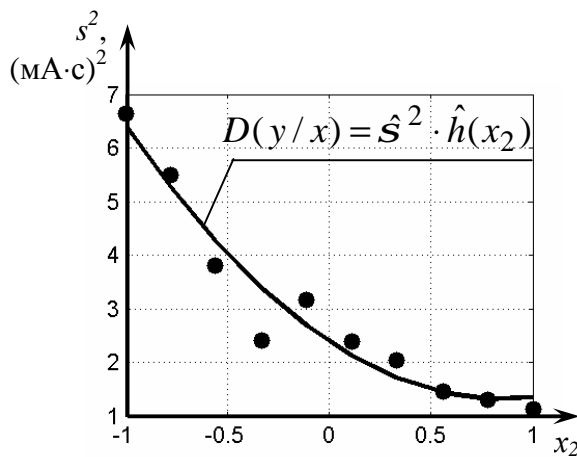


Рис. 3.26. Діаграма зміни умовної дисперсії відгуку $D(y/x)$, причому $\hat{S}^2 = 0,22$, $\hat{h}^2(x_2) = 10,87 - 11,57x_2 + 6,82x_2^2$; точками позначені вибіркові дисперсії s_i^2

значення критерія 0,12 при критичному 0,15). При проведенні кореляційного та регресійного аналіза необхідність оперувати із нормованими дисперсіями врахована введенням нормованих статистичних вагів $\hat{w} = 1/\hat{h}^2(x)$ (додаток А).

При дослідженні зв'язку між рівнем

навантаження технологічно пов'язаних двигунів та електробезпекою експлуатації ЕТК ДШ засобами комп'ютерного моделювання обчислені наступні кореляційні характеристики: вибіркове значення коефіцієнта лінійної кореляції $\hat{r} = -0,1$, вибіркове кореляційне відношення $\hat{r}_{y/x} = 0,99$. Оцінка \hat{r} та $\hat{r}_{y/x}$ підтвердила їх значимість. Гіпотеза про лінійний вид залежності між змінними перевіряється за критерієм криволінійності W^2 . Обраховане значення критерія значно перевищує критичну точку розподілення Фішера–Снедекора, знайдену для умов імітаційного експерименту, тому гіпотеза про лінійний вид залежності відкидається.

За методом найменших квадратів вибіркові дані з меншою похибкою апроксимує поліном другого ступеня (додаток А):

$$\hat{Y}_2(x_2) = 42,20 - 20,02x_2 + 8,04x_2^2. \quad (3.23)$$

Для отриманої лінії регресії були побудовані 95%-ві довірчі інтервали (рис. 3.27), які дозволяють оцінити, в яких межах може знаходитися теоретичне середнє регресії за кожного фіксованого значення аргумента з імовірністю 0,95. Діаграми (рис. 3.27) підтверджують, що довірчі інтервали для теоретичного умовного середнього залежать від значення аргумента, для якого вони обраховуються [53]. Чим більше це значення віддалене від свого середнього, тим менш достовірним є прогноз, що базується на емпіричній лінії регресії. З графіка видно, що довірчі інтервали розширюються із віддаленням від середнього значення фактора x_2 , яке, з урахуванням статистичних вагів \hat{w} , становить $\bar{x}_2=0,31$ (додаток А, табл. А.17).

Зменшення математичного очікування загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу зі збільшенням рівня навантаження двигунів (рис. 3.27), про що свідчить регресійне рівняння (3.23), обумовлюється зменшенням часу затухання зворотної ЕРС двигуна при підвищенні механічного моменту опору. Середня тривалість часового інтервалу між моментами захисного відключення мережі t_2 та її реконфігурацією зменшується. Зменшується час впливу параметрів ізоляції кабелів мережі, які не відносяться до аварійного відгалуження, на коло витоку струму на землю, зменшуючи тим самим середні значення струму витоку та загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу.

За результатами імітаційного моделювання для кожного рівня навантаження технологічно пов'язаних двигунів (фактор x_2) згідно залежності (2.54) розраховані імовірності перевищення кількістю електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу граничної величини (табл. 3.6).

Порівнянням обрахованих імовірностей із прийнятою граничною $P_{gp}=10^{-6}$ виділений безпечний діапазон зміни моменту навантаження технологічно пов'язаних двигунів для умов імітаційного дослідження. В цьому діапазоні імовірність смертельного електроураження людини є меншою прийнятої граничної (табл. 3.6).

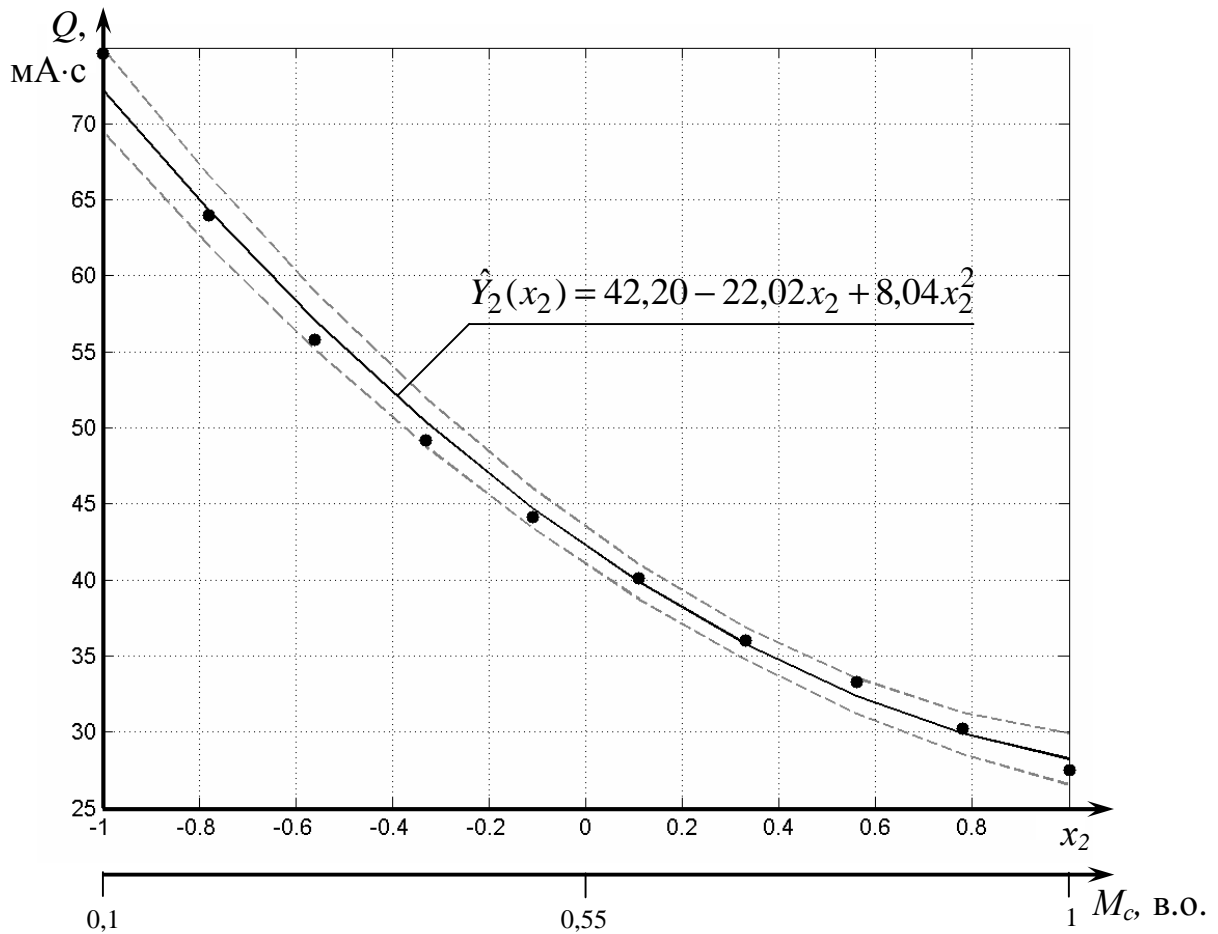


Рис. 3.27. Лінія регресії $\hat{Y}_2(x_2)$, параметри якої обраховано за результатами імітаційного дослідження при зміні навантаження двигунів; пунктиром позначені 95%-ві довірчі інтервали для істинних умовних середніх залежної змінної; точки відповідають вибірковим середнім кількості електрики через коло витоків струму на землю

Для значень моменту навантаження кожного з технологічно пов'язаних двигунів більше 0,53 від номінального рівня дільничний ЕТК, що розглядається, за прийнятих припущень не є потенційно

електронебезпечним: імовірність перевищення загальною кількістю електрики Q рівня $Q_{npun}=50$ мА·с є меншою за граничну 10^{-6} . Якщо до моменту виникнення аварійної ситуації навантаження двигунів було меншим за 0,53 в.о., то дільничний ЕТК визначеної конфігурації становить потенційну небезпеку електроураження людини (в разі торкання струмоведучих елементів електромережі ЕТК через дію зворотних ЕРС АД): відповідна імовірність $P(Q > Q_{npun})$ перевищує граничну.

Таблиця 3.6

Розрахунок імовірності $P(Q > Q_{npun})$ за результатами імітаційного дослідження при зміні навантаження технологічно зв'язаних двигунів

x_2 , рівні	$\hat{Y}_2(x_2)$, мА·с	$\sqrt{\hat{s}^2 \hat{h}^2(x_2)}$, мА·с	$P(Q > Q_{npun})$	Оцінка безпеки при $P_{zp}=10^{-6}$
-1	72,23	2,54	$1-2,19 \cdot 10^{-13}$	$P > P_{zp}$, небезпечна зона
-0,78	64,27	2,30	$1-2,62 \cdot 10^{-10}$	
-0,56	57,05	2,07	$1-3,26 \cdot 10^{-4}$	
-0,33	50,34	1,84	$5,73 \cdot 10^{-1}$	
-0,11	44,72	1,64	$6,34 \cdot 10^{-4}$	
0,11	39,87	1,46	$2,03 \cdot 10^{-12}$	$P < P_{zp}$, безпечна зона
0,33	35,80	1,31	$2,19 \cdot 10^{-13}$	
0,56	32,38	1,20	$2,19 \cdot 10^{-13}$	
0,78	29,91	1,15	$2,19 \cdot 10^{-13}$	
1	28,21	1,16	$2,19 \cdot 10^{-13}$	

Таким чином, уточнені залежності загальної кількості електрики через опір кола витoku за час аварійного процесу та імовірності смерті людини внаслідок електроураження від комплексу факторів, до яких відносяться: стала часу затухання зворотної ЕРС двигунів, режим функціонування та параметри самовільного відключення комутаційних апаратів відгалужень, моменти опору навантаження двигунів споживачів, ємність ізоляції мережі та кабеля аварійного відгалуження відносно землі.

3.3 Аналіз адекватності теоретичних обґрунтувань результатам експерименту

Експериментальна перевірка визначених властивостей зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів створювати в процесі вибігу небезпеку електроураження людини може бути виконана з використанням фізичної моделі дільничного електротехнічного комплексу (рис. 3.28, табл. 3.8), в якій параметри ізоляції і кола витoku на землю утворені активними опорами і ємностями відповідних величин при умові застосування реальних асинхронних двигунів певної кількості і рівнів номінальної потужності.

В разі, якщо в умовах досліду номінальна напруга, що подається на елементи фізичної моделі, є меншою за номінальну напругу реальної шахтної дільничної мережі, параметри елементів стенда мають бути скореговані відповідно до положень теорії подібності. Умовою експериментів слід визначити застосування засобів управління станом контакторів асинхронних двигунів (примусового підтримання їх у ввімкненому або відключеному стані) при моделюванні процесів, обумовлених створенням зворотних ЕРС двигунів в умовах захисного відключення мережі через спрацьовування АЗ.

В якості критерія подібності приймається умова тотожності ефективного значення струму витoku на землю в умовах дослідницького стенда ($I_{л1}$) та реального електротехнічного комплексу ($I_{л2}$):

$$I_{л1} = I_{л2}, \quad (2.24)$$

причому

$$I_{л1} = \frac{U_{л1}}{\sqrt{3} \sqrt{R_г^2 + \frac{1}{9\omega^2 C_1^2}}}, \quad (3.25)$$

$$I_{л2} = \frac{U_{л2}}{\sqrt{3} \sqrt{R_г^2 + \frac{1}{9\omega^2 C_2^2}}}, \quad (3.26)$$

де $U_{л1}, U_{л2}$ – значення лінійної напруги в експериментальних умовах та реальному ЕТК відповідно, В; C_1, C_2 – ємності ізоляції мережі дослідницького стенда та реального дільничного ЕТК, Φ /фаза.

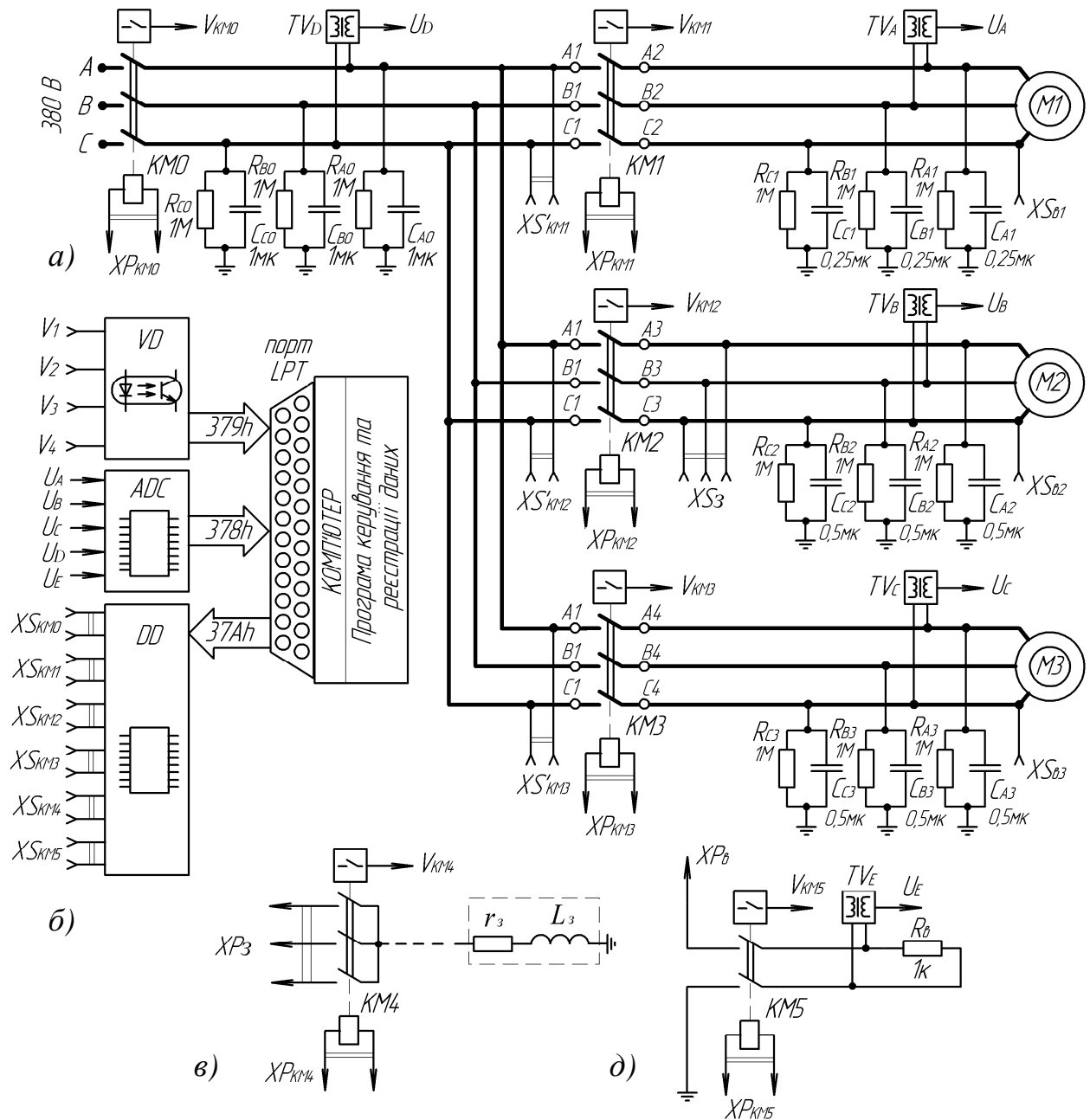


Рис. 3.28. Схеми дослідницького стенда: принципова силової частини (а); функціональна схема системи керування та реєстрації даних (б); принципові схеми закорочувача зворотної ЕРС двигуна аварійного відгалуження (в) та кола витoku струму на землю (д)

Розрахунок ємності ізоляції мережі C_1 в умовах дослідницького стенда за відомим значенням C_2 проводиться за отриманою згідно критерія подібності (3.24) залежністю:

$$C_1 = \left[3w \sqrt{\frac{U_{л1}^2}{U_{л2}^2} \left(R_г^2 + \frac{1}{9w^2 C_2^2} \right)} - R_г^2 \right]^{-1}. \quad (3.27)$$

Експерименти мають враховувати різні ймовірні комбінації станів функціональних елементів електротехнічного комплексу, кожна з яких здатна суттєво впливати на параметри його електробезпеки процесі захисного відключення. Такі комбінації станів, що підлягають експериментальному дослідженню, представлені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Параметри ізоляції кабелів ЕТК напругою 1140 В, який моделюється дослідницьким стендом, та обчислені за критерієм подібності параметри експериментальної установки

Складові ЕТК	Електротехнічний комплекс напругою 1140 В				Дослідницький стенд
	Тип кабеля	Довжина кабеля, м	Питома ємність ізоляції кабеля, мкФ/км/фазу	Реальна ємність ізоляції кабеля, мкФ/фазу	Ємність ізоляції моделі кабеля згідно залежності (3.4), мкФ/фазу
Загальна частина мережі	ЭВТ 3x120+1x10 (два паралельних кабеля)	230 (кожного кабеля)	1,06 (двох паралельних кабелів)	0,244 (двох кабелів)	1
Відгалуження №1	КГЭШ 3x16	220	0,363	0,080	0,25
Відгалуження №2	КГЭШ 3x50	220	0,670	0,150	0,5
Відгалуження №3	КГЭШ 3x50	220	0,670	0,150	0,5

Таблиця 3.8

Асинхронні двигуни, що використовувалися під час проведення експериментів

Двигун	Тип	Номінальна потужність, кВт	Номінальна напруга, В	Схема	Синхронна частота обертання, об/хв
М1	DK16 (Німеччина)	1,5	220/380	Y	1500
М2	BAO-51-4Y2	7,5	660/380	Δ	1500
М3	BAO-51-4Y2	7,5	660/380	Δ	1500

Таблиця 3.9

Перелік експериментів, проведених на дослідницькому стенді

№ експеримента	Умови формування зворотньої ЕРС	Параметри відгалужень						Виток струму у відгалуженні №	Режим функціонування комутаційних апаратів відгалужень протягом аварійного процесу	
		№1		№2		№3				
		ємність ізоляції, мкФ/фаза	двигун	ємність ізоляції, мкФ/фаза	двигун	ємність ізоляції, мкФ/фаза	двигун			
I	Вибіг одного двигуна	0,25	M1	-	-	-	-	1	Постійно ввімкнено	
II									Самовільне стохастичне відключення	
III									Відключаються одночасно з груповим КА	
IV									Закорочення аварійного відгалуження (штучна нульова точка ізольована)	
V		-	-	0,5	M2	-	-	2	Постійно ввімкнено	
VI									Самовільне стохастичне відключення	
VII									Закорочення аварійного відгалуження (штучна нульова точка ізольована)	
VIII									Самовільне стохастичне відключення	
IX	Вибіг двох двигунів	0,25	M1	0,5	M2	-	-	2	Постійно ввімкнено	
X				0,25					Самовільне стохастичне відключення	
XI				0,5					Закорочення аварійного відгалуження (штучна нульова точка ізольована)	
XII				0,75						
XIII		0,5	-	-	-	-	-	-	2	Закорочення аварійного відгалуження (штучна нульова точка підключена до шини «земля» через дросель)
XIV										
XV		-	-	0,5	M2	0,5	M3	2	Постійно ввімкнено	
XVI									Самовільне стохастичне відключення	
XVII	Вибіг трьох двигунів	0,25	M1	0,5	M2	0,5	M3	2	Постійно ввімкнено	
XVIII	Самовільне стохастичне відключення									

Отримані результати у вигляді осцилограм зворотних ЕРС, струмів і обрахованих параметрів кількості електрики в колі виточу на землю дозволяють визначити властивості зворотних енергетичних потоків як факторів небезпеки електроураження (рис. 3.29, 3.30).

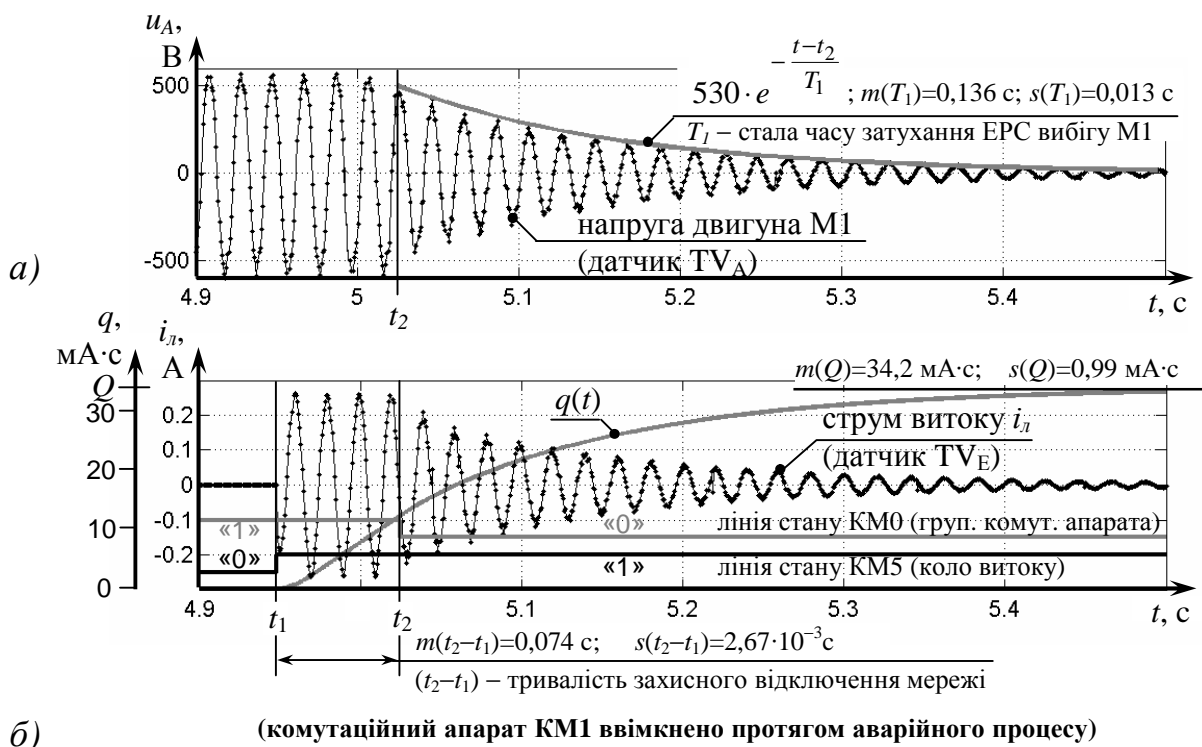


Рис. 3.29. Осцилограми, отримані в експерименті I з дослідження впливу зворотної ЕРС двигуна М1 на стан кола виточу струму на землю при збереженні ввімкненого стану комутаційного апарата відгалуження КМ1 протягом аварійного процесу: а – напруга за затискачах двигуна М1; б – миттєві значення струму виточу i_l , крива $q(t)$ накопичення з часом кількості електрики через опір кола виточу 1 кОм та лінії стану комутаційних апаратів

Процеси при примусовому відключенні комутаційного апарата відгалуження КМ1 після захисного відключення КМ0 відображені на рис. 3.31. Вибіркове середнє затримки відключення КМ1 становить $m(t_3 - t_2)=0,012 \text{ с}$ при стандартному відхиленні $s(t_3 - t_2)=4,14 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ (додаток Б, табл. Б.2). Загальна кількість електрики через опір кола виточу характеризується параметрами $m(Q)=19,89 \text{ МА}\cdot\text{с}$ при $s(Q)=0,77 \text{ МА}\cdot\text{с}$ (додаток Б, табл. Б.3). Відключення КА відгалуження в найкоротший термін

після захисного відключення мережі дозволяє зменшити середні величини Q порівняно із випадком самовільного відключення КА відгалуження під час вибігу двигуна.

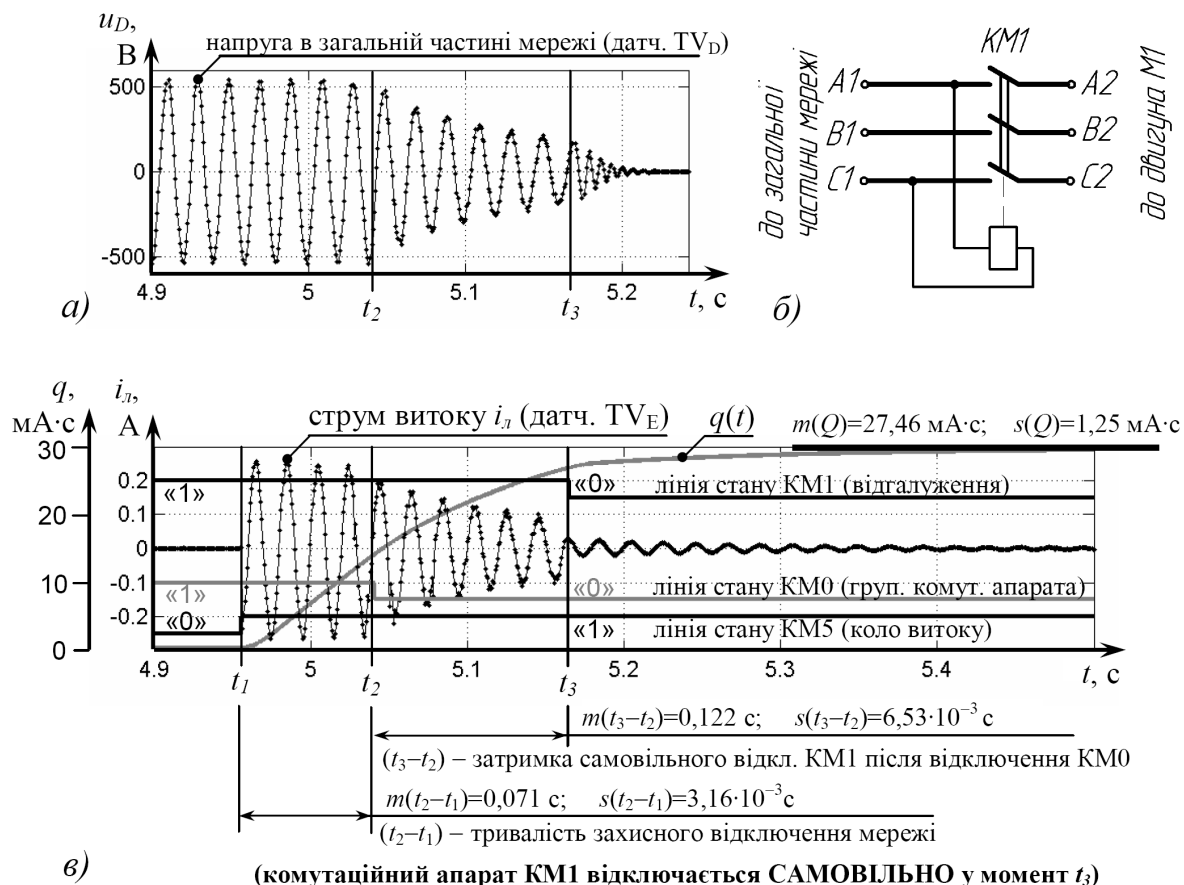


Рис. 3.30. Осцилограми, отримані в експерименті II з дослідження стану кола виточу струму на землю при самовільному відключенні комутаційного апарата KM1 відгалуження під час вибігу двигуна M1: а – напруга в загальній частині мережі; б – схема підключення котушки KM1; в – струм виточу i_n , крива $q(t)$ накопичення з перебігом аварійного процесу кількості електрики через опір кола виточу та лінії стану КА

З метою дослідження ефективності примусового гасіння зворотної ЕРС двигуна M1 після захисного відключення мережі проводилося в експерименті IV застосовано трифазний закорочувач KM4, приєднаний до фаз відгалуження на виході контактора KM1 (рис. 3.32, а), який вмикався за командою системи керування стендом в найкоротший термін після відключення KM0. Вибіркові параметри затримки закорочення становлять

(додаток Б, табл. Б.2): $m(t_5 - t_2) = 0,014$ с, $s(t_5 - t_2) = 5,09 \cdot 10^{-3}$ с, де t_5 – момент здійснення закорочення.

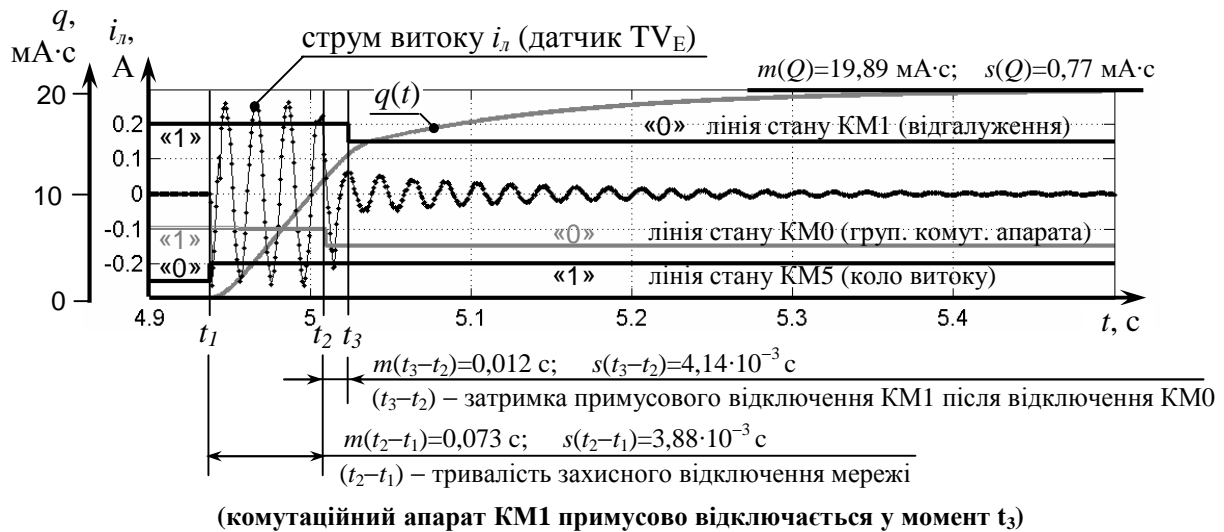


Рис. 3.31. Осцилограма миттєвих значень струму витоку i_l в експерименті III – дослідження впливу зворотної ЕРС двигуна М1 на стан кола витоку струму на землю за умови примусового відключення комутаційного апарата відгалуження КМ1 в найкоротший термін після захисного відключення мережі; крива $q(t)$ наращування з часом кількості електрики через опір кола витоку; лінії стану комутаційних апаратів системи

Експериментальні осцилограми струму витоку (рис. 3.32, б) підтверджують наявність аперіодичної складової в кривій струму після закорочення фаз відгалуження, яка обумовлена процесом розряду ємностей ізоляції відгалуження на активний опір ізоляції та опір кола витоку. Вибіркові параметри розподілення загальної кількості електрики за час аварійного процесу через опір кола витоку в разі виконання закорочення фаз відгалуження становлять (додаток Б, табл. Б.3): $m(Q) = 15,54$ мА·с та $s(Q) = 0,91$ мА·с. Ефективність застосування захисного відключення підтверджується найнижчим вибірковою середнім величини Q в експерименті IV порівняно з результатами експериментів I–III.

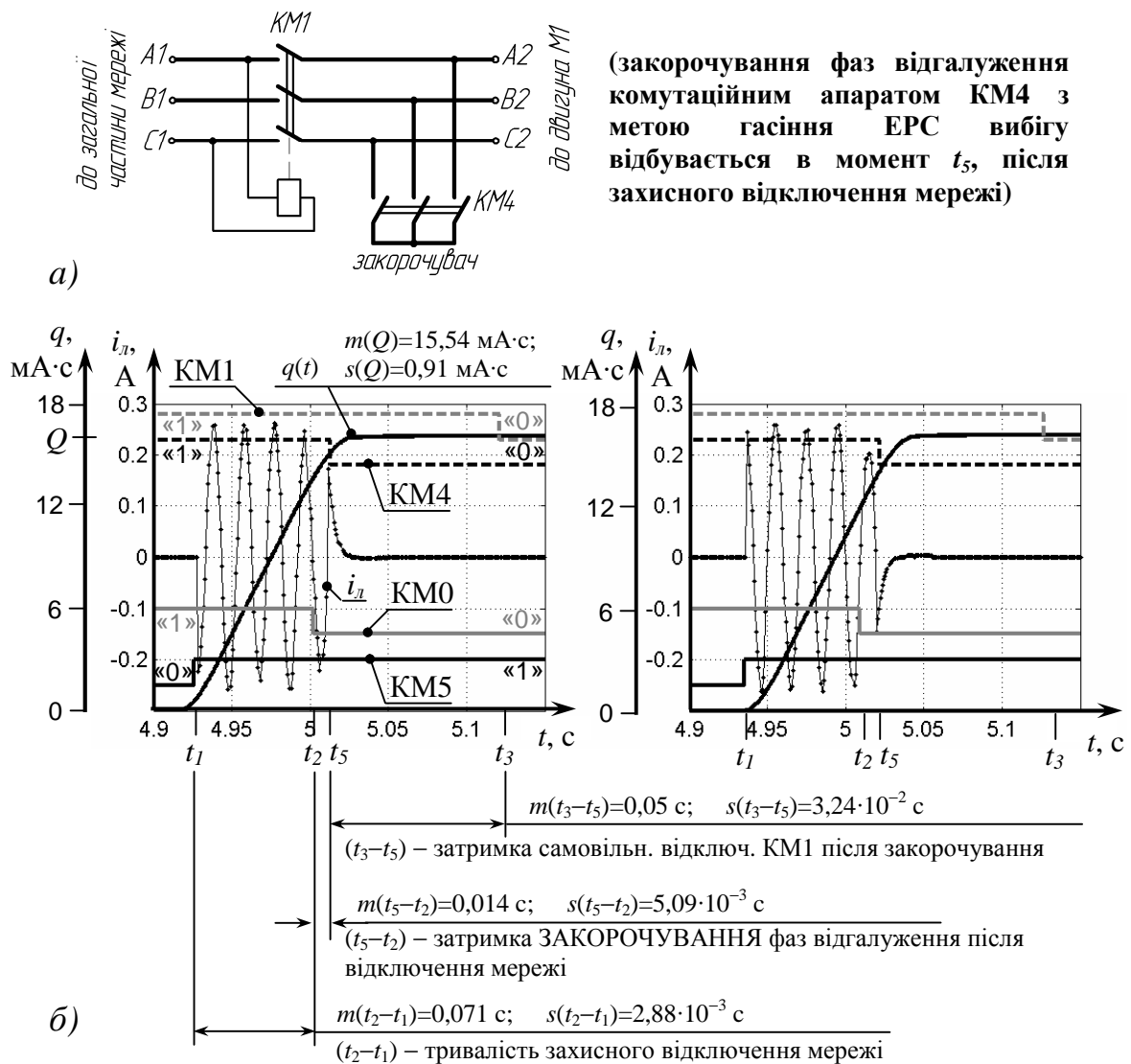


Рис. 3.32. Результати експеримента IV (гасіння зворотної ЕРС двигуна М1): а – схема підключення закорочувача; б – осцилограми струму витоку i_n для додатної та від’ємної фази i_n в момент закорочування; криві $q(t)$ накопичення з часом кількості електрики через опір кола витоку; лінії стану КА

Визначення величини миттєвого струму в колі витоку на землю дозволяє розрахувати окремі параметри системи, зокрема, сталі часу затухання ЕРС вибігу двигунів, величини кількості електрики в колі витоку струму на землю.

Параметри розподілення вибірок загальної кількості електрики Q через опір тіла людини (коло витоку струму на землю) за час аварійного процесу, отримані шляхом комп’ютерного моделювання стану кола витоку на землю в умовах експериментів I–IV, наведені в табл. Б.4 (додаток Б). Відносна

різниця між теоретичними та експериментальними вибірковими середніми величини Q для даних експериментів не перевищує 4%. Графічне порівняння аналітичних та емпіричних вибірок значень Q (рис. 3.33) виконане з використанням фігур, що відображають основні чисельні характеристики розподілення імовірностей (рис. Б.1, додаток Б). Діаграма свідчить, що інтердецильна широта величини Q за наявності гасіння зворотної ЕРС двигуна М1 відзначена найнижчими, серед експериментів I–IV, показниками загальної кількості електрики через опір кола витoku, що підтверджує ефективність примусового закорочення фаз відгалуження мережі в контексті підвищення електробезпеки експлуатації ЕТК.

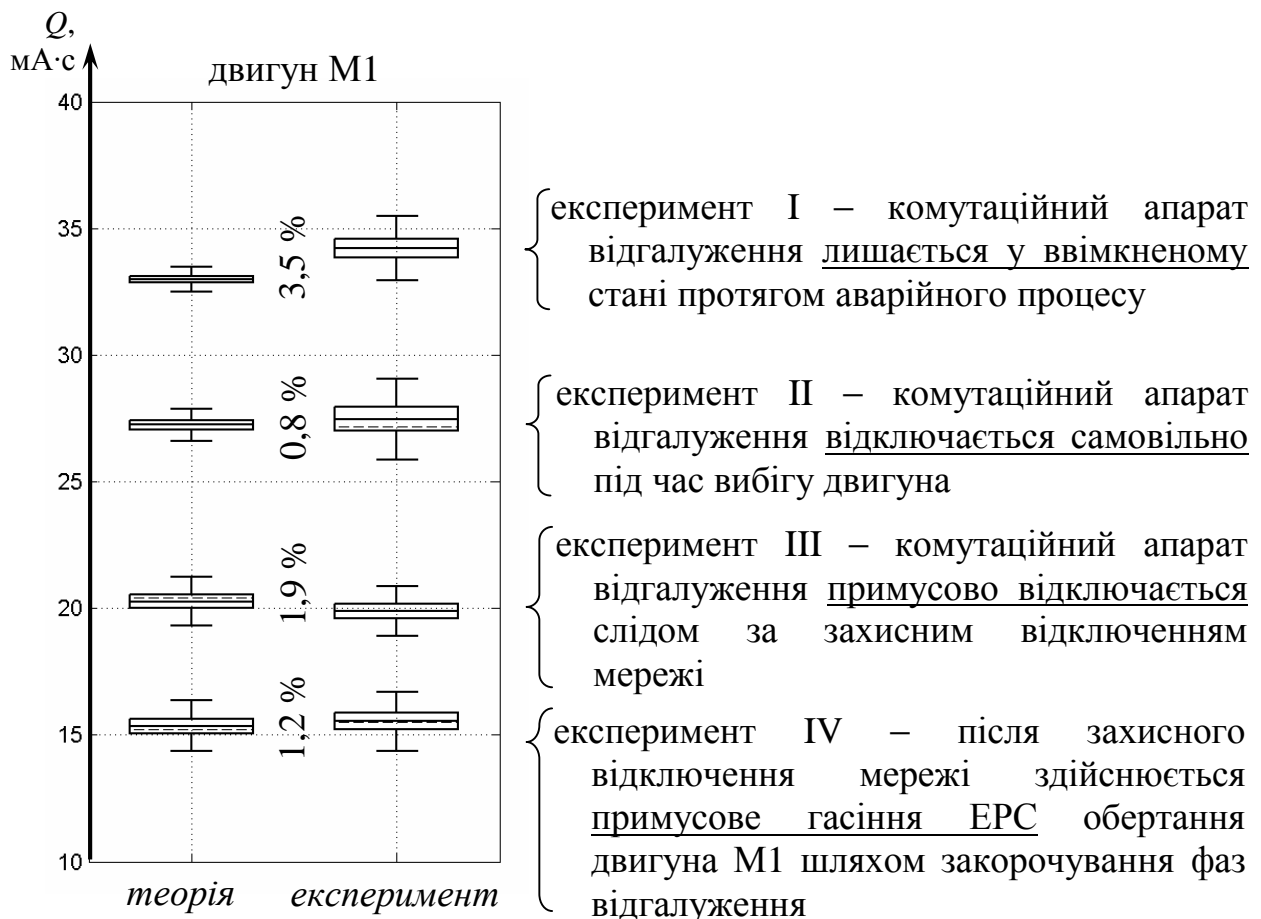


Рис. 3.33 Фігури, що ілюструють статистичні характеристики вибірок загальної кількості електрики Q через опір кола витoku (1 кОм) за час аварійного процесу при дослідженні впливу двигуна М1 на стан аварійної точки в умовах експериментів I–IV, отримані експериментальним та аналітичним шляхом; різниця між теоретичними та емпіричними вибірковими середніми вказана у відсотках

Аналогічним чином отримані експериментальні дані стосовно інших комбінацій станів елементів електротехнічного комплексу.

Осцилограма струму витоку на землю за умови збереження ввімкненого стану комутаційного апарата КМ2 відгалуження двигуна М2 (експеримент V, рис. 3.34) наведена на рис. 3.35, б. Протягом аварійного процесу параметри ізоляції, що впливають на стан кола витоку, лишаються незмінними. Тому після захисного відключення мережі у момент t_2 амплітуда струму витоку знижується експоненціально зі сталою часу T_2 , не зазнаючи стрибкоподібної зміни. Вибіркові значення загальної кількості електрики Q характеризуються (додаток Б, табл. Б.3) вибірковим середнім $m(Q)=81,13$ мА·с при мірі розсіяння $s(Q)=3,66$ мА·с.

Дослідження стану кола витоку при самовільному відключенні контактора КМ2 під час вибігу двигуна М2 відповідає умовам експерименту VI. Котушку керування КМ2 підключено до фаз А та С загальної частини мережі. Вибіркові характеристики затримки самовільного відключення контактора у момент t_3 після відключення мережі (момент t_2) становлять (додаток Б, табл. Б.2): $m(t_3 - t_2)=0,366$ с, $s(t_3 - t_2)=1,29 \cdot 10^{-2}$ с. Стрибкоподібне зниження амплітуди затухаючого струму витоку після момента t_3 ілюструє експериментальна осцилограма на рис. 3.36.

Примусове гасіння зворотної ЕРС вибігу двигуна М2, як спосіб підвищення безпеки стану кола витоку струму на землю, досліджувалося в експерименті VII. Умови його проведення аналогічні гасінню ЕРС обертання двигуна М1: трифазний закорочувач (контактор КМ4) підключений до фаз другого відгалуження (рис. 3.37). Затримка виконання закорочення після захисного відключення мережі визначалася характеристиками: $m(t_5 - t_2)=0,01$ с та $s(t_5 - t_2)=6,24 \cdot 10^{-3}$ с, де t_5 – момент здійснення закорочення.

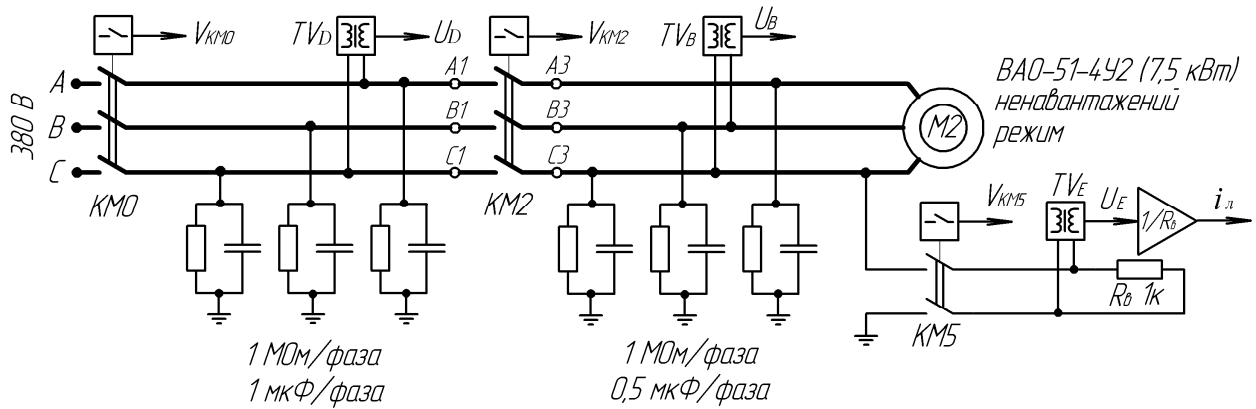


Рис. 3.34. Конфігурація дослідницького стенда для виявлення впливу зворотної ЕРС двигуна (М2) на стан кола однофазного виточу струму на землю в умовах експериментів V – VII

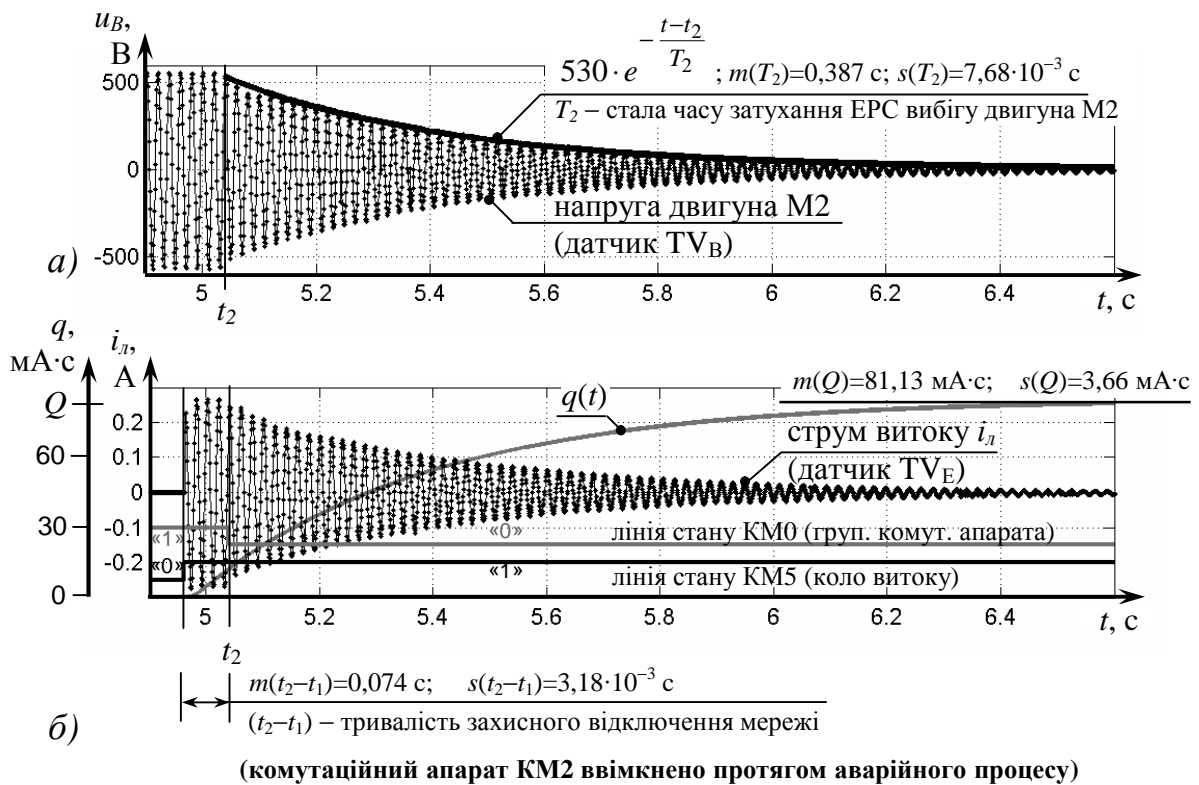
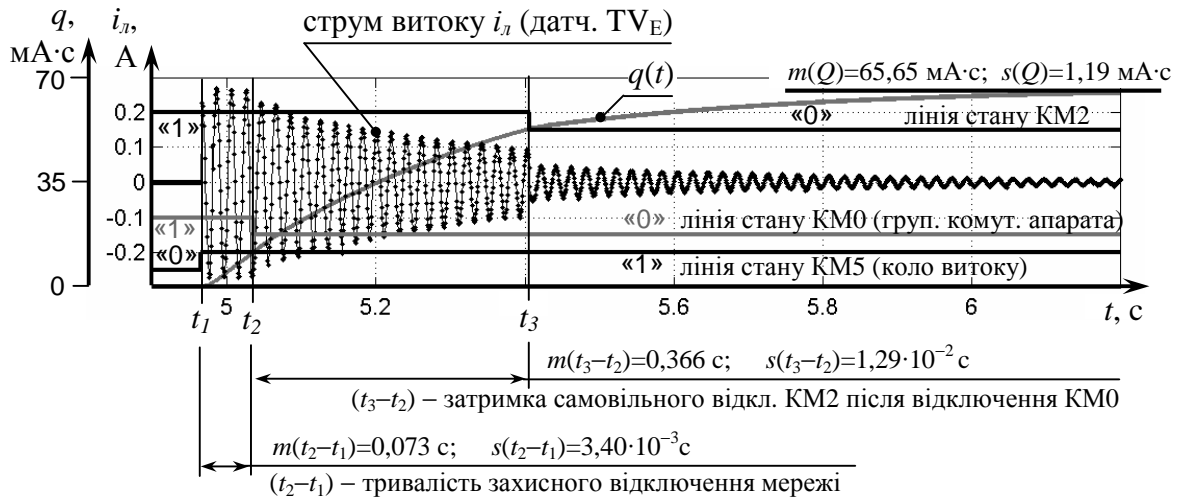
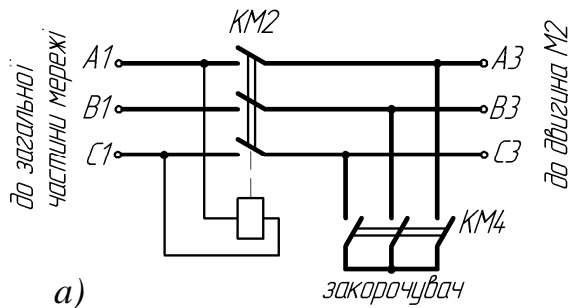


Рис. 3.35. Осцилограми, отримані в експерименті V з дослідження впливу зворотної ЕРС двигуна М2 на стан кола виточу струму на землю при збереженні ввімкненого стану комутаційного апарата відгалуження КМ2 протягом аварійного процесу: а – напруга за затискачах двигуна М2; б – миттєві значення струму виточу i_L , крива $q(t)$ нарощування з часом кількості електрики через опір кола виточу 1 кОм та лінії стану комутаційних апаратів

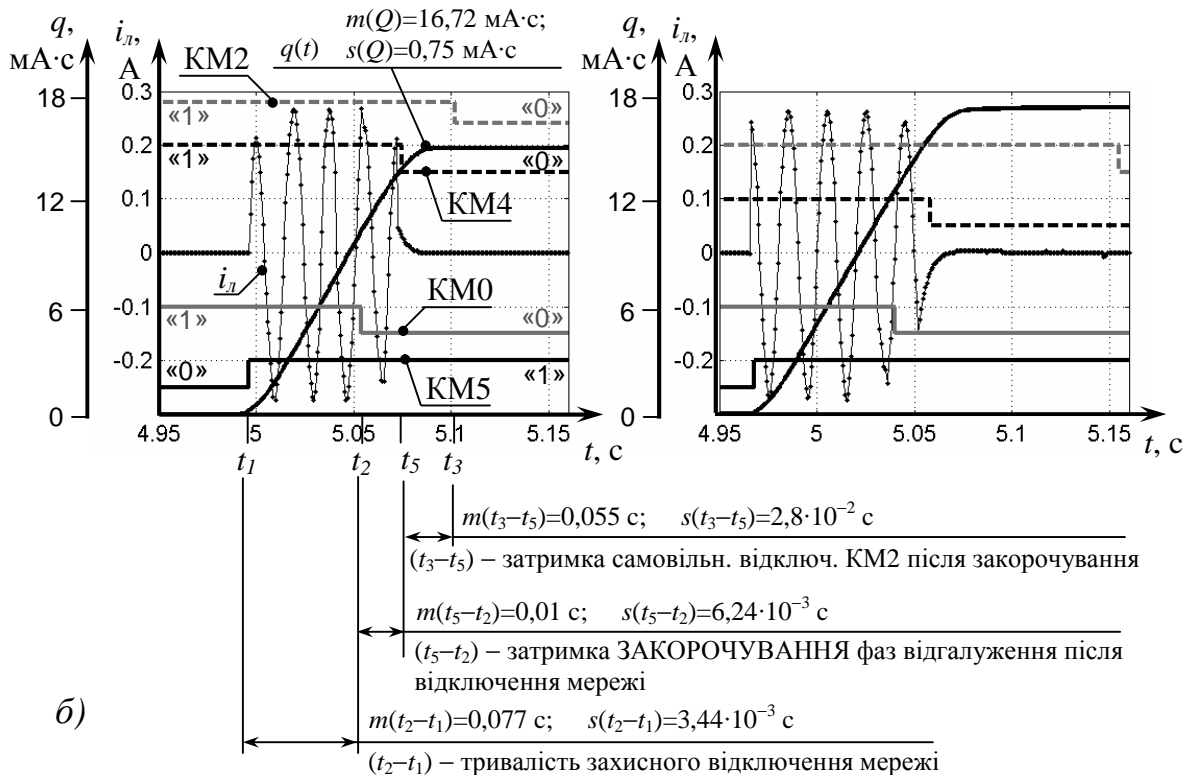


(комутаційний апарат КМ2 відключається САМОВІЛЬНО у момент t_3)

Рис. 3.36. Осцилограми, отримані в експерименті VI при самовільному відключенні КМ2 під час вибігу двигуна М2: струм витoku i_n , крива $q(t)$



(закорочування фаз відгалуження комутаційним апаратом КМ4 з метою гасіння ЕРС вибігу відбувається в момент t_5 , після захисного відключення мережі)



б)

Рис. 3.37. Результати експеримента VII (гасіння зворотної ЕРС двигуна М2): а – схема підключення закорочувача; б – осцилограми струму витoku i_n для додатної та від'ємної фази i_n в момент закорочування; криві $q(t)$

Гасіння ЕРС обертання двигуна призводить до знеструмлення котушки керування контактора відгалуження КМ2 та його самовільного відключення у момент t_2 . Затримка такого відключення після моменту t_5 визначається наступними параметрами розподілення (додаток Б, табл. Б.2): $m(t_3 - t_5) = 0,055$ с, $s(t_3 - t_5) = 2,8 \cdot 10^{-2}$ с.

Ефективність застосування закорочення фаз відгалуження в якості способу підвищення безпеки стану ЕТК підтверджується результатами експерименту VII. Вибіркова середня загальної кількості електрики Q через опір кола витoku за час аварійного процесу складає $m(Q) = 16,72$ мА·с при стандартному відхиленні $s(Q) = 0,75$ мА·с (додаток Б, табл. Б.3), що в 4 рази менше, ніж при відсутності гасіння ЕРС (експеримент VI).

Перевіркою відповідності результатів математичного моделювання емпіричним даним для умов експериментів V–VII встановлено, що теоретично обрахована стала часу зменшення ЕРС двигуна М2 (0,389 с) належить 95%-му довірчому інтервалові (0,384 с; 0,390 с) для оцінки середньої величини експериментально знайденої сталої часу (додаток Б, табл. Б.1). Це підтверджує адекватність, з імовірністю похибки 0,05, обґрунтованих в розділі II математичних залежностей експериментальним даним в контексті моделювання режиму вибігу двигуна.

Отримані з використанням математичного моделювання середні значення кількості електрики Q відповідають експериментальним величинам у межах похибки 6% (додаток Б, табл. Б.4), що ілюструє порівняльна діаграма на рис. 3.38.

Дослідження режиму ненавантаженого вибігу двигуна М3 (ВАО–51–4У2; 7,5 кВт) та впливу його зворотної ЕРС на стан кола витoku струму на землю за умови самовільного відключення комутаційного апарата КМ3 третього відгалуження дослідницького стенда (рис. 3.39, а) відповідає умовам експерименту VIII. Самовільне відключення контактора КМ3

відбувається після захисного відключення мережі із затримкою, яка характеризується вибіркоvim математичним очікуванням $m(t_3 - t_2) = 0,263$ с при стандартному відхиленні $s(t_3 - t_2) = 1,15 \cdot 10^{-2}$ с (додаток Б, табл. Б.2). В момент t_3 зміни конфігурації мережі амплітуда експоненціально затухаючого струму витоку зменшується, оскільки аварійне відгалуження було відключене від загальної частини мережі (рис. 3.39, в). Статистичні характеристики загальної кількості електрики Q в умовах експерименту VIII наступні (додаток Б, табл. Б.3): $m(Q) = 76,43$ мА·с; $s(Q) = 1,2$ мА·с.

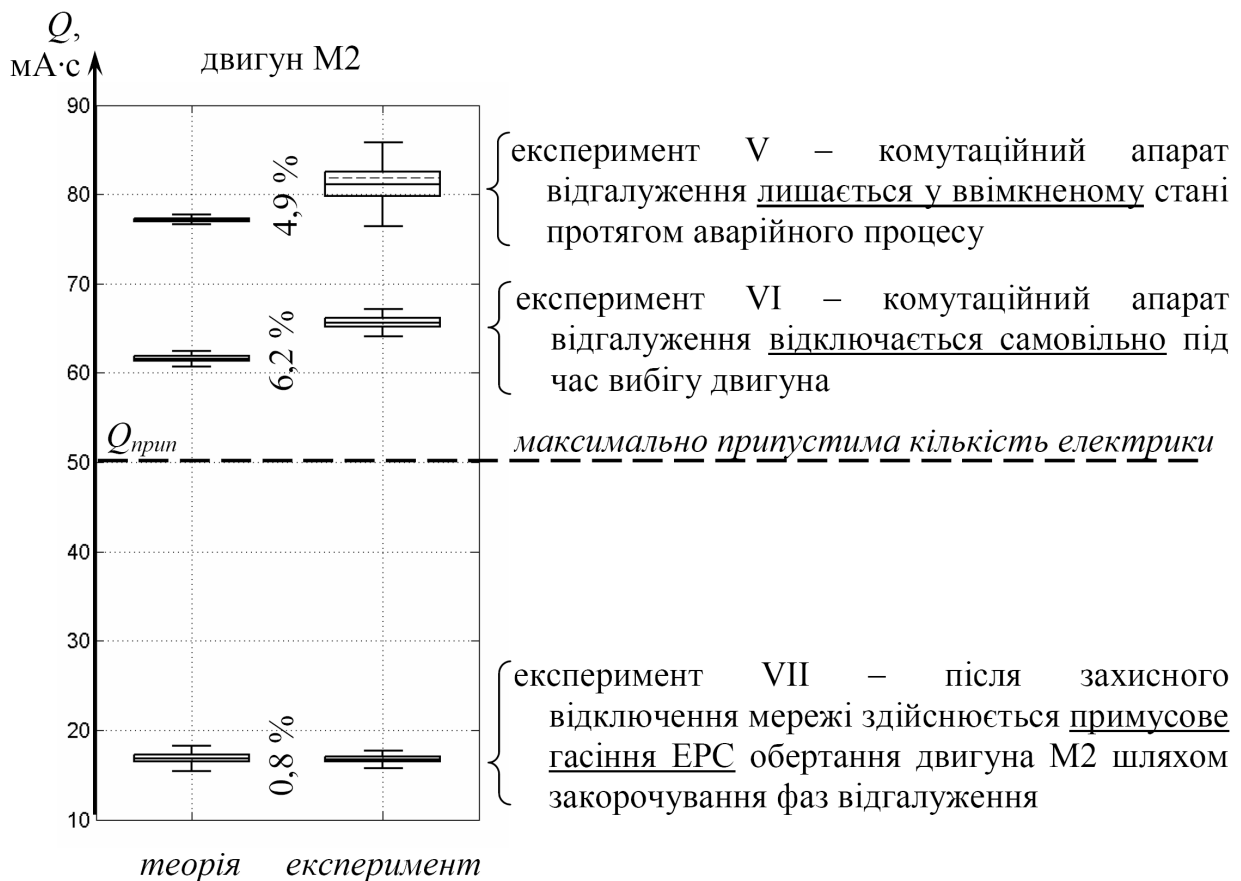


Рис. 3.38. Фігури, що ілюструють статистичні характеристики вибірок загальної кількості електрики Q через опір кола витоку (1 кОм) за час аварійного процесу при дослідженні впливу двигуна М2 на стан аварійної точки в умовах експериментів V – VII, отримані аналітичним та експериментальним шляхом; вказана різниця між теоретичними та емпіричними вибілковими середніми у відсотках

Стан кола витoku струму на землю в ЕТК, що включає два відгалуження з двигунами М1 та М2, досліджувався в експериментах ІХ – ХІV (табл. 3.8). Конфігурація дослідницького стенда передбачає виникнення витoku струму у фазі С другого відгалуження (рис. 3.40).

Стала часу T_{12} затухання групової ЕРС вибігу двигунів М1 та М2 визначається в експерименті ІХ, за умовами якого комутаційні апарати КМ1 та КМ2 відгалужень лишаються у ввімкненому стані під час режиму вибігу. Вибіркові значення T_{12} , визначені за осцилограмами напруги 30 реалізацій експеримента (рис. 3.41, а), мають наступні статистичні характеристики (додаток Б, табл. Б.1): $m(T_{12})=0,261$ с; $s(T_{12})=7,35 \cdot 10^{-3}$ с.

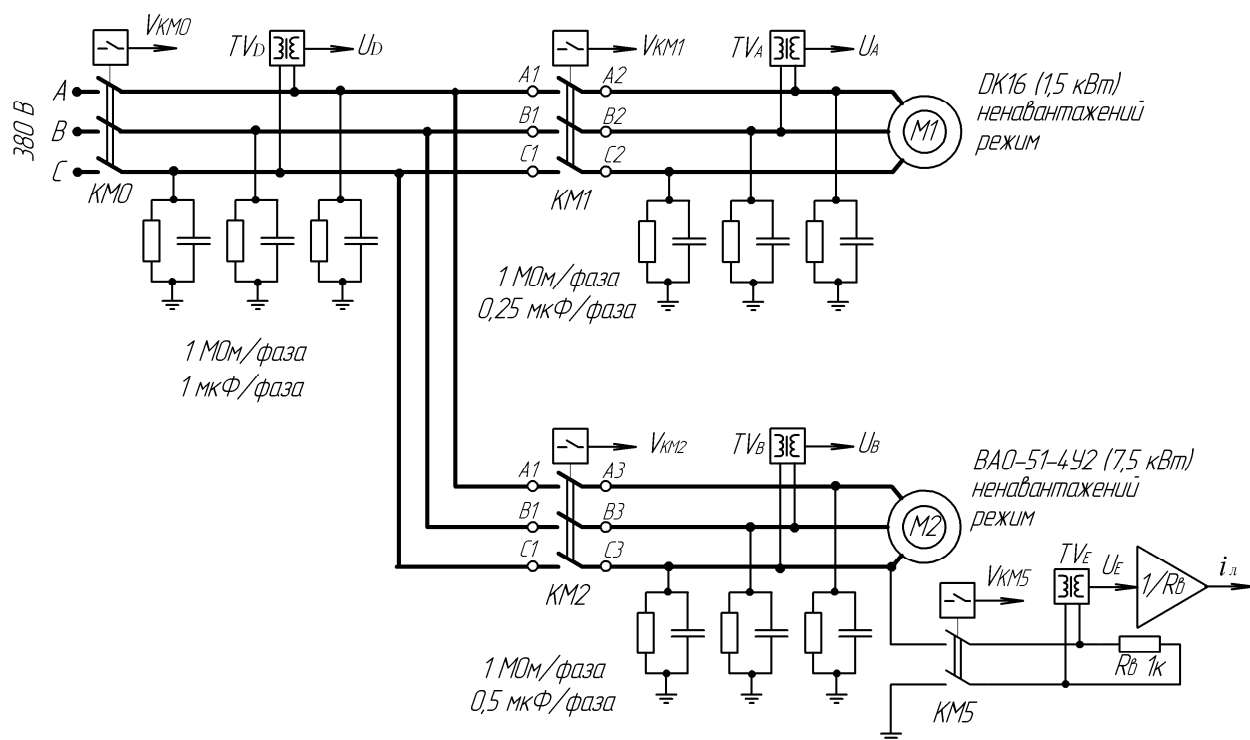
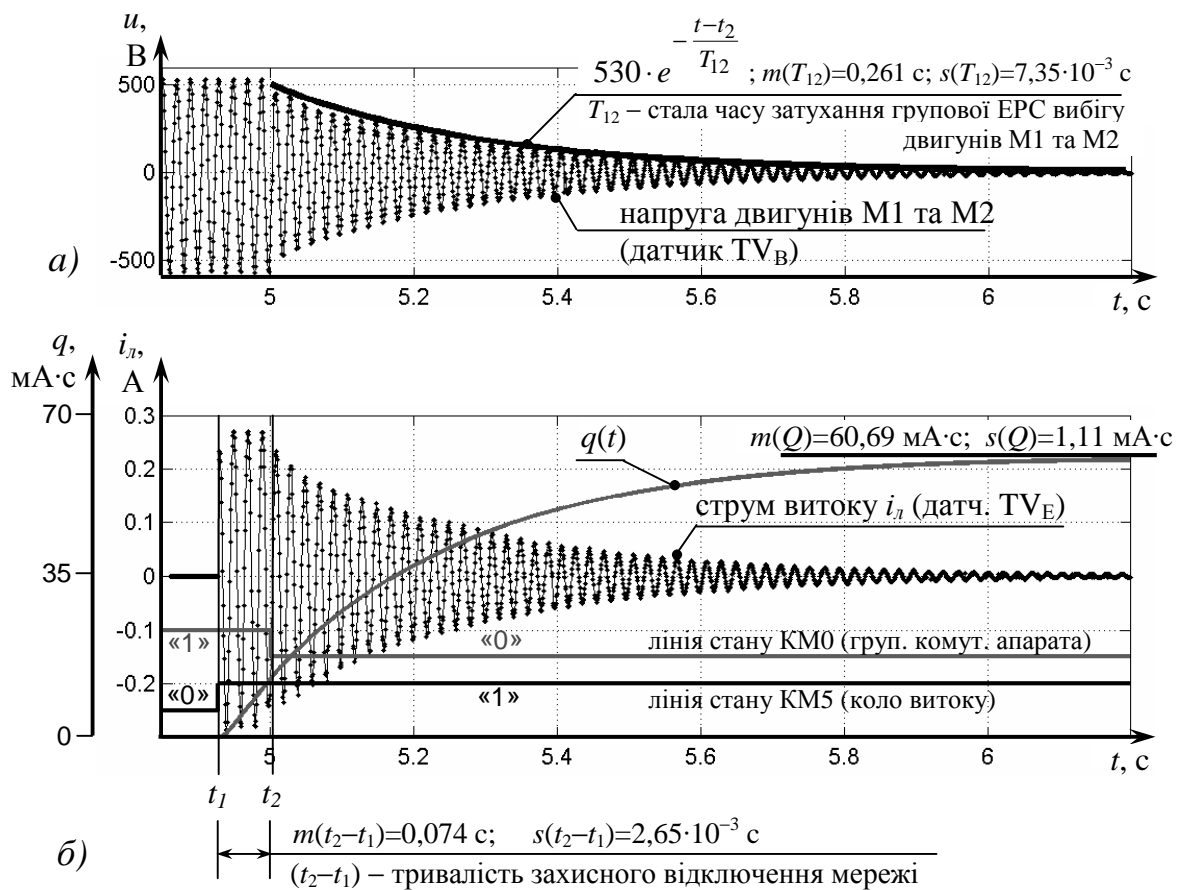


Рис. 3.40. Конфігурація дослідницького стенда для виявлення впливу зворотної ЕРС двигунів М1 та М2 на стан кола однофазного витoku струму на землю в умовах експериментів ІХ – ХІV

При збереженні ввімкненого стану КМ1 та КМ2 (рис. 3.41, б) за час аварійного процесу через опір 1 кОм кола витoku струму на землю проходить кількість електрики із параметрами розподілення $m(Q)=60,69$ мА·с та $s(Q)=1,11$ мА·с (додаток Б, табл. Б.3).



(комутаційні апарати КМ1 та КМ2 ввімкнено протягом аварійного процесу)

Рис. 3.41. Осцилограми, отримані в експерименті ІХ з дослідження впливу зворотної ЕРС двигунів М1 та М2 на стан кола витоку струму на землю у відгалуженні №2 при збереженні ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень КМ1 та КМ2 протягом аварійного процесу: а – лінійна напруга мережі; б – миттєві значення струму витоку i_n , крива $q(t)$ нарощування з часом кількості електрики через опір кола витоку 1 кОм та лінії стану комутаційних апаратів

Підключення котушок керування КМ1 та КМ2 до фаз загальної частини мережі в експерименті ХІ обумовлює їх самовільне відключення під час вибігу двигунів (рис. 3.42). Після самовільного відключення КМ1 (в момент t'_3) та КМ2 (t''_3) двигуни переходять до режиму одиночного вибігу, генеруючи відповідні ЕРС обертання, що затухають не за однаковим законом. Зниження напруги в кожному відгалуженні визначається параметрами та умовами вибігу відповідних двигунів, що підтверджується показаннями датчиків TV_A та TV_B (рис. 3.42, в, д).

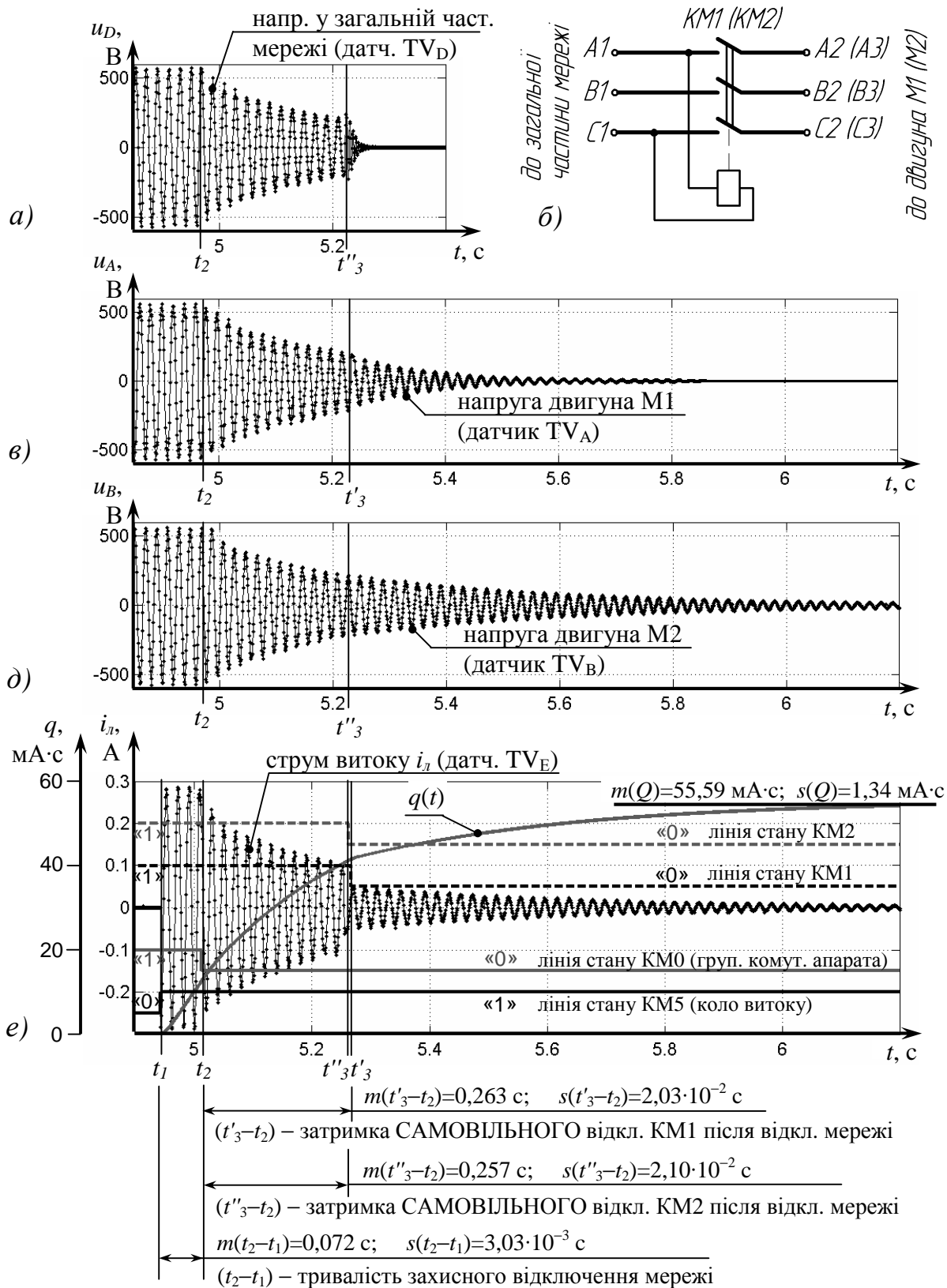
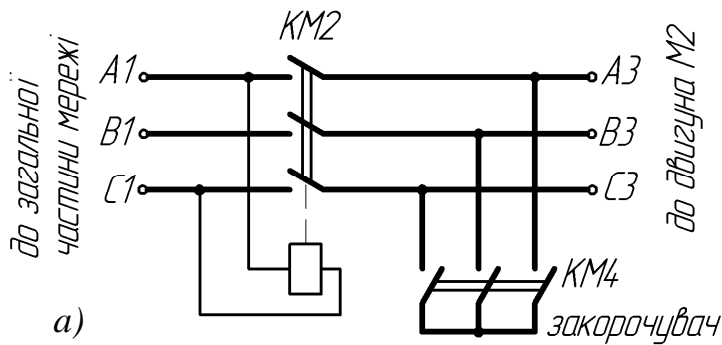


Рис. 3.42. Осцилограми напруги у загальній частині мережі (а), відгалуженнях двигунів М1 (в) та М2 (д), стану кола витоку струму на землю (е) в умовах експерименту ХІ; схема підключення КА відгалужень (б)



(закорочування фаз відгалуження №2 комутаційним апаратом KM4 з метою гасіння ЕРС вибігу двигуна M2 відбувається в момент t_5 , після захисного відключення мережі)

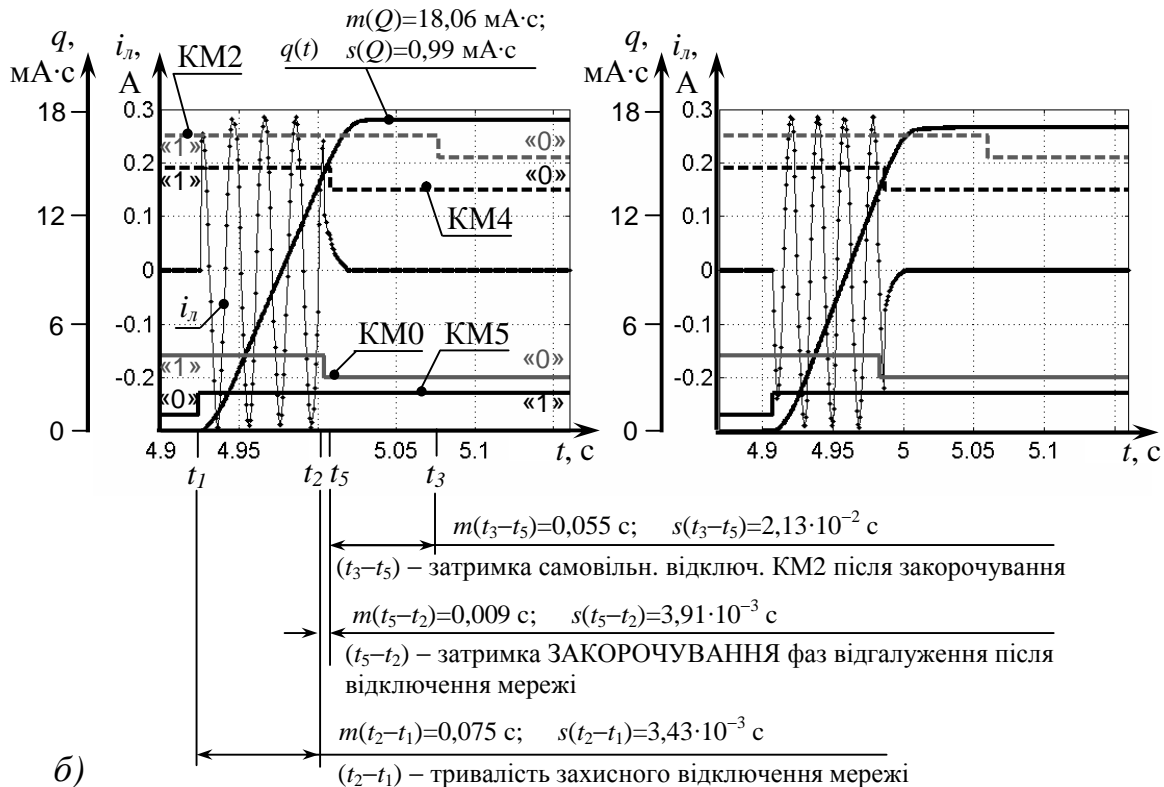


Рис. 3.43. Результати експерименту XIII (гасіння зворотної ЕРС двигуна M2): а – схема підключення закорочувача (штучна нульова точка ізолювана); б – осцилограми струму витоку i_l для додатної та від'ємної фази i_l в момент закорочування; криві $q(t)$ нарощування з часом кількості електрики через опір кола витоку; лінії стану комутаційних апаратів

Відключення контактора KM2 призводить до електричного ізолювання аварійного відгалуження, зміни параметрів ізоляції, що визначають стан кола витоку та, як наслідок, змінює характер затухання струму витоку (рис. 3.42, e). Загальна кількість електрики Q характеризується меншим, ніж при збереженні ввімкненого стану контакторів відгалужень в експерименті IX,

вибірковим математичним очікуванням: $m(Q)=55,59$ мА·с, при стандартному відхиленні $s(Q)=1,34$ мА·с (додаток Б, табл. Б.3).

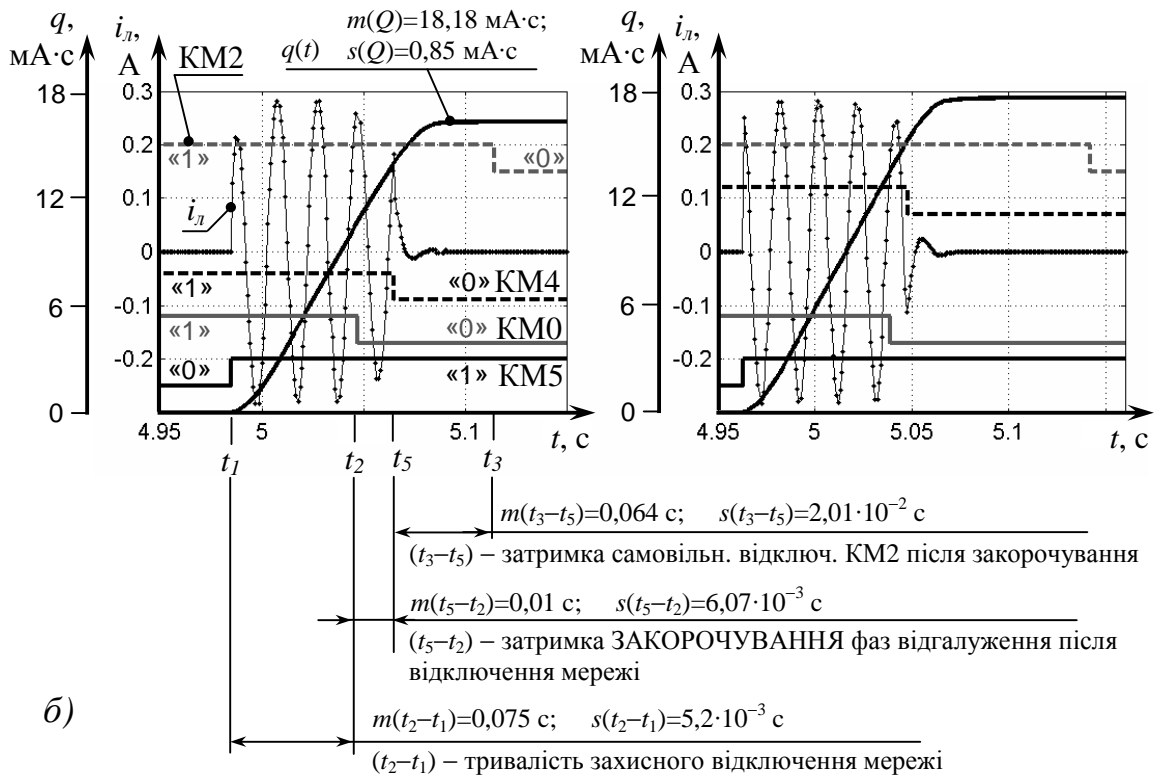
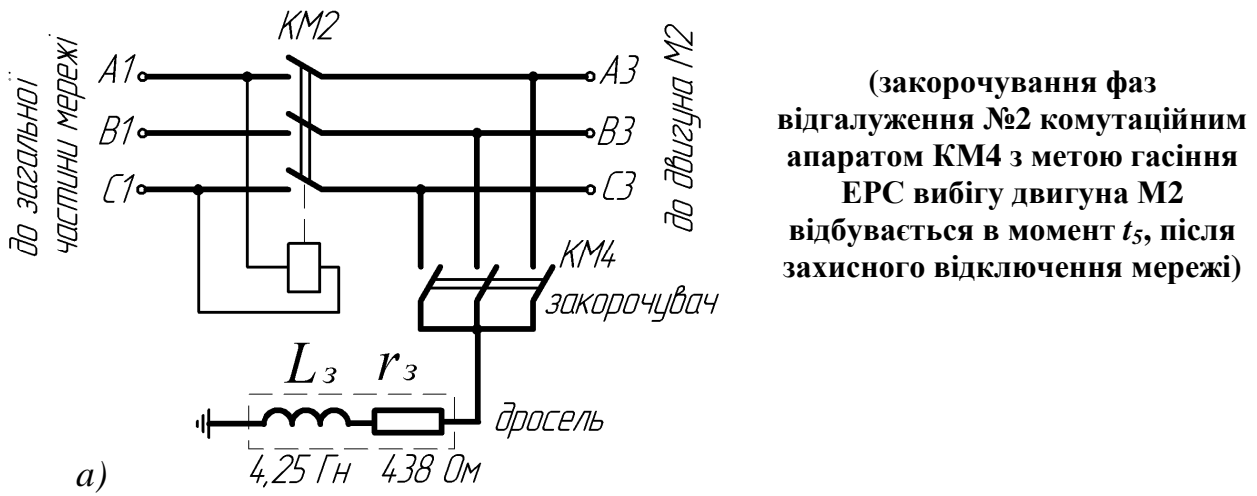


Рис. 3.44. Результати експеримента XIV (гасіння зворотної ЕРС двигуна M2): а – схема підключення закорочувача (штучна нульова точка підключена до шини «земля» через дросель); б – осцилограми струму витoku i_n для додатної та від'ємної фази i_n в момент закорочування; криві $q(t)$ нарощування з часом кількості електрики через опір кола витoku; лінії стану КА

Покращення безпеки стану кола витoku струму на землю досягнуто при використанні примусового гасіння ЕРС обертання двигунів після захисного відключення мережі шляхом закорочення фаз аварійного відгалуження.

Штучно утворена при закороченні фаз нульова точка в експерименті XIII є ізолюваною (рис. 3.43, а), а в експерименті XIV – під'єднується до загальної шини «земля» через дросель (рис. 3.44, а). Це істотно не змінює статистичні характеристики загальної кількості електрики Q (додаток Б, табл. Б.3).

Стан штучно утвореної нульової точки визначає характер перехідного процесу в колі витоку після здійснення закорочення: аперіодичний в першому випадку (рис. 3.43, б) та коливальний в другому (рис. 3.44, б).

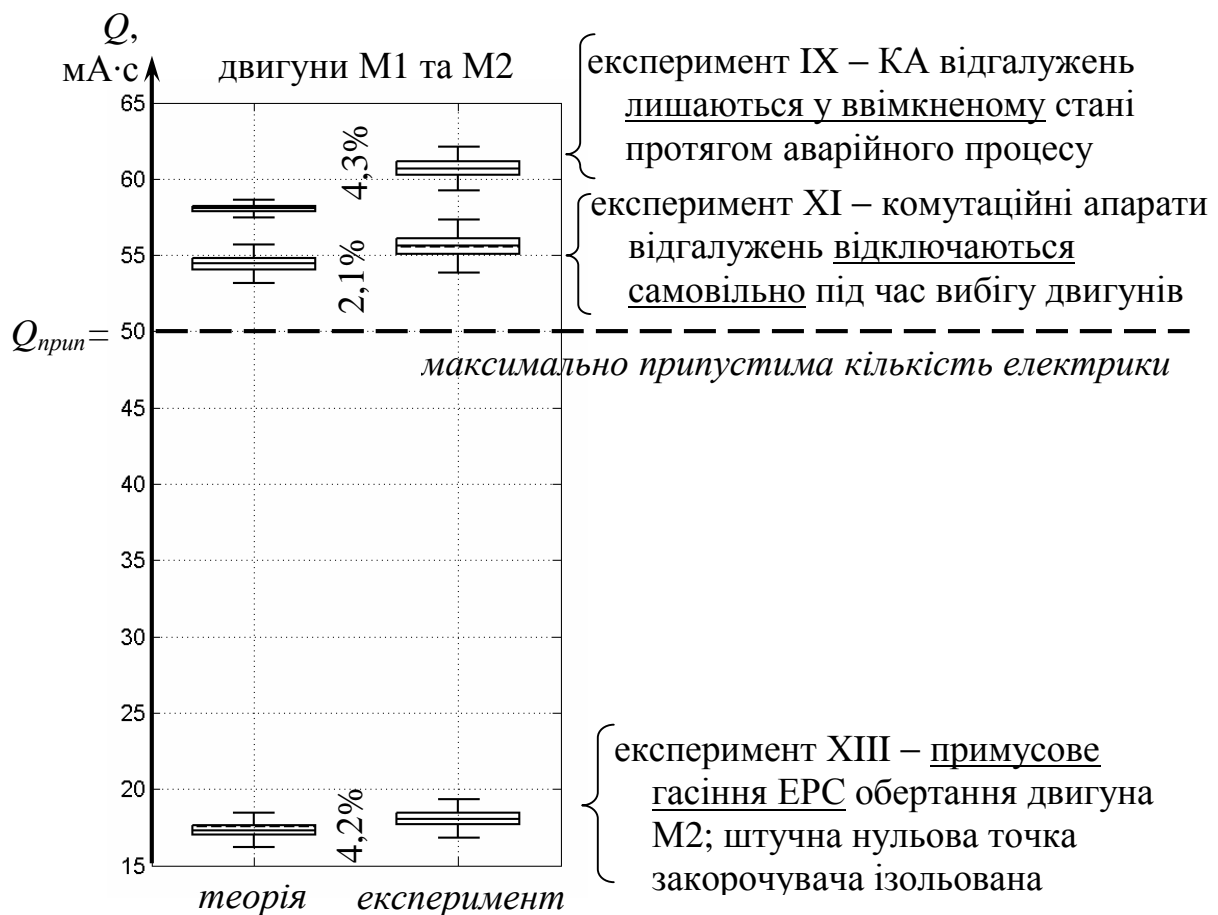


Рис. 3.45. Фігури, що ілюструють статистичні характеристики вибірок загальної кількості електрики Q через опір кола витоку (1 кОм) за час аварійного процесу при дослідженні впливу двигунів М1 та М2 на стан аварійної точки в умовах експериментів IX, XI, XIII, отримані експериментальним та аналітичним шляхом; різниця між теоретичними та емпіричними вибірковими середніми вказана у відсотках

Обраховане за результатами комп'ютерного моделювання значення сталої часу T_{12} зменшення ЕРС групового вибігу двигунів М1 та М2 (0,263 с) належить 95%-му довірчому інтервалу (0,258с; 0,264с) для оцінки

математичного очікування даного параметра за експериментальними даними (додаток Б, табл. Б.1). Вибіркові середні величини Q , обраховані для умов експериментів IX, XI, XIII та XIV шляхом математичного моделювання, відповідають аналогічним експериментальним значенням в межах 5%-ї похибки (рис. 3.45; додаток Б, табл. Б.4). Цим підтверджується адекватність обґрунтованої в розділі II математичної моделі результатам експериментальних досліджень.

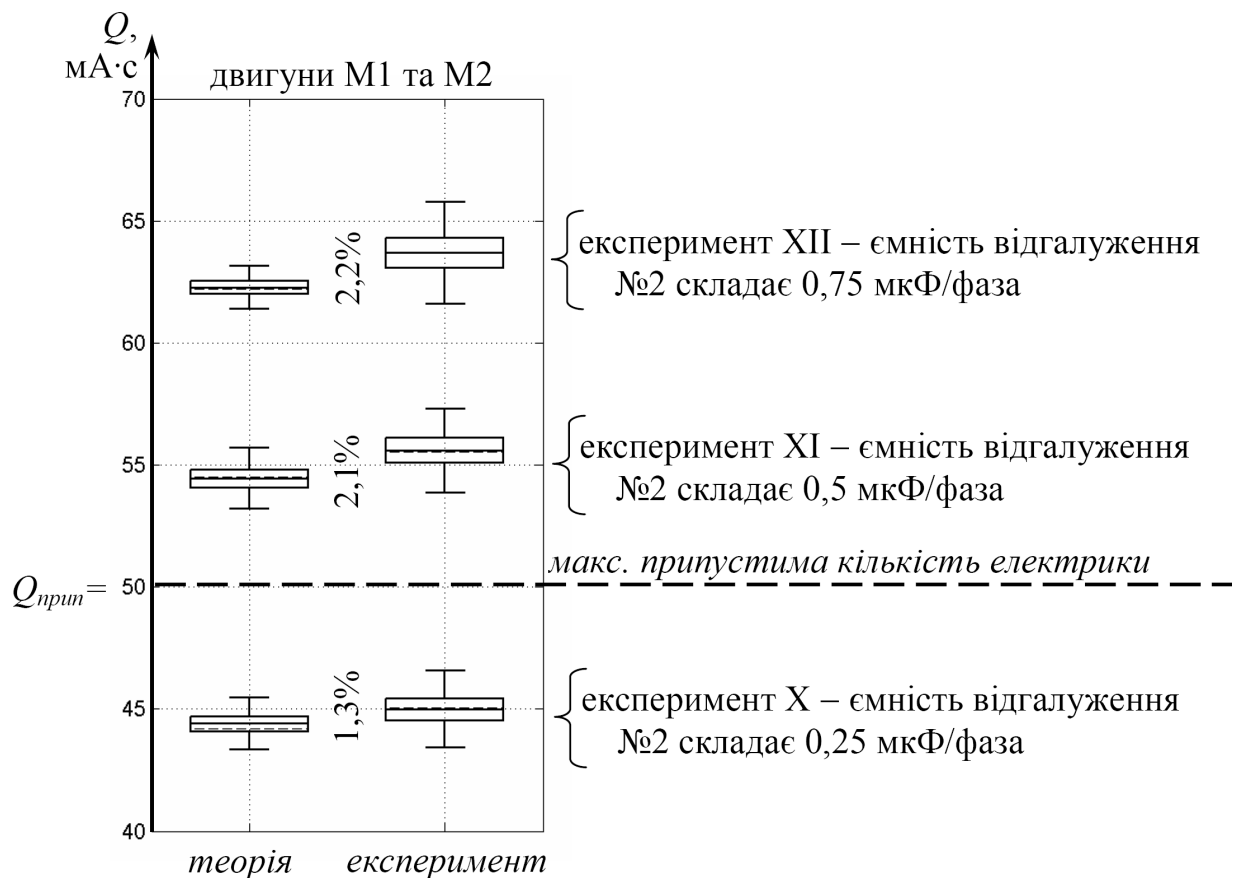


Рис. 3.46. Фігури, що відображають статистичні характеристики вибірок загальної кількості електрики Q через опір кола витоку (1 кОм) за час аварійного процесу за умови функціонування двигунів M1 та M2 (комутаційні апарати відключаються самовільно під час вибігу двигунів) при різних значеннях ємності ізоляції кабеля аварійного відгалуження (№2) в умовах експериментів X – XII, отримані експериментальним та аналітичним шляхом; різниця між теоретичними та емпіричними вибірковими середніми вказана у відсотках

Математичне очікування Q знижується зі зниженням ємності аварійного відгалуження (експеримент X) та підвищується з її збільшенням (експеримент XII) порівняно із умовами експерименту XI (рис. 3.46). Розходження між вибірковими середніми, отриманими експериментальним шляхом та за допомогою математичного моделювання, для умов експериментів X–XII не перевищує 3% (додаток Б, табл. Б.4).

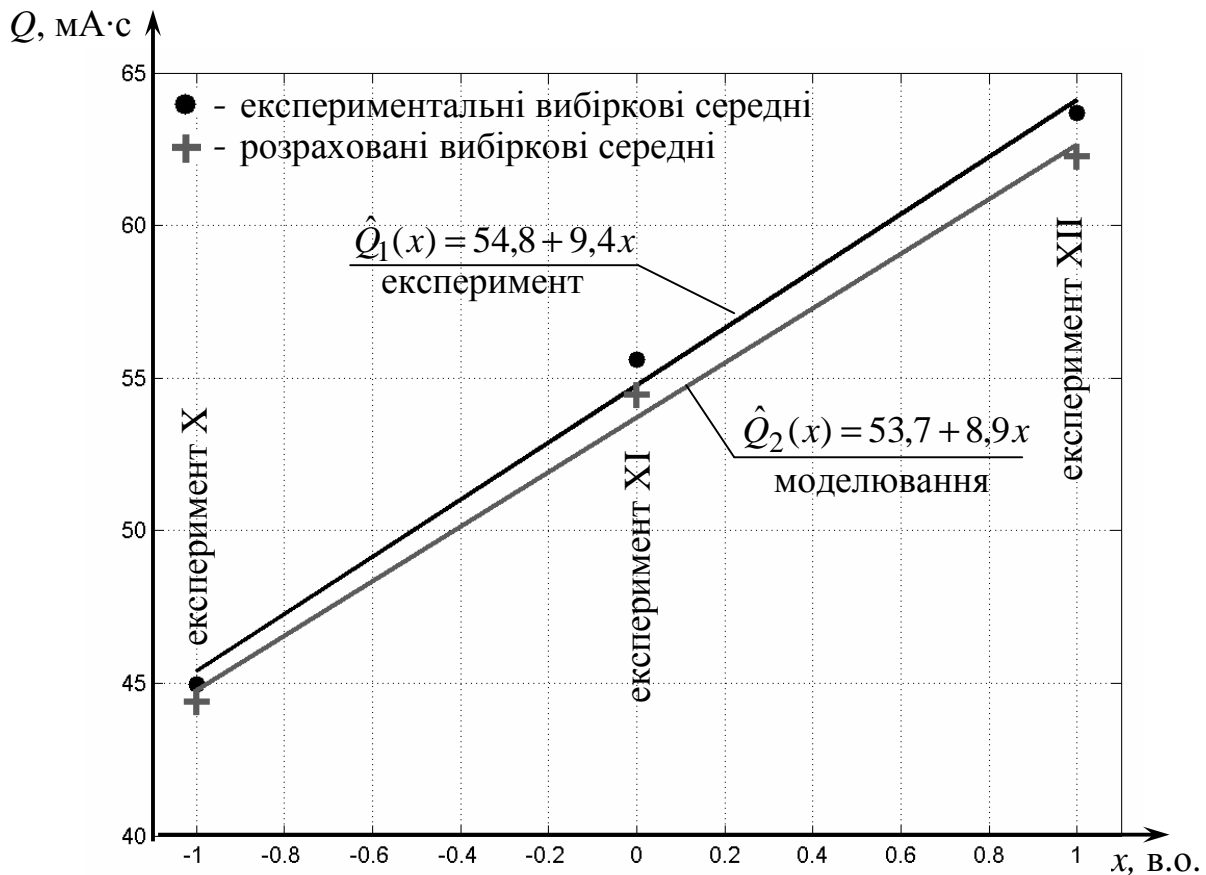


Рис. 3.47. Регресійні прямі, отримані за експериментальними даними (\hat{Q}_1) та шляхом моделювання (\hat{Q}_2), що ілюструють залежність загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу від ємності ізоляції кабелю аварійного відгалуження для умов експериментів X–XII

Вибірки Q , отримані в експериментах X–XII емпіричним та теоретичним шляхом, оброблені за наведеною у додатку А методикою з метою дослідження кореляційного зв'язку між Q та параметрами ізоляції кабелю аварійного відгалуження. Вибіркові значення коефіцієнта лінійної кореляції становили 0,98 для експериментальних та 0,99 для отриманих

шляхом моделювання даних. Параметри регресійних прямих, розраховані за експериментальними даними (рис. 3.47):

$$\hat{Q}_1(x) = 54,8 + 9,4x, \quad (3.35)$$

що узгоджується з результатами математичного моделювання:

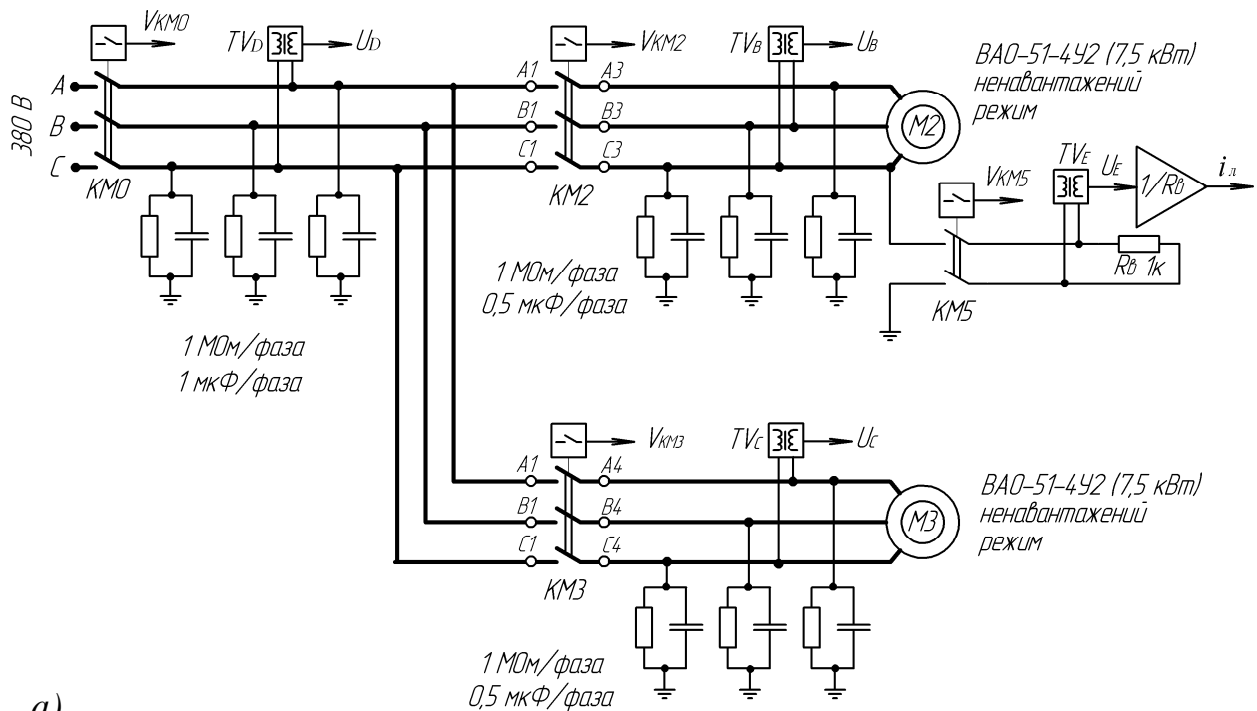
$$\hat{Q}_2(x) = 53,7 + 8,9x, \quad (3.36)$$

де x – ємність ізоляції аварійного відгалуження (№2) у кодованій формі: $x = -1$ відповідає ємності 0,25 мкФ/фаза; $x = 0$ – ємності 0,5 мкФ/фаза; $x = 1$ – ємності 0,75 мкФ/фаза.

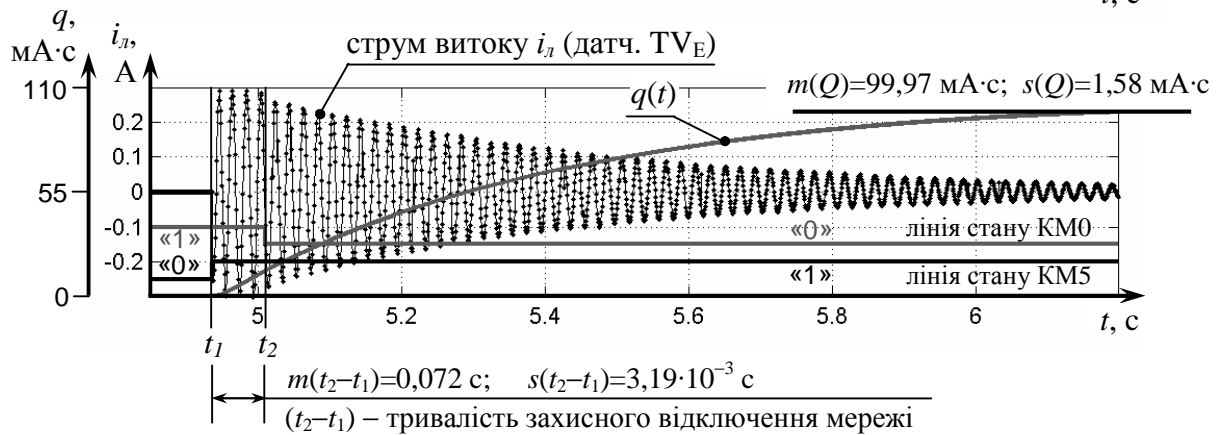
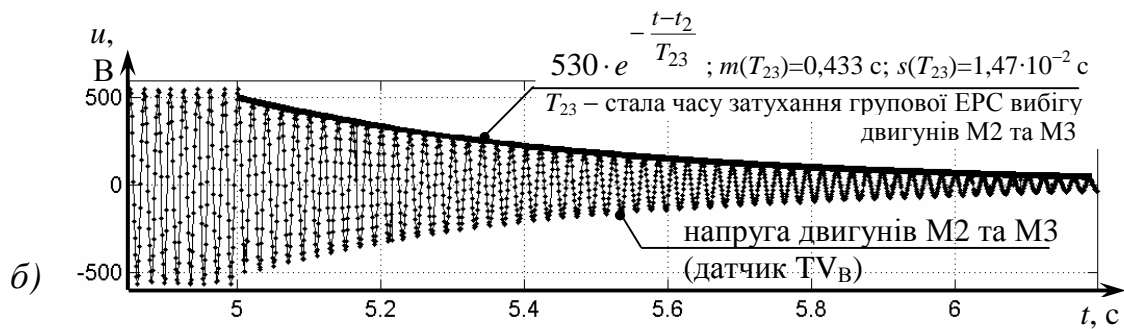
Запропонована методика має бути розповсюджена і на дослідження процесів в мережах з іншою кількістю двигунів і одночасністю існування впливових факторів (від ЕРС обертання двигунів) стосовно кола витоку струму на землю. Це ілюструється відповідними варіантами конфігурації схем стенду та осцилограмами параметрів, аналіз яких дозволяє зробити висновок про наявність потенційно небезпечних станів кола витоку струму на землю момент і після захисного відключення мережі (рис. 3.48-3.50).

Стан кола витоку струму на землю в електротехнічному комплексі, що включає двигуни М1, М2 та М3, досліджувався в експериментах XVII та XVIII (рис. 3.51). Емпірична оцінка сталої часу T_{123} затухання ЕРС групового вибігу даних двигунів (рис. 3.52, а) характеризується вибірковою математичною очікуванням $m(T_{123})=0,316$ с та стандартним відхиленням $s(T_{123})=7,5 \cdot 10^{-3}$ с (додаток Б, табл. Б.1). Довірчий інтервал для оцінки генеральної середньої величини T_{123} (0,313 с; 0,319 с) покриває теоретично обраховане значення 0,314 с з надійністю 0,95.

За умови збереження ввімкненого стану КМ1–КМ3 протягом вибігу двигунів (експеримент XVII, рис. 3.51), осцилограма струму в колі витоку на землю наведена на рис. 3.52, б, причому $m(Q)=80,28$ мА·с та $s(Q)=1,62$ мА·с (додаток Б, табл. Б.3).



а)



в)

(комутаційні апарати KM2 та KM3 ввімкнено протягом аварійного процесу)

Рис. 3.48. Конфігурація дослідницького стенда при функціонуванні двигунів M2 і M3 (а) та осцилограми напруги в мережі (б) і стану кола витoku струму на землю (в) в експерименті XV

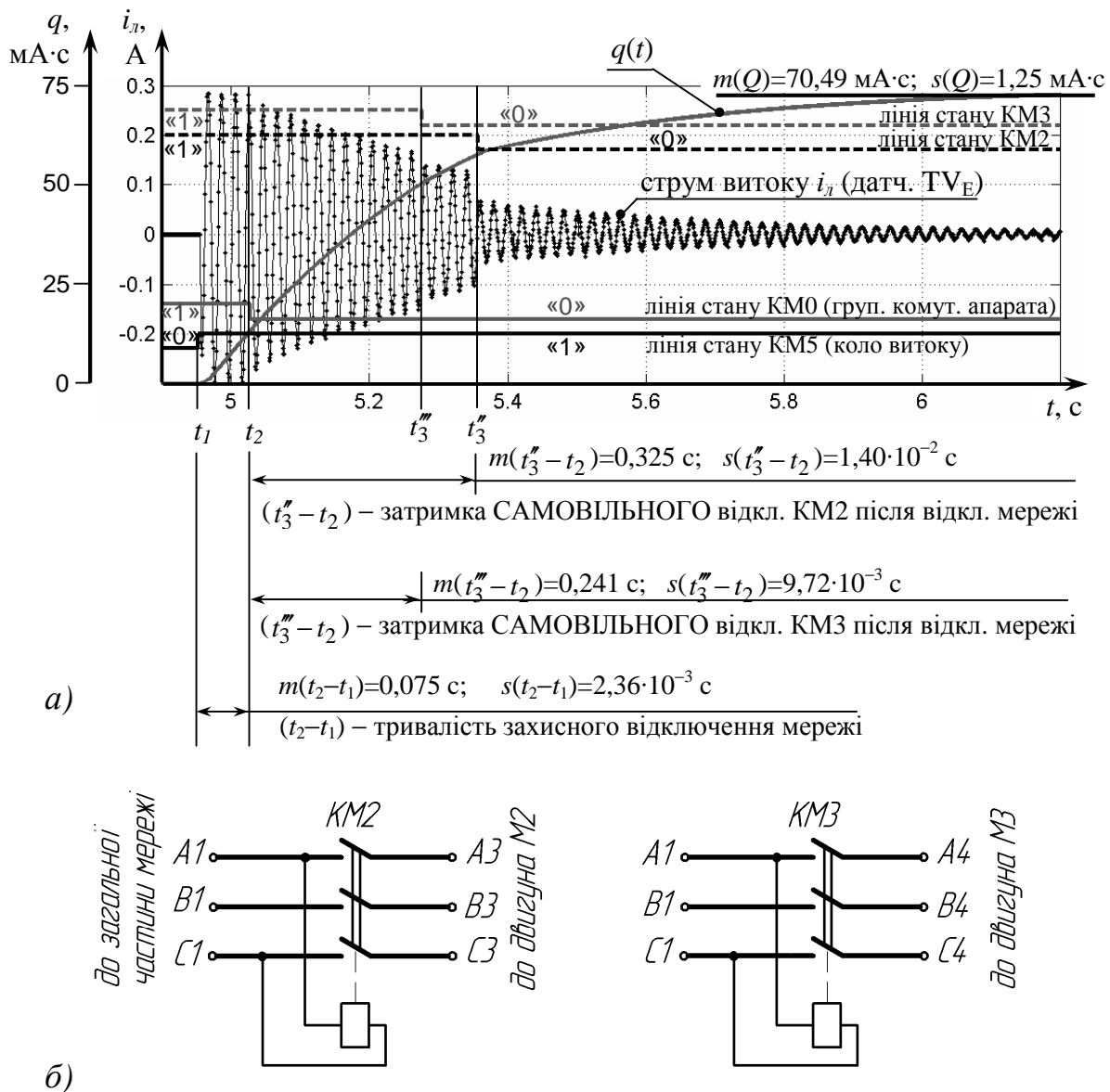


Рис. 3.49. Осцилограми стану кола виточу струму на землю (а) в умовах експерименту XVI; схема підключення котушок керування комутаційних апаратів відгалужень №2 та №3 (б)

В ході експеримента XVIII котушки КМ1–КМ3 підключені до загальної частини мережі, що обумовило їх самовільне відключення під час вибігу двигунів (рис. 3.51, 3.52). Вибіркове середнє загальної кількості електрики Q є меншим порівняно із попереднім дослідом та становить $m(Q) = 60,59 \text{ mA}\cdot\text{s}$ при стандартному відхиленні $s(Q) = 1,1 \text{ mA}\cdot\text{s}$ (додаток Б, табл. Б.3, рис. 3.53).

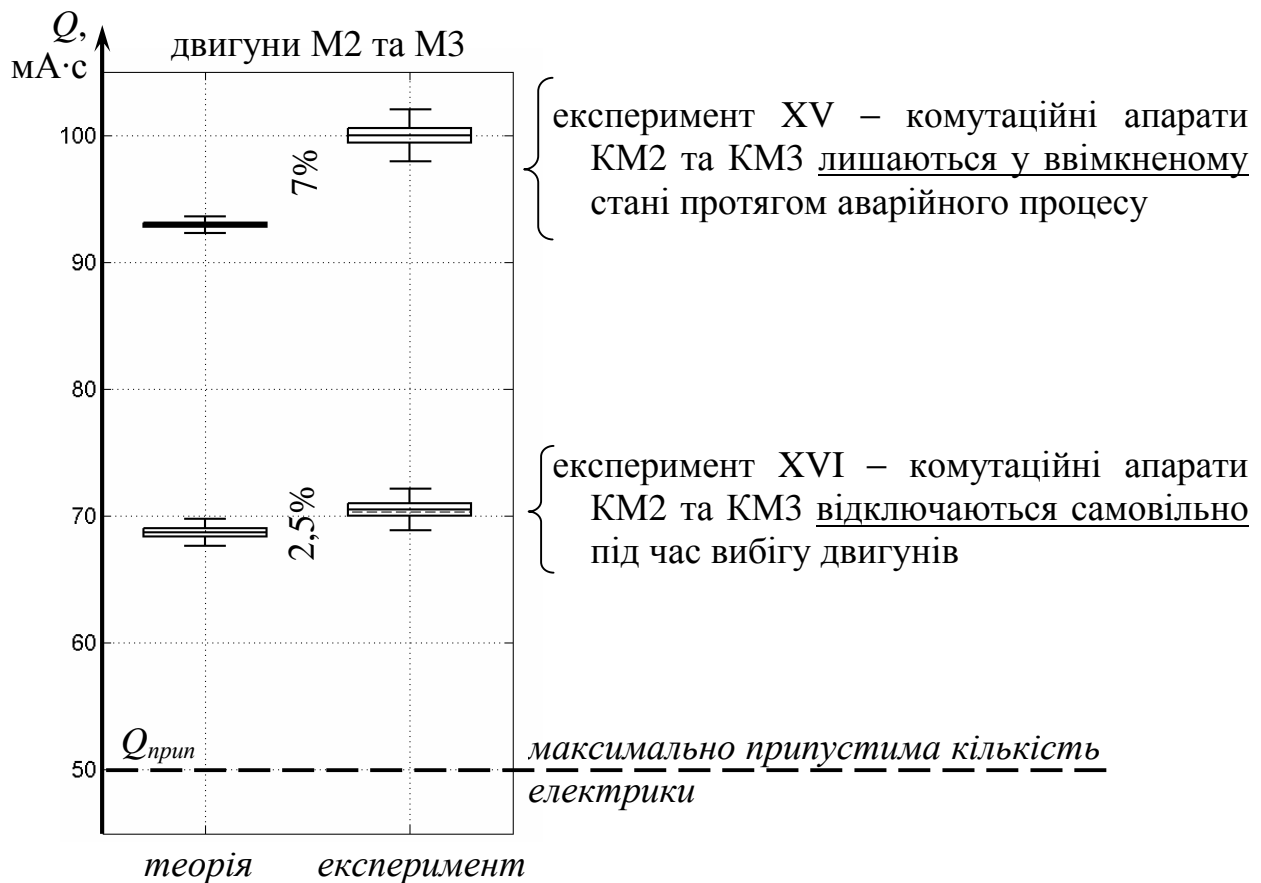


Рис. 3.50. Фігури, що ілюструють статистичні характеристики вибірок загальної кількості електрики Q через опір кола витоку (1 кОм) за час аварійного процесу при дослідженні впливу двигунів М2, М3 на стан аварійної точки в умовах експериментів XV та XVI, отримані експериментальним та аналітичним шляхом; вказана різниця між теоретичними та емпіричними вибірковими середніми у відсотках

Експериментальне підтвердження наявності залежності ступеня електроураження людини (величини та тривалості дії струму електроураження) від умов вибігу асинхронного двигуна в складі електротехнічного комплексу здійснене шляхом проведення експерименту в умовах реальної промислової трифазної мережі з номінальною лінійною напругою живлення 1140 В з урахуванням впливу зворотної ЕРС асинхронного двигуна ЭКВФ315LA4 номінальною потужністю 250 кВт.

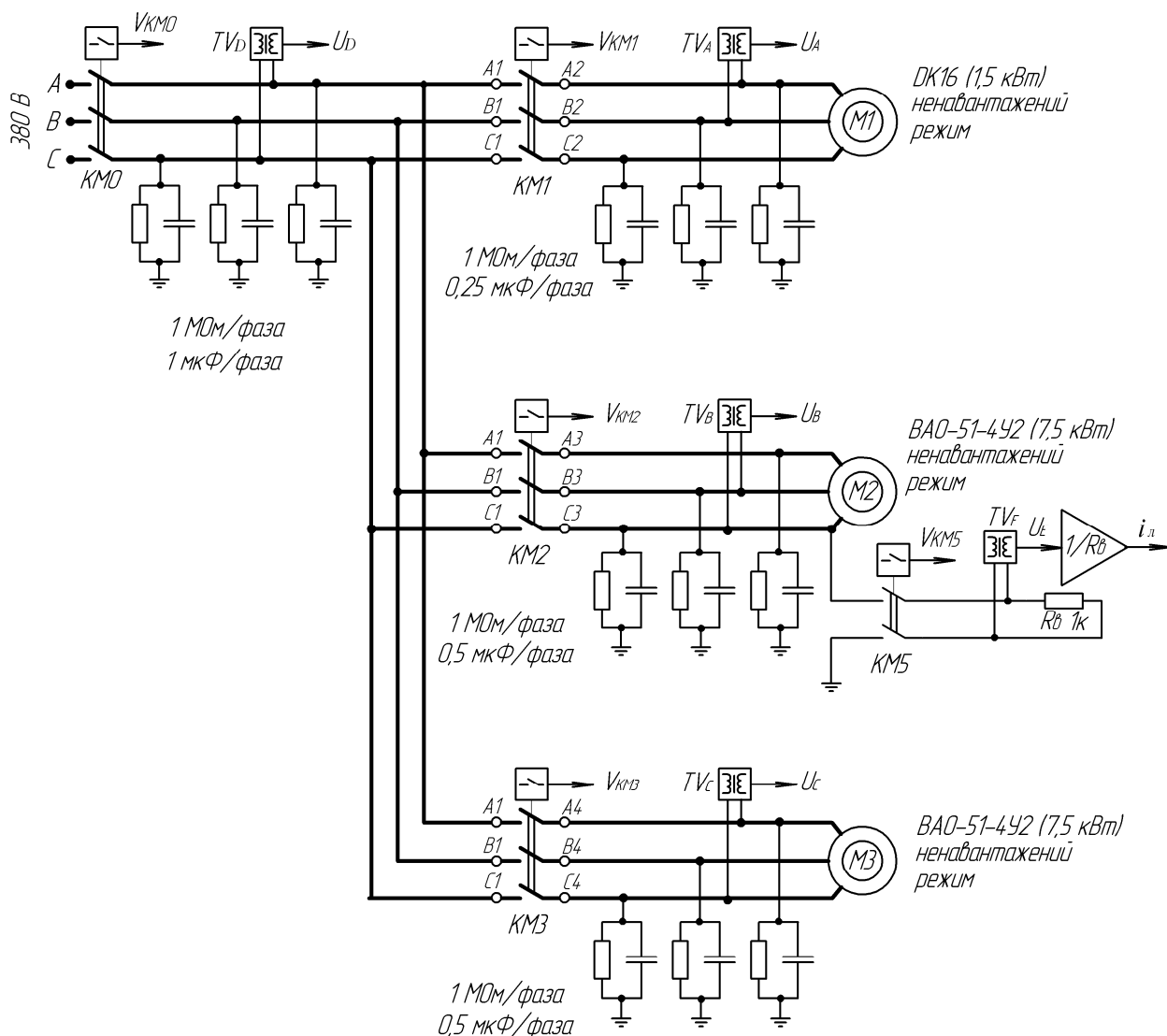


Рис. 3.51. Конфігурація дослідницького стенда для виявлення впливу зворотної ЕРС двигунів М1, М2 та М3 на стан кола однофазного витку струму на землю в умовах експериментів XVII та XVIII

Навантаження на валу двигуна створювалося за допомогою механічного та чотирьох порошкових електромагнітних гальм, що сукупно позначені Γ на схемі експериментального стенду (рис. 3.54). Ці гальма під'єднувалися до ротора двигуна за допомогою електромагнітної муфти EMM та редуктора P . Визначення зворотної ЕРС обертання досліджуваного

двигуна під час вибігу проводилося за допомогою трифазного лампового дільника напруги HL1–HL12 (рис. 3.56).

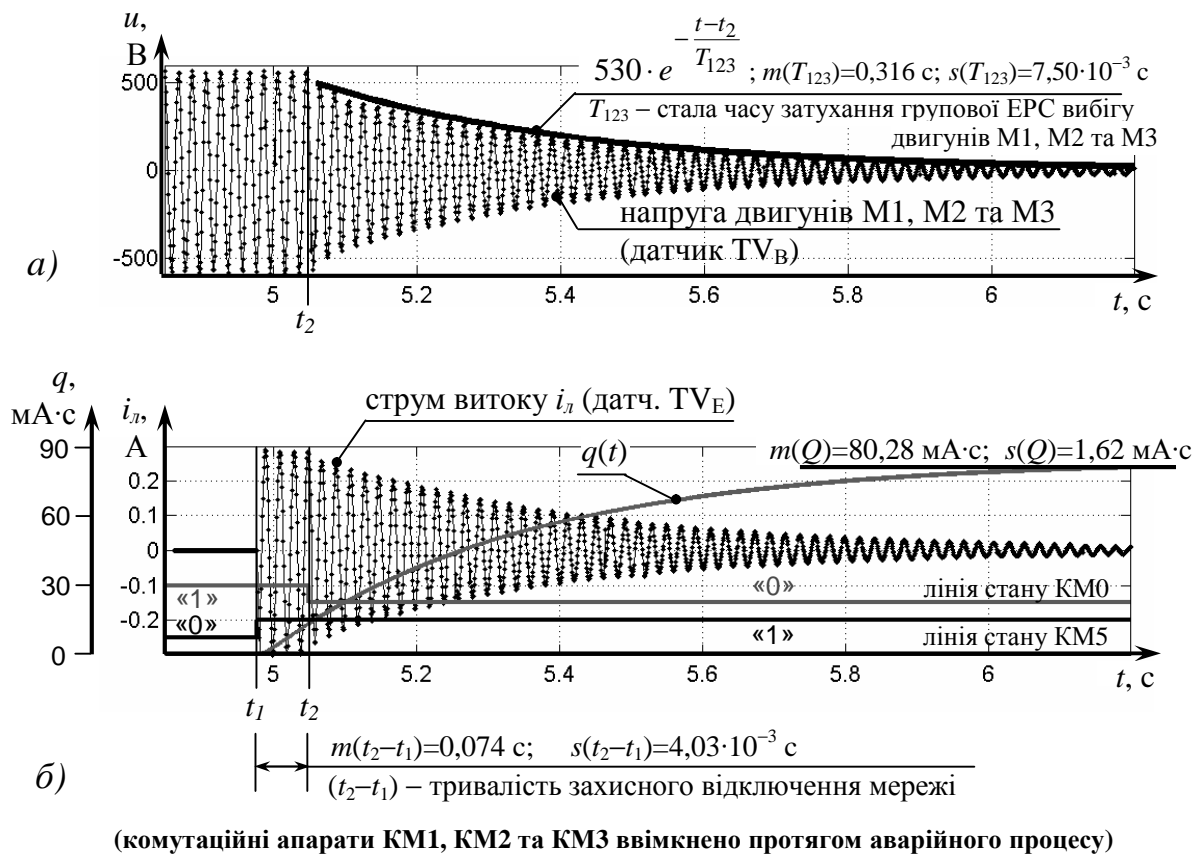


Рис. 3.52. Осцилограми, отримані в експерименті XVII: а – лінійна напруга мережі; б – миттєві значення струму витoku i_L , крива $q(t)$

Отримані експериментальним шляхом дані (рис. 3.55) свідчать про значний вплив рівня механічного навантаження двигуна на формування зворотної ЕРС під час вибігу: стала часу зменшення ЕРС при номінальному навантаженні ($T_2=0,32 \text{ с}$) майже в 5 разів менша, аніж за умови вибігу в ненавантаженому режимі ($T_1=1,56 \text{ с}$). Це підтверджує обґрунтовану аналітичним шляхом тезу про покращення електробезпеки стану ЕТК ДШ із збільшенням рівня механічного навантаження двигунів.

Таким чином, експериментально підтверджені припущення щодо спроможності утворення небезпечного стану електромережі в процесі і після її відключення від трансформатора живлення внаслідок впливу зворотних ЕРС асинхронних двигунів споживачів, що перебувають в режимі вільного вибігу. Встановлена раціональність утворення штучного замикання на землю

на виході автоматичного вимикача в процесі його захисного відключення як засіб прискорення знеструмлення кола виток на землю. Однак наявність зворотного енергетичного потоку A_d в силовому приєднанні між двигуном і пускачем після відключення останнього обумовлює доцільність запровадження автоматичного примусового відокремлення зворотної ЕРС вибігу двигуна в момент відключення мережі, або виникнення її небезпечного стану.

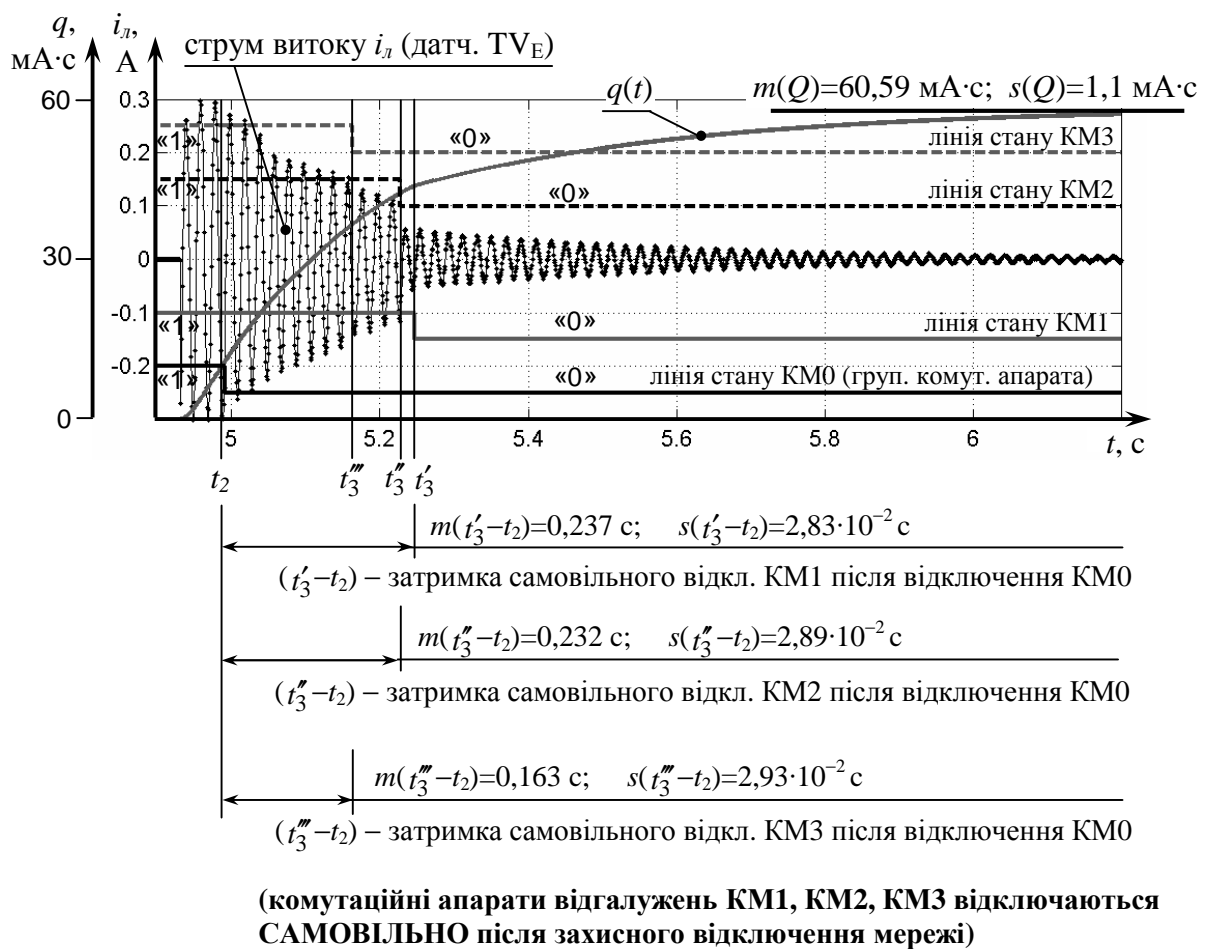


Рис. 3.53. Осцилограми стану кола виток струму опором 1 кОм в експерименті XVIII в разі вибігу двигунів М1, М2 та М3 за умови самовільного відключення комутаційних апаратів відгалужень КМ1, КМ2, КМ3 після захисного відключення мережі

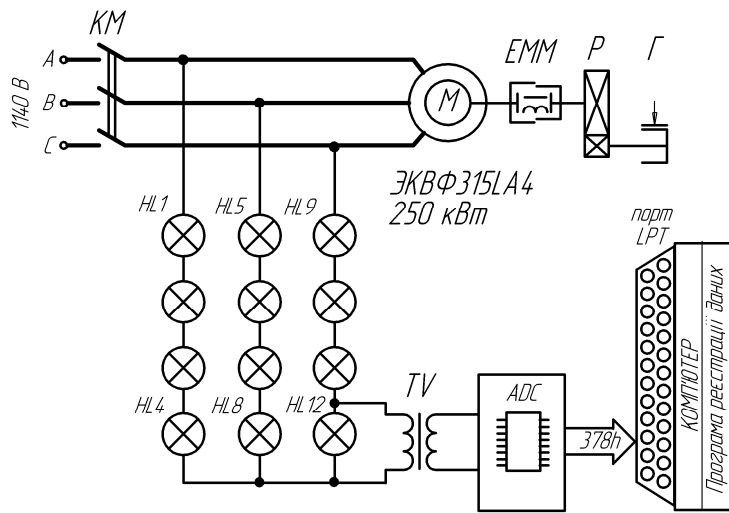


Рис. 3.54 Схема дослідницького стенда

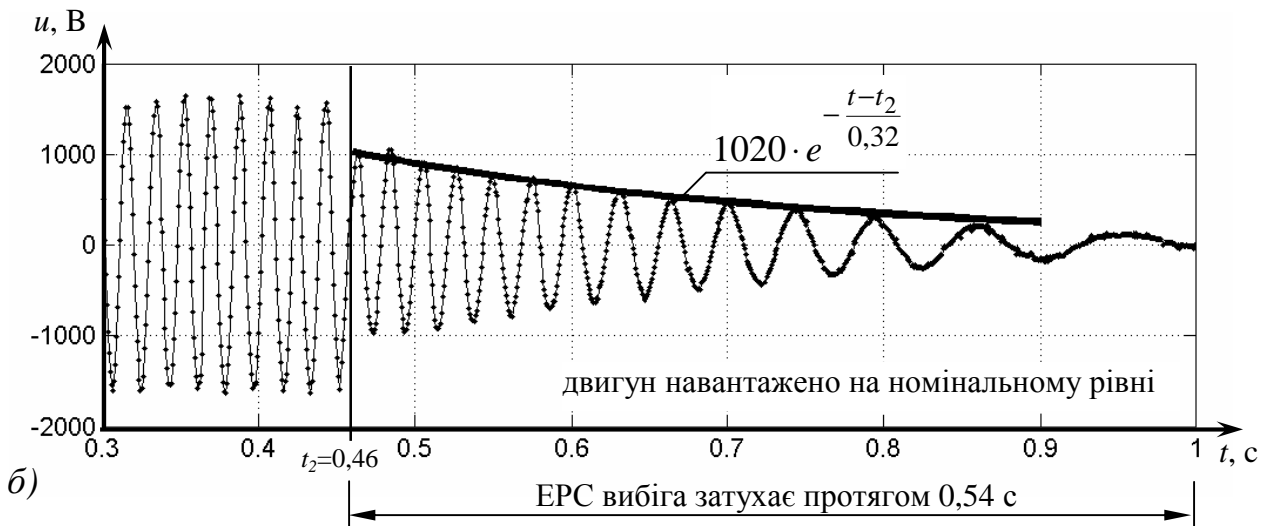
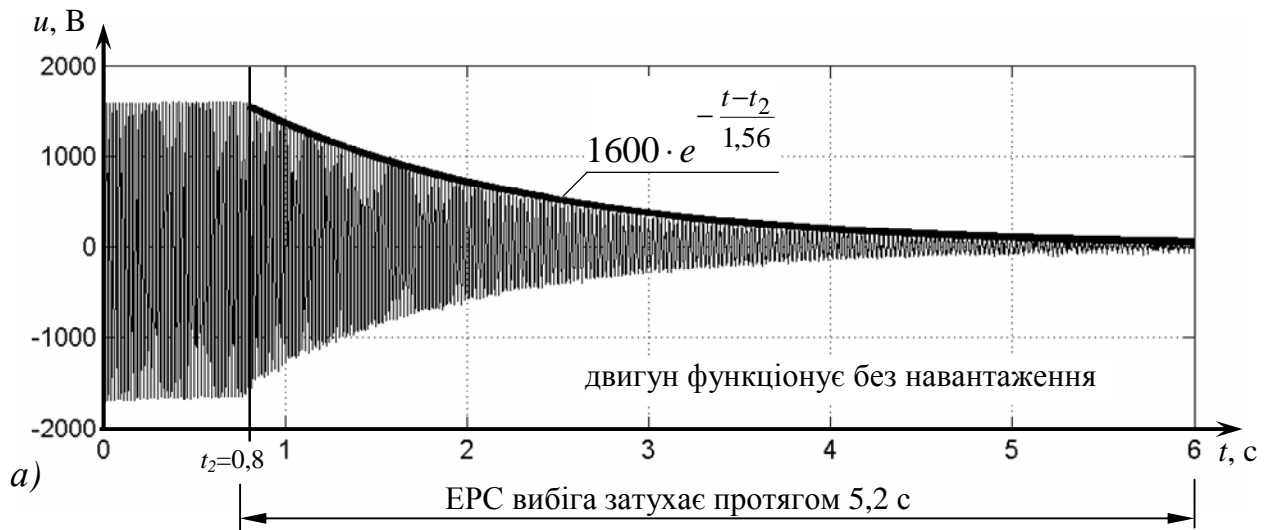


Рис. 3.55 Осцилограми миттєвих значень напруги на затискачах двигуна ЭКВФ315LA4 (250 кВт), що функціонує без навантаження (а) та з номінальним навантаженням (б), при відключенні останнього у момент t_2 від джерела живлення та огибаючі миттєвих значень ЕРС вибігу двигуна

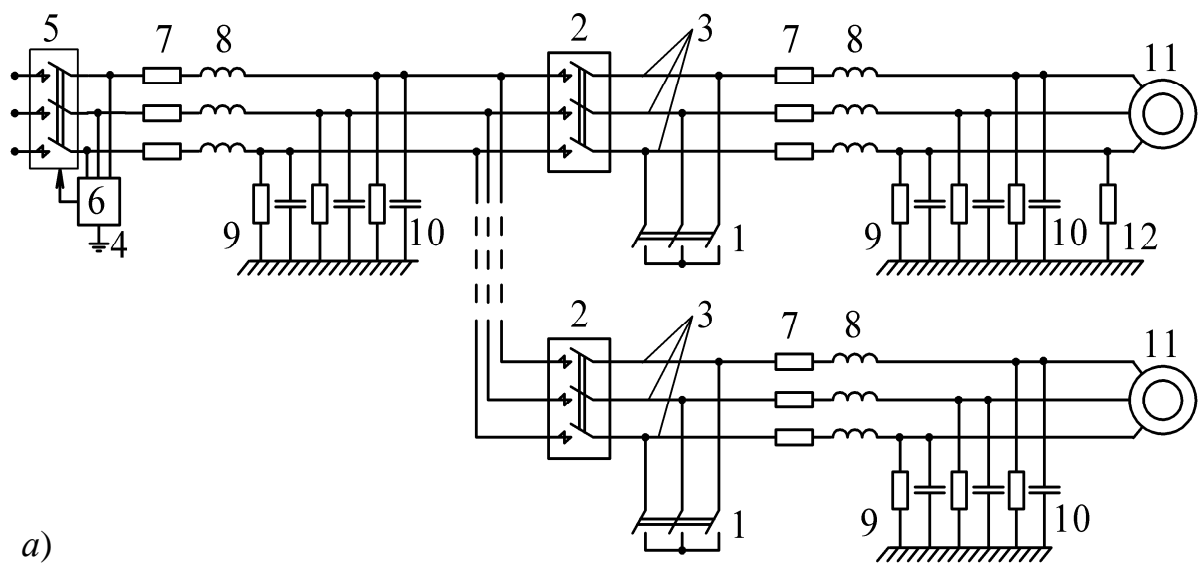
4 ПРИЙНЯТНІ ЗАХОДИ ІЗ ВІДОКРЕМЛЕННЯ ВПЛИВОВОЇ ФУНКЦІЇ ЗВОРОТНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

4.1 Визначення раціонального способу припинення дії зворотної ЕРС двигунів

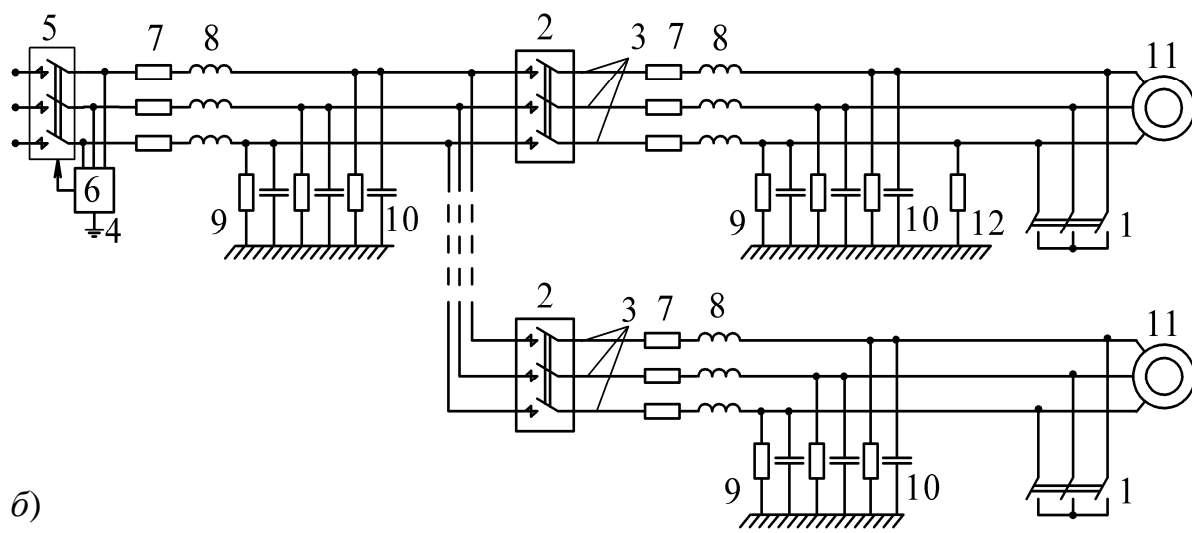
З метою поліпшення стану електробезпеки при експлуатації дільничних ЕТК шахти захисне відключення електромережі дільниці груповим АВ в разі виникнення струму витоку на землю може бути доповнене примусовим відключенням усіх відгалужень, які комутуються. Дроблення мережі на окремі відгалуження знижує ємнісну складову струму витоку, яка підтримується ЕРС вибігу двигунів. Однак це не передбачає усунення впливу ЕРС обертання двигунів споживачів. Примусове відключення пускачів за сигналом від реле витоку потребує прокладання додаткових провідників для подавання вказаного сигналу на схеми дистанційного керування пускачів, що знижує надійність електромережі дільниці.

Для гасіння зворотної ЕРС двигунів та зменшення струмів в колі витоку може бути запропоновано паралельно фазам загальної частини мережі підключати трифазний напівпровідниковий закорочувач [57]. Проте такий спосіб є неприйнятним для ЕТК ДШ через самовільне відключення комутаційних апаратів відгалужень при виконанні закорочення у загальній частині мережі, що не дозволить здійснити гасіння зворотної ЕРС двигунів.

Як один із перспективних способів підвищення безпеки експлуатації дільничного ЕТК може бути застосоване примусове припинення дії (шляхом гасіння) зворотної ЕРС асинхронних двигунів споживачів шляхом закорочення трьох фаз кожного з відгалужень мережі в найкоротший термін після відключення групового силового комутаційного апарата [58].



a)



б)

Рис. 4.1. Схема дільничного ЕТК із закорочувачами зворотної ЕРС двигунів, що підключені до виходу КА кожного відгалуження (а) та до затисків статорів двигунів споживачів (б): 1 – трифазний закорочувач; 2 – пускач; 3 – кабельні відгалуження; 4 – заземлювач; 5 – груповий комутаційний апарат (автоматичний вимикач); 6 – апарат захисту від витоків струму на землю (реле витоків); 7, 8 – активний та індуктивний опір жил кабеля; 9, 10 – активний опір та ємність ізоляції фази кабеля відносно землі; 11 – асинхронний двигун споживача; 12 – опір кола однофазного витоків струму на землю

Таке закорочення можливе в місці під'єднання гнучкого кабеля до КА відгалуження (рис. 4.1, а) або до затискачів статора двигуна (рис. 4.1, б) [59; 60]. Замикання контактів трифазного закорочувача I після захисного відключення мережі забезпечує наближення до нуля напруги в кожному відгалуженні та загальній частині мережі, що має істотно знизити складову струму витоку на землю, яка обумовлена зворотною ЕРС обертання двигунів. Наслідком закорочування є самовільне відключення комутаційних апаратів відгалужень через знеструмлення їх котушок керування. Виток струму на землю може статися в довільній, непередбачуваній точці мережі. До сьогоднішнього дня не розроблені способи виявлення місця виникнення такого витоку. Тому раціональним є захисне закорочення фаз у всіх відгалуженнях мережі, що має покращити електробезпеку стану кожного відгалуження та загальної частини мережі.

Моделювання процесів у дільничному ЕТК за умови примусового закорочення фаз відгалужень (в найкоротший термін після захисного відключення мережі) дозволить обрати з двох можливих варіантів розташування закорочувача (рис. 4.1) більш ефективний (щодо покращення параметрів електробезпеки експлуатації) або встановити їх рівнозначність.

При моделюванні закорочення фаз відгалуження просторовий вектор напруги \bar{u}_{2e} (в разі під'єднання комутатора до виходу КА відгалуження) або \bar{u}_{se} (при закороченні затискачів статора двигуна) в обґрунтованій математичній моделі дільничного ЕТК примусово ототожнювалися нуля. Для цього значення відповідного вектора напруги помножувалися на змінну z , яка дорівнює «1» у випадку розімкненого стану контакторів закорочувача, та «0» в разі виконання захисного закорочування фаз відгалуження (рис. 4.2):

$$z = \begin{cases} 1, & \text{якщо закорочувач розімкнений;} \\ 0, & \text{якщо наявне закорочення.} \end{cases} \quad (4.1)$$

В результаті моделювання закорочення фаз відгалужень ЕТК ДШ напругою 660 В (рис. 3.2, табл. 3.1) одночасно з відключенням АВ, при

під'єднанні закорочувача до виходу КА кожного відгалуження, встановлено (рис. 4.3, *a–в*), що струм короткого замикання від зворотної ЕРС двигуна у колі «статор АД – гнучкий кабель – закорочувач», досягаючи ударної величини в першому періоді (близько 1000 А для першого відгалуження ЕТК вказаної конфігурації), характеризується експоненціальним зниженням амплітудних значень, наближаючись до нуля приблизно за 0,2 с від моменту закорочення. Падіння напруги на активно–індуктивному опорі гнучкого кабеля при протіканні такого струму обумовлює наявність затухаючої напруги незначного рівня (перша амплітуда – до 15% від номіналу) на затискачах статора двигуна \bar{u}_{se} після моменту виконання закорочення, тривалість існування якої відповідає терміну протікання струму статорним колом. Даний фактор відсутній при підключенні закорочувача безпосередньо до двигунового навантаження (рис. 4.3, *д–ж*): напруга \bar{u}_{se} на затискачах статора двигуна після моменту закорочення дорівнює нулю.

Таким чином, різниця між розглянутими варіантами примусового припинення дії зворотної ЕРС двигунового навантаження ЕТК полягає у наявності падіння напруги на опорі ГК (у випадку підключення закорочувача до виходу КА відгалуження) через протікання струму гасіння ЕРС вибігу АД. Порівняльне моделювання має виявити значимість даного фактора.

Штучна нульова точка O , утворена при комутації під'єданого до фаз відгалуження трифазного закорочувача, може бути ізольованою, підключатися до заземлювача напряму або через активний (реактивний) опір. В першому випадку схема заміщення кола однофазного витоку струму на землю відповідає схемі на рис. 2.11, де $u_{\phi} = \text{Re}(\bar{u}_{se})$ при виникненні витоку в місці під'єднання двигунового навантаження до гнучкого кабеля, а в разі знаходження аварійної точки на виході КА відгалуження $u_{\phi} = \text{Re}(\bar{u}_{2e})$ (рис. 4.4, *a*). Отримані шляхом комп'ютерного моделювання діаграми струму витоку на землю, за умови виконання закорочення фаз на виході

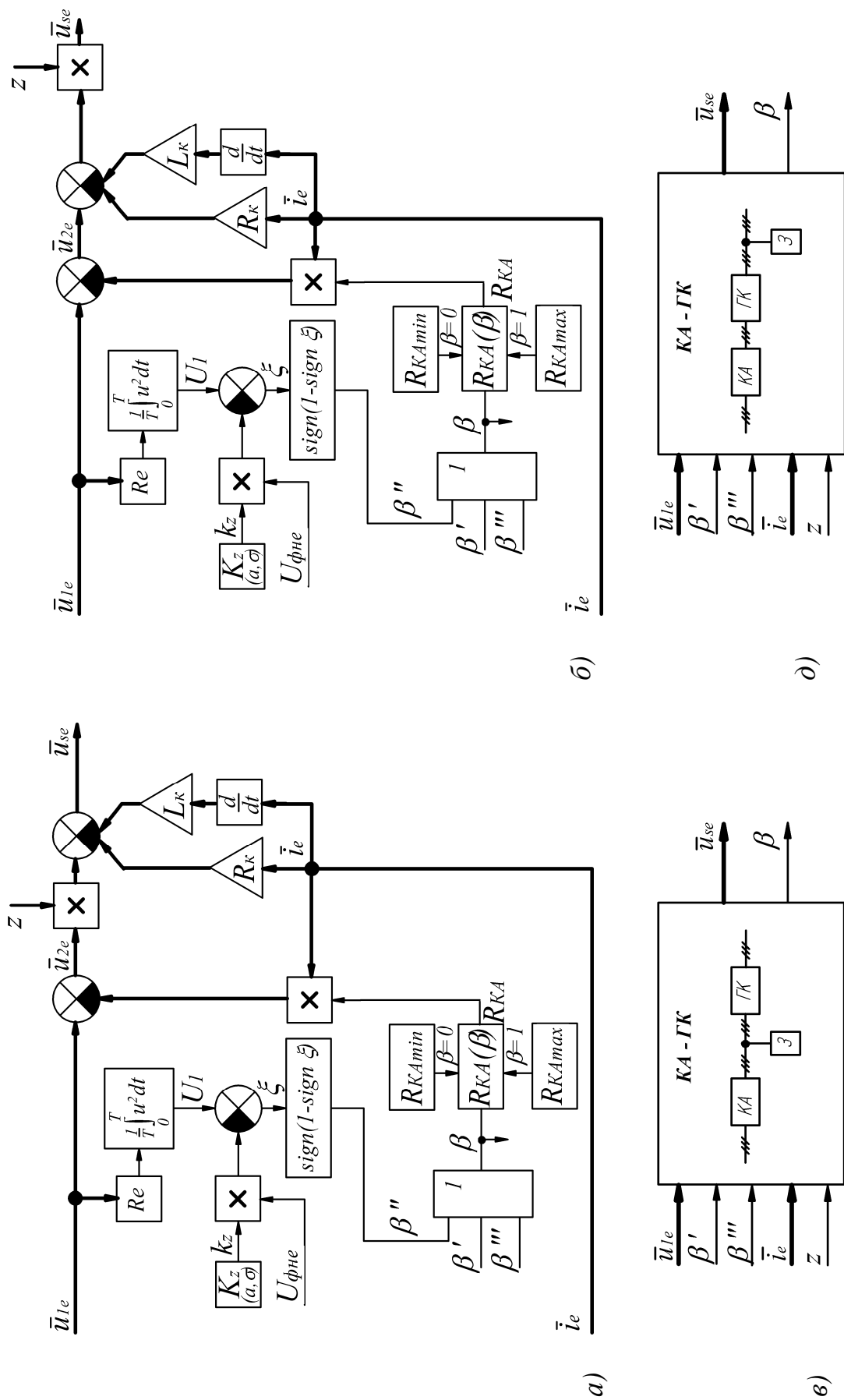


Рис. 4.2. Структурні схеми моделей комутаційного апарата та ГК відгалуження ЕТК ДШ з декількома двигунами (рис. 2.8) за умови підключення трифазного закорочувача Z до виходу КА (розгорнутий вид – а, єдиним блоком – б) та в точці підключення двигунового навантаження (в, д)

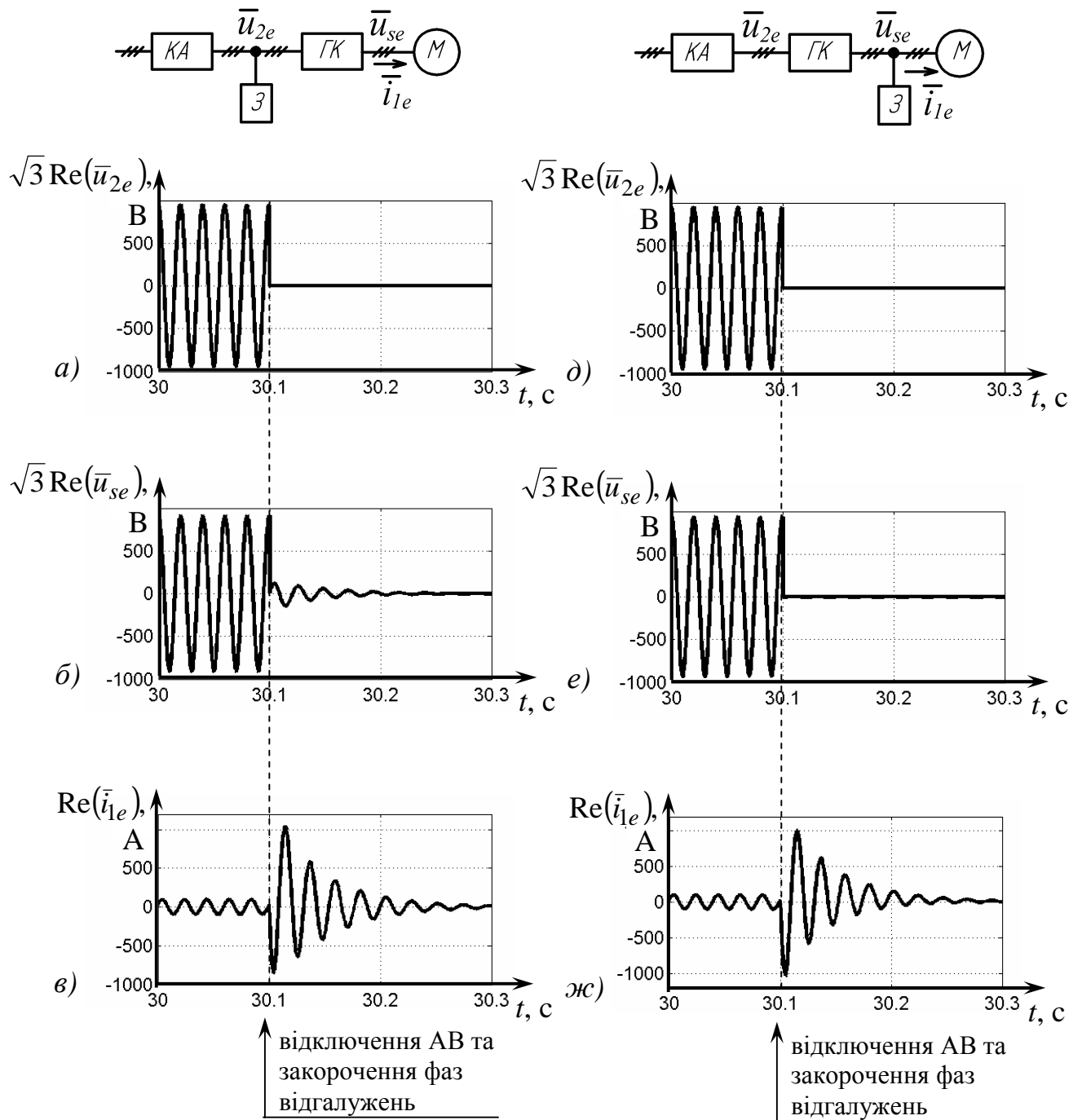


Рис. 4.3. Діаграми лінійних напруг на виході КА відгалуження (а), двигуновому навантаженні (б) та струм статора (в) першого двигуна моделі ЕТК ДШ напругою 660 В за умови закорочення фаз на виході комутаційного апарата відгалуження; випадок підключення закорочувача до затисків двигуна висвітлюють відповідні діаграми д, е, ж

комутаційних апаратів відгалужень (рис. 4.5, а) та в місці під'єднання двигунового навантаження (рис. 4.5, б) при відсутності та наявності компенсації ємнісної складової струму витoku, підтверджують можливість припинення впливу зворотної ЕРС двигунів на стан аварійної точки після захисного відключення напруги живлення мережі (момент t_2). В момент замикання контактів закорочувачів відбувається вирівнювання зарядів ємностей ізоляції кабелів ЕТК відносно землі (які визначалися фазами напруги мережі) до величини U_C з подальшим перехідним процесом розряду. Складова струму витoku, обумовлена розрядженням ємностей ізоляції кабелів після моменту t_2 закорочення фаз відгалужень, носить аперіодичний характер в разі відсутності компенсуючого дроселя. Наявність останнього обумовлює коливальний характер перехідного процесу.

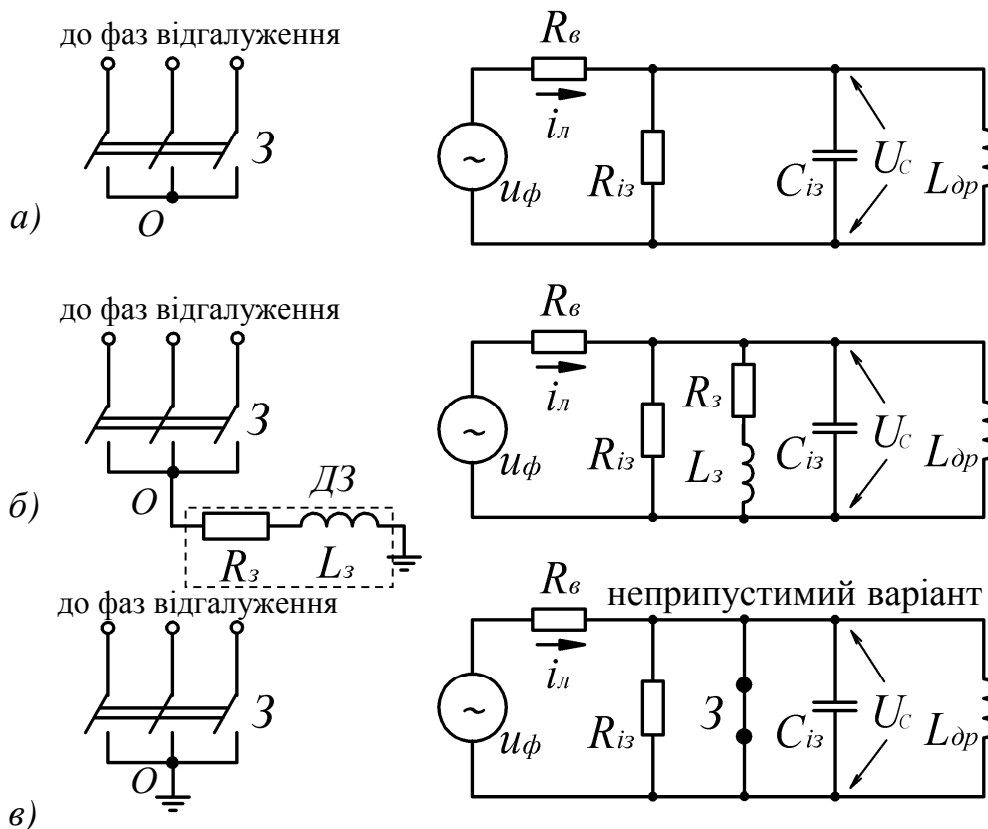


Рис. 4.4. Схеми заміщення кола витoku струму на землю після здійснення закорочення фаз відгалужень, якщо штучна нульова точка закорочувача:
 а – ізольована; б – підключена до заземлювача через активно-індуктивний опір; в – заземлена (неприпустимий випадок)

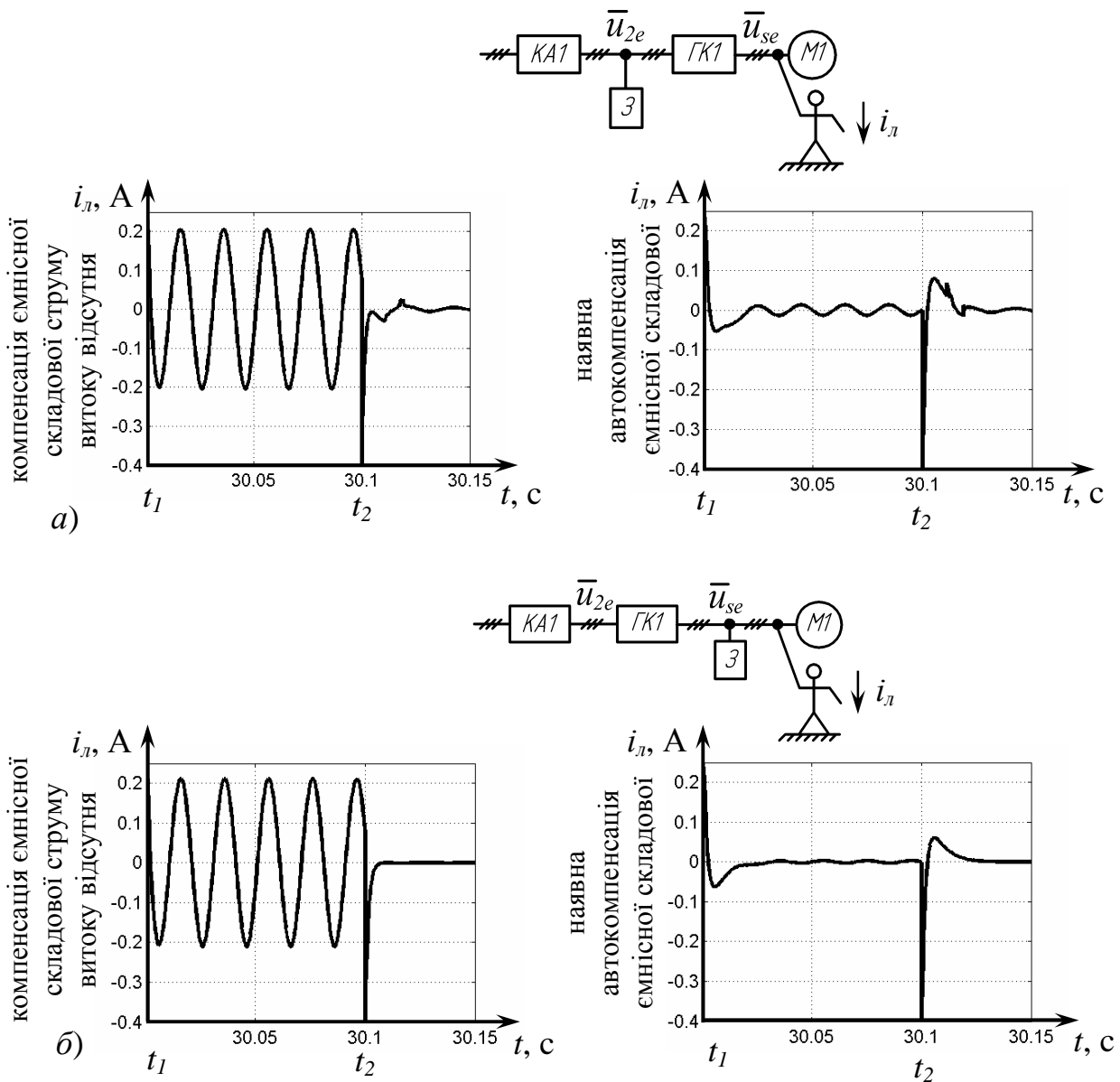


Рис. 4.5. Діаграми струму витoku на землю при закороченні фаз відгалужень в момент t_2 , отримані шляхом моделювання аварійного процесу в ЕТК ДШ напругою 660 В при підключенні закорочувів до виходів КА відгалужень (а) та затискачів статорів двигунів споживачів (б); штучна нульова точка кожного закорочувача ізолювана

При заземленні нульової точки закорочувача O через дросель ДЗ до схеми заміщення кола витoku струму на землю додається гілка з активним опором R_3 та індуктивністю L_3 такого дроселя (рис. 4.4, б), яка забезпечує додатковий шлях розряду ємностей ізоляції та сприяє додатковому зниженню пов'язаної з цим перехідної складової струму витoku на землю.

Підключення штучної нульової точки закорочувача безпосередньо до кола заземлення (рис. 4.4, в) еквівалентно шунтуванню ємностей ізоляції фаз

мережі в момент закорочення. Це знижує ресурс закорочувача, оскільки через контакти останнього протікає нічим не обмежений струм розрядження ємностей ізоляції.

Оцінку ефективності застосування конкретного засобу захисту від витоків струму на землю доцільно проводити за загальною кількістю електрики Q , що пройшла через опір тіла людини (1 кОм) за час аварійного процесу. Найбільш ефективним вважатиметься засіб, при якому величина Q приймає найменше значення з максимальною імовірністю. Про рівнозначність засобів захисту з точки зору підтримання електробезпеки свідчитиме тотожність (в межах припустимої похибки) даних величин, або, в разі проведення паралельних дослідів, однорідність вибірок Q за прийнятого рівня значущості.

З використанням моделі ЕТК напругою 660 В (рис. 3.2, табл. 3.1) проведено 50 актів моделювання стану системи (в разі виникнення однофазного витоку струму на землю) при виконанні захисного відключення мережі за відсутності та наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витоку (додаток А, табл. А.18). Гіпотеза про нормальність розподілення вибірових значень Q не була відкинута за рівня значущості 0,05 згідно критерія Колмогорова–Смирнова (табл. 4.1). Аналогічні розрахунки проведені для умов ЕТК ДШ напругою 1140 В (рис. 3.17, табл. 3.3, табл. 4.1).

Обґрунтована математична модель ЕТК ДШ в разі виконання гасіння зворотної ЕРС двигунів споживачів при відсутності компенсації ємнісної складової струму витоку не передбачає наявності факторів, значення яких змінюються стохастично, тому для оцінки значення Q достатньо проведення одного акта моделювання. Для умов ЕТК напругою 660 В (рис. 3.2, табл. 3.1) оцінені значення загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу становлять: при розміщенні закорочувачів на виході комутаційних апаратів відгалужень – 17,3 мА·с, при виконанні закорочення затискачів статорів двигунів – 17,5 мА·с.

Таблиця 4.1

Параметри, що характеризують розподілення вибірових значень загальної кількості електрики Q через опір кола витоку струму на землю за час аварійного процесу, отримані шляхом моделювання

Параметри	Одиниці виміру	мережа 660 В				мережа 1140 В			
		засоби підтримання електробезпеки							
		захисне відключення та автокомпенсація	захисне відкл. та гасіння ЕРС обертання (на виході КА)	захисне відкл., автокомпенсація та гасіння ЕРС обертання (на затискачах АД)	захисне відкл., автокомпенсація та гасіння ЕРС обертання (на затискачах АД)	захисне відключення та гасіння ЕРС обертання (на затискачах АД)	захисне відключення та гасіння ЕРС обертання (на затискачах АД)	захисне відкл., автокомпенсація та гасіння ЕРС обертання (на затискачах АД)	захисне відкл., автокомпенсація та гасіння ЕРС обертання (на затискачах АД)
Об'єм вибірки		50	50	50	50	50	50	50	50
Міри положення	мат. очікування	56,90	15,05	4,910	4,939	173,28	45,72	15,14	15,00
	медіана	57,03	15,27	4,875	4,895	174,32	44,74	15,00	15,00
Міри розсіяння	дисперсія	2,248	1,463	0,038	0,046	32,951	39,234	0,676	0,676
	станд. відхилення	1,499	1,209	0,195	0,214	5,740	6,264	0,822	0,822
	розмах	7,09	5,27	0,96	0,93	24,34	28,54	4,09	4,09
Міри форми	коєфіцієнт варіації	0,026	0,080	0,039	0,043	0,033	0,137	0,054	0,054
	асиметрія	-0,279	-0,539	0,546	0,606	-0,542	0,468	0,503	0,503
	ексцес	0,468	-0,119	4,002	0,560	-0,654	0,937	1,910	1,910
	нижня межа	56,47	14,71	4,850	4,880	171,65	43,94	14,9	14,9
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	верхня межа	57,32	15,4	4,970	5,000	174,92	47,5	15,37	15,37
	нижня межа	1,253	1,010	0,163	0,179	4,795	5,232	0,687	0,687
Довірч. інтервал для оцінки станд. відхилення	верхня межа	1,869	1,507	0,243	0,267	7,154	7,806	1,024	1,024
	перша дециль $K_{0,1}$	54,97	13,5	4,660	4,66	165,93	37,69	14,08	14,08
Інтердецильна широта	дев'ята дециль $K_{0,9}$	58,82	16,6	5,160	5,21	180,64	53,74	16,19	16,19
	Імовірність $P(Q > Q_{пртл})$	0,99	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	0,99	0,25	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$

Різниця становить менше 2%, що свідчить про рівнозначність двох розглянутих варіантів розміщення закорочувачів у відгалуженнях з точки зору підтримання електробезпеки експлуатації.

Для умов ЕТК ДШ напругою 660В за наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витоку для кожного з двох варіантів розміщення закорочувачів проведено 50 актів моделювання, в кожному з яких визначалося вибіркове значення Q (додаток А, табл. А.18). В результаті проведених розрахунків для отриманих вибірок були прийняті гіпотези про нормальність розподілення (критерій Колмогорова–Смирнова) за рівня значущості 0,05 (табл. 4.1).

Перевірка вибірок Q , що відповідають розміщенню закорочувачів на виходах КА відгалужень та затискачах двигунів при наявності в ЕТК напругою 660 В автокомпенсації ємнісної складової струму витоку на землю, за критерієм Ст'юдента не виявила підстав для відкидання гіпотези про однорідність цих вибірок при рівні значущості 0,05 (обраховане абсолютне значення критерія 0,69 є меншим від граничного 1,98) [53]. Це підтверджує рівнозначність, з точки зору електробезпеки експлуатації, розглянутих варіантів підключення закорочувачів до фаз відгалужень.

Аналіз порівняльних діаграм результатів моделювання (табл. 4.1, рис. 4.6) дозволяє встановити, що застосування захисного відключення без додаткових засобів захисту в ЕТК ДШ напругою 660 В та 1140 В розглянутої конфігурації є недостатніми для підтримання безпечного стану мережі. В першому випадку математичне очікування загальної кількості електрики Q через опір тіла людини (1 кОм) за час аварійного процесу складає 56,9 мА·с при стандартному відхиленні 1,499 мА·с. Для мережі напругою 1140 В цей показник складає 173,28 мА·с при стандартному відхиленні 5,74 мА·с.

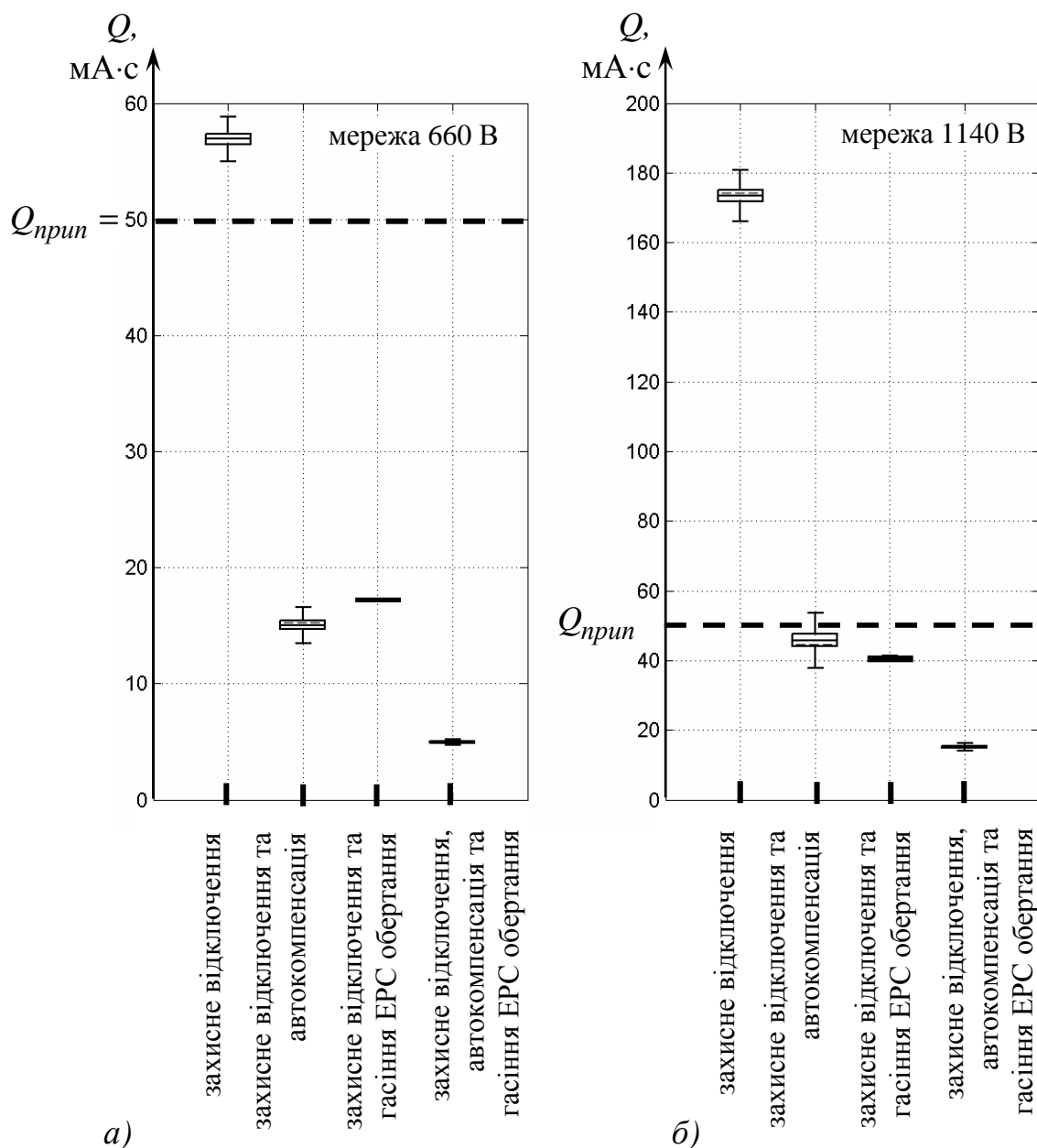


Рис. 4.6. Діаграми для порівняння ефективності засобів підтримання електробезпеки ЕТК ДШ за обраними при моделюванні вибірковими характеристиками кількості електрики через опір кола витoku струму на землю для прийнятої конфігурації ЕТК ДШ напругою 660 В (а) та 1140 В (б)

Результати моделювання підтверджують ефективність автокомпенсації ємнісної складової струму витoku в ЕТК напругою 660 В: обрана імовірність менша за прийнятну граничну $P_{cp}=10^{-6}$: $P(Q > Q_{npun}) < 10^{-10}$. У мережі напругою 1140 В застосування автокомпенсації як додаткового засобу підтримання електробезпеки виявляється недостатнім: обрана імовірність $P(Q > Q_{npun})=0,25$ перевищує граничну $P_{cp}=10^{-6}$.

Порівняльні діаграми (рис. 4.6) свідчать, що ефективність застосування гасіння зворотної ЕРС обертання приблизно ідентична застосуванню автокомпенсації ємнісної складової струму витоку. В першому випадку для мережі 660 В величина Q становить близько 17 мА·с, а із застосуванням автокомпенсації – $\bar{Q}=15$ мА·с. Для ЕТК напругою 1140 В ці показники становлять близько 41 мА·с та 46 мА·с відповідно (табл. 4.1).

Найкращі показники електробезпеки, за даними моделювання, спостерігаються при застосуванні автокомпенсації ємнісної складової струму витоку до моменту захисного відключення мережі з подальшим гасінням зворотної ЕРС двигунів. За цих умов для ЕТК ДШ напругою 660 В математичне очікування величини Q складає близько 5 мА·с при стандартному відхиленні 0,2 мА·с, для мережі напругою 1140 В – близько 15 мА·с при відхиленні 0,8 мА·с (табл. 4.1) [61].

Таким чином, дані моделювання свідчать про зниження на порядок кількості електрики через опір кола витоку на землю за час аварійного процесу в разі застосування автокомпенсації до моменту захисного відключення мережі з подальшим гасінням ЕРС обертання двигунів шляхом закорочування фаз відгалужень порівняно із застосуванням захисного відключення мережі за відсутності додаткових засобів зниження струму витоку. Порівняно із застосуванням лише автокомпенсації або гасіння ЕРС обертання, комбінація цих засобів знижує кількість електрики приблизно в три рази.

Для реалізації такого способу підвищення безпеки стану шахтного ЕТК пропонується в момент зникнення струму в кожному відгалуженні, що має місце під час захисного відключення дільничної електромережі шахти груповим автоматичним вимикачем, фази такого відгалуження з боку виходу відповідного комутаційного апарату з'єднувати між собою за допомогою швидкодіючого комутатора, що дозволяє знизити до нуля напругу на шинах відповідного комутаційного апарату, знеструмити коло керування вказаного апарату та, як наслідок, відключити його, незалежно від зовнішнього сигналу

на відключення. Крім того, це дозволяє виконати гасіння ЕРС вибігу асинхронного двигуна відповідного силового приєднання.

На рис 4.7 наведена принципова схема багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу з пристроями реалізації способу, що пропонується, на рис. 4.8 – структурна схема блока контролю параметрів відгалуження кабельної мережі, а на рис. 4.9 – діаграми роботи вказаного блока. Пристрій, за допомогою якого реалізується спосіб, містить трифазний напівпровідниковий комутатор 1, кожний з вентильних модулів 2 якого входом підключений до відповідної фази мережі з боку виходу комутаційного апарата (пускача) 3, що комутує відгалуження 4 кабельної мережі ділянки шахти. Виходи всіх вентильних модулів 2 з'єднані між собою та підключені через дросель 5 до кола заземлення 6. Керування ввімкненням вентилей 2 трифазного напівпровідникового комутатора 1 здійснюється від блока 7 контролю параметрів відгалуження кабельної мережі ділянки шахти. Вказаний блок 7 виконує функцію виявлення моменту зниження струму в електромережі.

Блок контролю параметрів струму 7 містить випрямляч 8, приєднаний до входів трансформаторів струму 9 відгалуження, що комутується. Вихід випрямляча 8 підключен до статичного входу першого компаратора 10, інвертуючий вхід якого зв'язаний з виходом першого потенціометра 11, а вихід – через диференціююче коло 12 підключений до інвертуючого входу другого компаратора 13. Статичний вхід останнього під'єднаний до вихода другого потенціометра 14, а вихід – через тригер 15 та підсилювально-розв'язуючий вузел 16 зв'язаний з колами керування вентильних (тиристорних) модулів 2 комутатора 1.

При цьому перші виводи потенціометрів 11 та 14 підключені до джерела живлення, відповідно позитивної 17 та негативної 18 полярності, а другі виводи вказаних потенціометрів, загальні виводи диференціюючого кола 12 та випрямляча 8 підключені до загального виводу 19 джерела живлення блока 7.

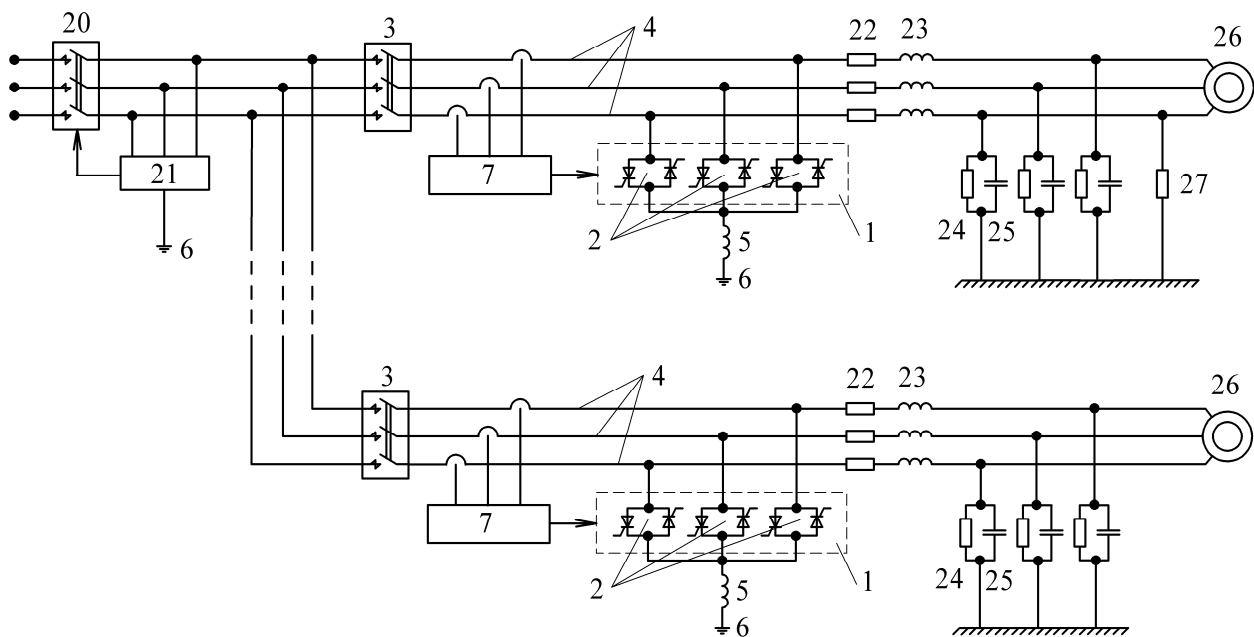


Рис. 4.7. Принципова схема багатомашинного шахтного ЕТК з пристроями реалізації запропонованого способу

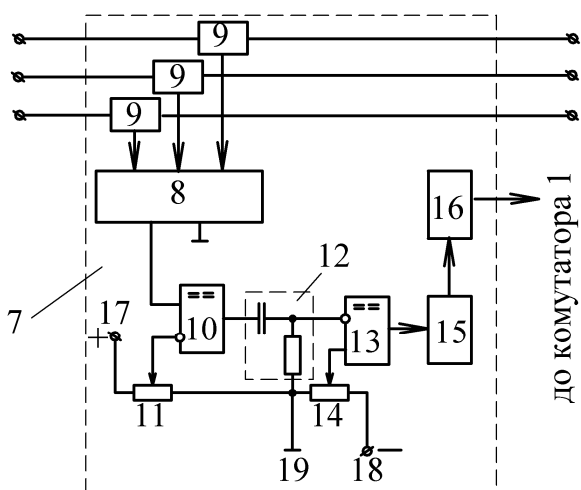


Рис. 4.8. Структурна схема блоку контролю параметрів відгалужень кабельної мережі

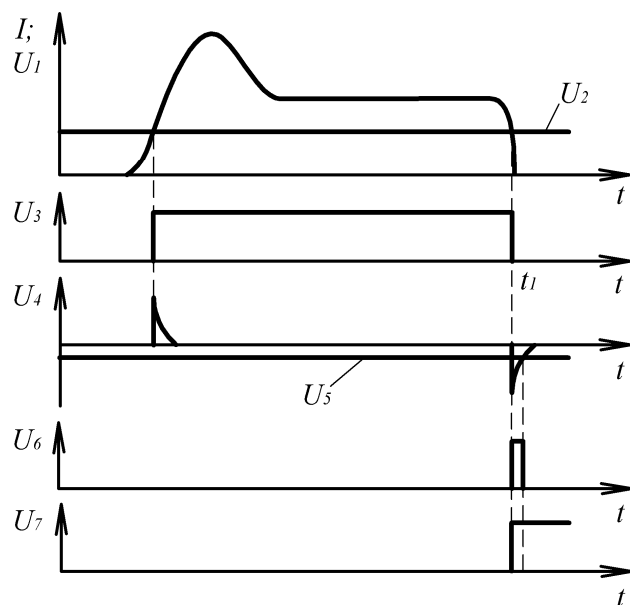


Рис. 4.9. Діаграми роботи блоку контролю параметрів відгалужень кабельної мережі

В електромережі дільниці шахти також передбачений груповий автоматичний вимикач 20 та апарат захисту 21 від струмів витоків на землю, який підключений до фаз мережі між груповим вимикачем 20 та пускачами 3, що комутують кабельні відгалуження 4. Оперативне коло апарата захисту від витоків струму (реле витоків) 21 підключений до заземлювача. На схемі електропостачання дільниці шахти (рис. 4.7) вказані активні 22 та індуктивні

23 опори робочих жил кабелів відгалужень, що комутуються, активні 24 та ємнісні 25 опори ізоляції вказаних кабелів. Навантаженням кожного кабельного відгалуження є асинхронні двигуни 26.

При виникненні у силовому приєднанні 4 витоку струму на землю через опір 27, спрацьовує реле витоку 21, яке впливає на груповий автоматичний вимикач та відключає його. У зв'язку з цим зникає струм в електромережі дільниці. В момент зникнення струму в кабельному відгалуженні 4, що комутується, блок 7 контролю параметрів струму формує та запам'ятовує керуючий сигнал, який поступає на входи керування вентильних модулів 2 напівпровідникового комутатора 1 та відкриває вказані модулі. В результаті ЕРС обертання двигуна 26, яка діє в кабельному відгалуженні 4, замикається на спільну точку з'єднання модулів 2, що обумовлює зниження до нуля напруги на шинах пускача 3, припинення електроживлення кола керування цього пускача та, як наслідок, відключення пускача 3 незалежно від наявності зовнішнього сигналу на відключення. При цьому ємнісні складові струмів витоку, що обумовлені ЕРС обертання двигуна 26 та ємністями 25 ізоляції кабеля, будуть компенсуватися дроселем 5, індуктивність якого може бути відрегульована відповідно до параметрів ємності ізоляції 25 конкретного кабеля. Після закінчення процесу захисного відключення, у зв'язку з повним зникненням напруги в кабельному відгалуженні 4, коло живлення блока 7 та кола вентильних модулів 2 знеструмлюються, вказані модулі закриваються. Це дозволяє в подальшому здійснювати повторне ввімкнення пускача 3 кабельного відгалуження 4 без додаткових впливів на комутатор 1 (з метою забезпечення його закритого стану).

Функціонування блока 7 контролю параметрів струму полягає в наступному. При зникненні струму I в кабельному відгалуженні 4 на виході випрямляча 8 зникає пропорційна напруга U_1 . В результаті, нульовий потенціал порівнюється із позитивним потенціалом U_2 , що знімається з потенціометра 11, обумовлює зникнення логічної "одиниці" U_3 на вході

компаратора 10 в момент t_1 . Задній фронт зниклого “одиничного” імпульсу виділяється диференціюючим колом 12 у вигляді короткого негативного імпульсу U_4 , який порівнюється за допомогою компаратора 13 із негативною напругою U_5 , що знімається з потенціометра 14. Абсолютне значення вказаної напруги U_5 менше абсолютної величини амплітуди вихідного імпульса U_4 . Внаслідок цього, при наявності негативного імпульса U_4 на інвертуючому вході, компаратор 13 формує логічну “одиницю” U_6 на своєму виході, яка запам’ятовується тригером 15 (U_7) та через підсилювально-розв’язувальний блок 16 подається на кола керування вентильних модулів 2 комутатора 1.

4.2 Методика оцінки рівня безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти та перспективи його підвищення

Теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують найгірший, з точки зору безпеки, стан кола витoku струму на землю у випадку збереження ввімкненого стану комутаційних апаратів відгалужень ЕТК до повного згасання ЕРС вибігу двигунів споживачів порівняно із іншими режимами функціонування КА. Це дає підстави прийняти припущення про збереження електричного зв’язку між відгалуженнями системи протягом аварійного процесу при оцінці рівня безпеки експлуатації електротехнічного комплексу для найгірших умов.

Числові значення такої оцінки можуть бути отримані за допомогою запропонованої залежності (3.8) для обчислення загальної кількості електрики Q через опір кола однофазного витoku струму на землю за час аварійного процесу. Правомірність використання даної залежності підтверджуються сходимістю, в межах допустимої для технічних розрахунків похибки, розрахованих значень Q із експериментальними даними. При виконанні вимог ГОСТ 22929–78 [4] щодо величини опору тіла

людини ($R_g = 1$ кОм) для мережі промислової частоти ($\omega = 314$ рад/с) залежність (3.8) має вигляд:

$$Q = \frac{U_L(\Delta t_{3\phi} + T)}{\sqrt{3 \cdot 10^6 + \frac{1}{2,9 \cdot 10^5 \cdot C_{i3\phi}^2}}}, \quad (4.2)$$

де U_L – лінійна напруга мережі, В; $\Delta t_{3\phi}$ – тривалість захисного відключення мережі, с; T – стала часу затухання ЕРС вибігу двигунів споживачів ЕТК, с; $C_{i3\phi}$ – ємність ізоляції фази мережі відносно землі, Ф/фаза.

Вираз (4.2) дозволяє визначити небезпеку, яку становить за найгірших умов дільничний електротехнічний комплекс для людини, через тіло якої виник однофазний виток струму на землю. Параметри, що потрібні для розрахунку за наведеною залежністю, визначаються наступним чином. Рівень лінійної напруги U_L та ємність ізоляції мережі $C_{i3\phi}$ обумовлені конфігурацією конкретного ЕТК. Тривалість відключення мережі в аварійній ситуації $\Delta t_{3\phi}$ залежить від конструктивних особливостей апарата захисту від витоків струму на землю, що функціонує у складі електротехнічного комплексу. Стала часу затухання зворотної ЕРС двигунів T може бути оцінена за методикою [27].

Замість виконання розрахунків за формулою (4.2) може бути використано наведену на рис. 4.10 номограму, яка дозволяє знаходити значення Q (мА·с) графічним способом при зміні параметрів в наступних межах: стала часу затухання зворотної ЕРС $T = 0 \div 2$ с; тривалість захисного відключення мережі $\Delta t_{3\phi} = 0 \div 0,1$ с; ємність ізоляції фази мережі $C_{i3\phi} = 0,01 \div 1$ мкФ/фаза; лінійна напруга мережі U_L становить 380 В; 660 В та 1140 В.

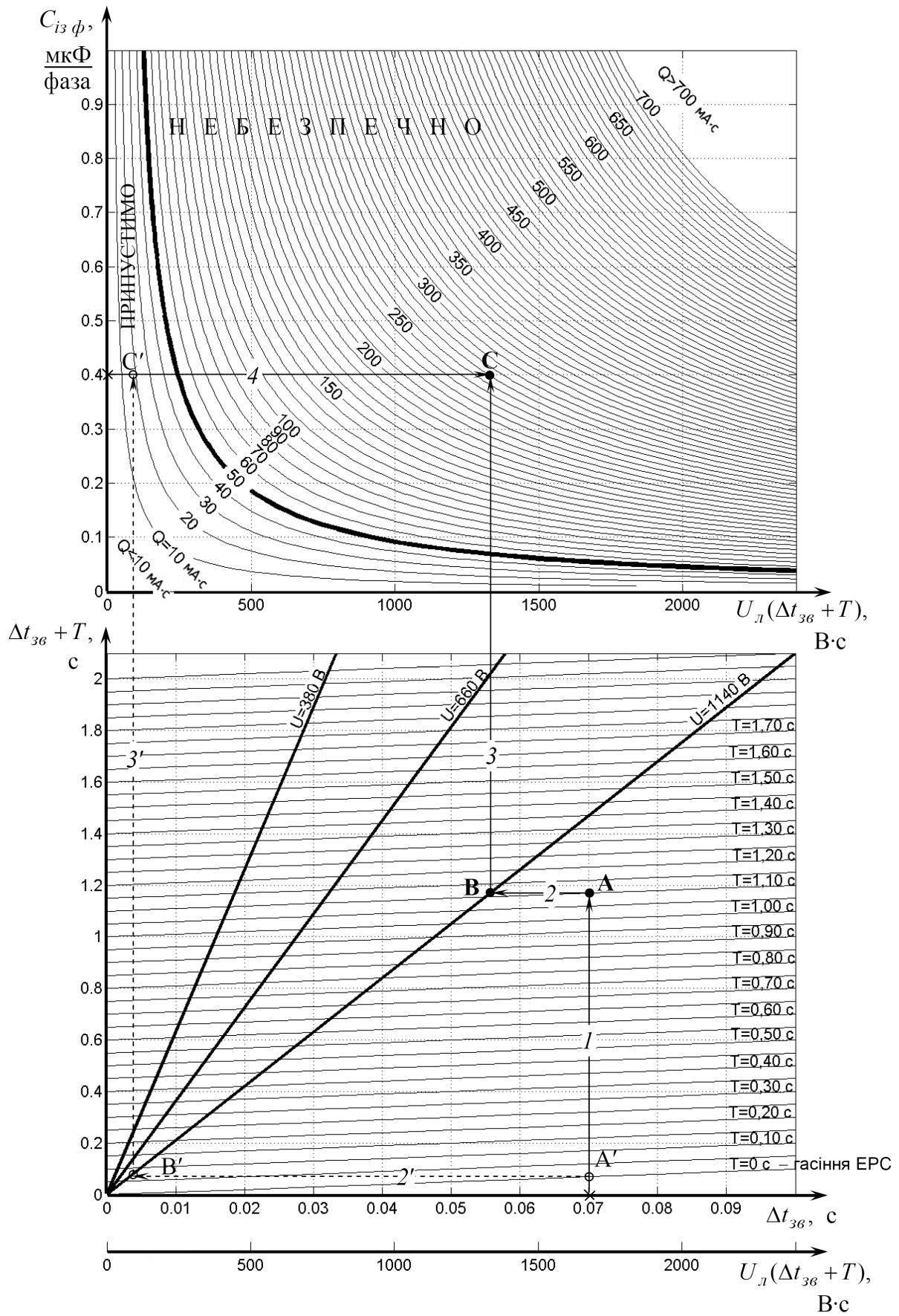


Рис. 4.10. Номограма для оцінки значень Q

Номограма складається з двох частин. Нижня частина реалізує обчислення графічним способом значення виразу $U_{л}(\Delta t_{зг} + T)$ в заданих межах зміни параметрів. Верхня частина номограми представлена гіперболоподібними лініями однакової величини Q (мА·с), побудованими у діапазоні $10 \div 700$ мА·с із шагом 10 мА·с в такій координатній сітці: вісь абсцис відповідає значенням виразу $U_{л}(\Delta t_{зг} + T)$, вісь ординат – ємності $C_{із\phi}$ (мкФ/фаза) ізоляції фази мережі відносно землі. Лінія $Q=50$ мА·с розділяє верхнє поле номограми на зону припустимих значень кількості електрики $Q < 50$ мА·с та небезпечну, з точки зору смертельного електроураження людини, зону $Q > 50$ мА·с.

Оцінка за номограмою кількості електрики Q через опір 1кОм тіла людини протягом аварійного процесу в ЕТК має проводитися в наступній послідовності. На горизонтальній вісі $\Delta t_{зг}$ відмічається тривалість захисного відключення мережі в секундах та з отриманої точки проводиться вертикальна пряма 1 до перетину в точці A з лінією T , яка відповідає заданому значенню сталої часу зменшення зворотної ЕРС двигунів споживачів. З точки A проводиться горизонтальна пряма 2 , що перетинає лінію необхідного рівня напруги в точці B . Пряма 3 , проведена вертикально з точки B , має перетинати лінії рівних значень кількості електрики у верхній частині номограми. Значення ємності ізоляції фази мережі (мкФ/фаза) відмічається на вісі $C_{із\phi}$ та з отриманої точки проводиться горизонталь 4 до перетину з прямою 3 в точці C . За найближчою до точки C гіперболоподібною лінією визначається шукана величина Q (мА·с).

Як приклад, на рис. 4.10 графічним способом оцінена безпека експлуатації ЕТК наступної конфігурації: $U_{л}=1140\text{В}$; $C_{із\phi}=0,4$ мкФ/фаза; $\Delta t_{зг}=0,07$ с; $T=1,1$ с. Отримана за номограмою величина $Q=270$ мА·с відрізняється від обрахованої аналітично (269 мА·с) за залежністю (4.2)

менше, ніж на 1%, що підтверджує достатню точність запропонованого графічного способу.

При оцінці рівня електробезпеки ЕТК, за умови виконання одночасно із захисним відключенням мережі примусового припинення дії зворотної ЕРС двигунів споживачів, може бути використана залежність (4.2) при ототожненні нулю сталої часу $T=0$, тобто:

$$Q' = \frac{U_{л} \Delta t_{зв}}{\sqrt{3 \cdot 10^6 + \frac{1}{2,9 \cdot 10^5 \cdot C_{ізф}^2}}}. \quad (4.3)$$

Вираз (4.3) дозволяє обрахувати кількість електрики Q' (А·с), що пройшла через опір тіла людини від моменту виникнення аварійної ситуації до захисного відключення мережі, після якого здійснюється припинення дії ЕРС вибігу двигунів. Оцінка величини Q' графічним способом для заданих параметрів ЕТК (рис. 4.10, лінії 2'–3', точки А'–С') становить 17 мА·с, що на 6% відрізняється від розрахованого за залежністю (4.3) значення 16,1 мА·с. Для даних параметрів системи значення $Q' < 50$ мА·с, що підтверджує ефективність припинення дії (шляхом гасіння) зворотної ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки стану ЕТК ДШ.

Ефективність застосування примусового гасіння зворотної ЕРС двигунів під час вибігу може бути оцінена наступним відношенням:

$$e = \frac{Q}{Q'}, \quad (4.4)$$

де Q – загальна кількість електрики через опір кола витoku струму на землю за час аварійного процесу при відсутності гасіння ЕРС вибігу двигунів, оцінена за залежністю (4.2), А·с; Q' – аналогічний параметр за умови здійснення гасіння зворотної ЕРС двигунів, обрахований за залежністю (4.3), А·с.

Випадок $e > 1$ відповідає покращенню стану кола витoku струму на землю завдяки припинення дії ЕРС вибігу двигунів. Якщо $e < 1$,

спостерігається погіршення електробезпеки експлуатації ЕТК внаслідок використання даного способу. Виконання умови $e = 1$ свідчить про відсутність позитивних або негативних змін у статусі системи.

Відношення оцінених за номограмою значень Q та Q' для заданих умов становить $e = 270/17 = 15,9$, тобто припинення дії (шляхом гасіння) зворотної ЕРС обертання знижує величину кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу у 15,9 разів, що є оцінкою ефективності застосування запропонованого способу підвищення безпеки стану ЕТК вказаної конфігурації.

Врахування у виразі (4.4) залежностей (4.2) та (4.3), за якими обчислюються величини Q та Q' , дає змогу оцінити коефіцієнт e через параметри електротехнічного комплексу:

$$e = 1 + \frac{T}{\Delta t_{зв}}. \quad (4.5)$$

Параметри T та $\Delta t_{зв}$ за фізичною суттю є додатними величинами, тому для будь-яких їх значень виконується співвідношення $e > 1$. Це свідчить про можливість лише підвищити безпеку експлуатації ЕТК довільної конфігурації в разі виконання гасіння зворотної ЕРС обертання двигунів. Погіршення електробезпеки, як свідчить залежність (4.5), є неможливим.

Оцінити графічним способом показник e ефективності припинення дії зворотної ЕРС двигунів для максимально припустимої, за даного рівня напруги згідно ГОСТ 22929–78 [4], тривалості захисного відключення мережі дає змогу діаграма на рис. 4.2, побудована за залежністю (4.3)

Таким чином, наведена методика дозволяє оцінювати існуючий рівень безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти та ступень його підвищення при виконанні припинення дії (шляхом гасіння) зворотної ЕРС двигунів споживачів.

4.3. Алгоритм розрахунку та вибору параметрів силових приєднань шахтного ЕТК за показниками перехідного режиму після вимкнення напруги живлення

Встановлення відповідності показників перехідного процесу в шахтному ЕТК при вимкненні напруги живлення через виток струму на землю вимогам, що висуваються до системи при проектуванні, пропонується проводити після вибору конфігурації мережі згідно традиційної методики [15]. Відомий порядок проектування дільничних електротехнічних комплексів дозволяє визначити наступні параметри елементів системи, що для формалізації подамо у векторно-матричній формі (позначення всіх змінних відповідають прийнятим у р. 2):

- параметри вторинної обмотки трансформаторної підстанції:

$$X_1 = [U_n \quad k_{cx} \quad R_{mp} \quad L_{mp}]; \quad (4.6)$$

- параметри магістрального кабеля:

$$X_2 = [R_{MK \text{ num}} \quad L_{MK \text{ num}} \quad C'_{i3 \phi \text{ num}} \quad R'_{i3 \phi \text{ num}} \quad l_{MK}]; \quad (4.7)$$

- характеристики вимкнення комутаційних апаратів відгалужень при зниженні напруги в мережі (при кількості відгалужень n):

$$X_3 = \begin{bmatrix} a_1 & s_1 \\ & \mathbf{L} \\ a_n & s_n \end{bmatrix}; \quad (4.8)$$

- параметри гнучких кабелів:

$$X_4 = \begin{bmatrix} R_{ГК1 \text{ num}} & L_{ГК1 \text{ num}} & C''_{i3 \phi 1 \text{ num}} & R''_{i3 \phi 1 \text{ num}} & l_{ГК1} \\ & & \mathbf{K} & & \\ R_{ГКn \text{ num}} & L_{ГКn \text{ num}} & C'_{i3 \phi n \text{ num}} & R'_{i3 \phi n \text{ num}} & l_{ГКn} \end{bmatrix}; \quad (4.9)$$

- паспортні характеристики асинхронних двигунів у кількості m :

$$X'_5 = \begin{bmatrix} P_{n1} & n_{c1} & U_{n1} & k_{cx1} & s_{n1} & h_{n1} & \cos j_1 & \frac{I_{n1}}{I_{n1}} & \frac{M_{n1}}{M_{n1}} & \frac{M_{\max 1}}{M_{n1}} & J_1 \\ & & & & & \mathbf{K} & & & & & \\ P_{nm} & n_{cm} & U_{nm} & k_{cxm} & s_{nm} & h_{nm} & \cos j_m & \frac{I_{nm}}{I_{nm}} & \frac{M_{nm}}{M_{nm}} & \frac{M_{\max m}}{M_{nm}} & J_m \end{bmatrix}; \quad (4.10)$$

- механічні параметри вугледобувних машин та механізмів:

$$X_6 = \begin{bmatrix} M_{c1} = f(n_1) & J_{m1} \\ \mathbf{K} & \\ M_{cm} = f(n_m) & J_{mm} \end{bmatrix}; \quad (4.11)$$

- параметри апарата захисту від витоків струму на землю:

$$X_7 = [t \ v]. \quad (4.12)$$

Залежність між паспортними даними АД, що подані в рядках матриці X'_5 , і параметрами Т-подібної схеми заміщення, які можна представити наступною матрицею:

$$X_5 = \begin{bmatrix} R_{s1} & L_{sl1} & R_{r1} & L_{rl1} & L_{m1} \\ & & \mathbf{K} & & \\ R_{sm} & L_{slm} & R_{rm} & L_{rlm} & L_{mm} \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

позначимо Ψ , тоді виконується співвідношення:

$$X_5 = \Psi(X'_5). \quad (4.14)$$

Якщо при проектуванні мережі необхідно встановити показники перехідних процесів, що пов'язані із вимкненням напруги живлення, при k значеннях опору кола витоків, то доцільно такі величини об'єднати у вектор:

$$X_8 = [R_{e1} \ \mathbf{K} \ R_{ek}]. \quad (4.15)$$

Розрахунки з використанням обґрунтованої у п. 2.1 математичної моделі при параметрах ЕТК, що перелічені у векторах та матрицях $\{X_1, \mathbf{K}, X_8\}$, дозволяють отримати наступні дані:

- вектор миттєвих значень напруг на статорах двигунів:

$$Y_1 = [u_{s1} \ \mathbf{K} \ u_{sm}]; \quad (4.16)$$

- вектор миттєвих значень струмів відгалужень:

$$Y_2 = [i_1 \ \mathbf{K} \ i_n]; \quad (4.17)$$

- вектор частот обертання роторів двигунів:

$$Y_3 = [n_1 \ \mathbf{K} \ n_m]; \quad (4.18)$$

- вектор електромагнітних моментів двигунів

$$Y_4 = [M_1 \quad \mathbf{K} \quad M_m]; \quad (4.19)$$

- вектор змінних стану комутаційних апаратів відгалужень:

$$Y_5 = [b_1 \quad \mathbf{K} \quad b_n]; \quad (4.20)$$

- матриця миттєвих значень струмів витоку при заданих у векторі X_8

опорах кола витоку:

$$Y_6 = \begin{bmatrix} i_{l11}|_{R_{e1}} & \mathbf{K} & i_{l1k}|_{R_{ek}} \\ & \mathbf{L} & \\ i_{ln1}|_{R_{e1}} & \mathbf{K} & i_{lnk}|_{R_{ek}} \end{bmatrix}; \quad (4.21)$$

- матриця величин сукупної кількості електрики через задані у векторі X_8 опори кола витоку:

$$Y_7 = \begin{bmatrix} Q_{11}|_{R_{e1}} & \mathbf{K} & Q_{1k}|_{R_{ek}} \\ & \mathbf{L} & \\ Q_{n1}|_{R_{e1}} & \mathbf{K} & Q_{nk}|_{R_{ek}} \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

Математична модель (п. 2.1) встановлює залежність вихідних даних $\{Y_1, \mathbf{K}, Y_7\}$ від вхідних $\{X_1, \mathbf{K}, X_8\}$, що можна позначити Θ , тоді виконується вираз:

$$\{Y_1, \mathbf{K}, Y_7\} = \Theta \{X_1, \mathbf{K}, X_8\}. \quad (4.23)$$

Дані, що знаходяться у $\{Y_1, \mathbf{K}, Y_7\}$, дають достатню інформацію про характер протікання перехідних процесів в багатомашинному дільничному електротехнічному комплексі шахти, в тому числі – при вимкненні напруги живлення через виникнення витоку струму на землю.

Під час проектування можуть бути висунуті вимоги щодо показників перехідного режиму при наявності витоку струму на землю. Наприклад, величина сукупної кількості електрики Q_{ij} через опір кола витоку R_{ej} ($j = \overline{1, k}$), що знаходиться у i -му відгалуженні ($i = \overline{1, n}$), має належати інтервалу $[Q'; Q'']$ (нижня границя може дорівнювати нулю $Q' = 0$):

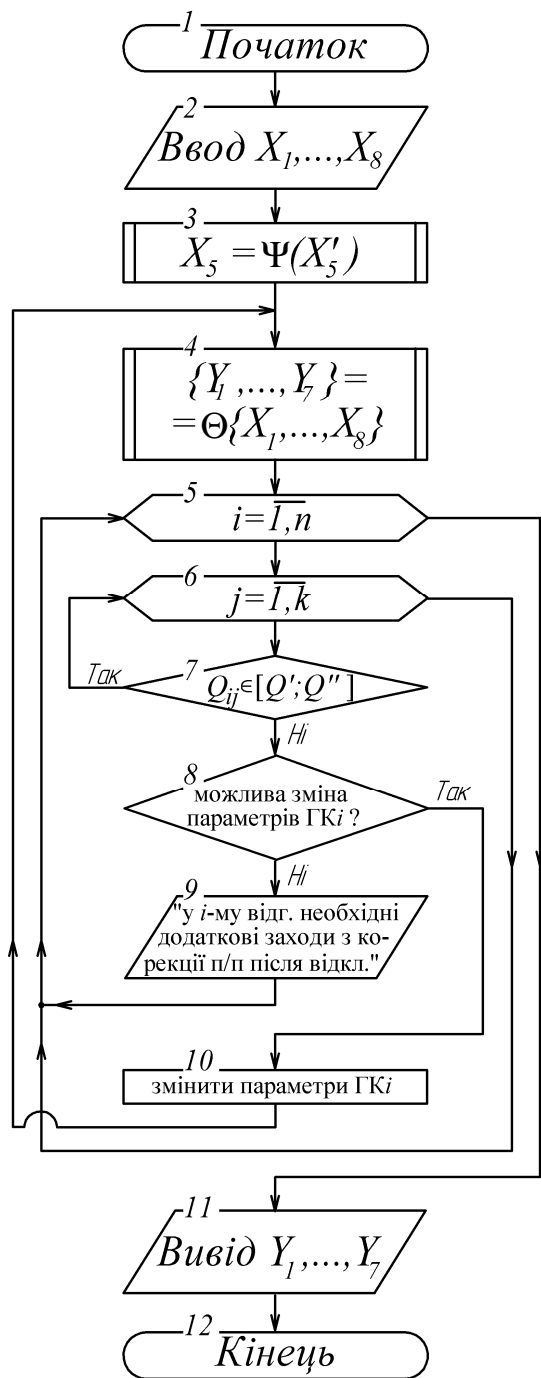


Рис. 4.11. Блок-схема алгоритму розрахунку та вибору параметрів силових приєднань шахтного ЕТК за показниками Q_{ij} перехідного процесу при вимкненні напруги

організуюють циклічний перебір елементів Q_{ij} матриці Y_7 . Кожна величина Q_{ij} у блоці 7 перевіряється на приналежність до заданого інтервалу. При виконанні вимоги (4.24) перебір елементів матриці Y_7 продовжується.

$$Q_{ij} \in [Q'; Q'']. \quad (4.24)$$

Алгоритм розрахунку та вибору параметрів елементів силових відгалужень при необхідності забезпечення виконання умови (4.24) ілюструє блок-схема на рис. 4.11. Блок 2 відповідає формуванню векторів та матриць X_1, \mathbf{K}, X_8 за результатами традиційного проектування дільничного ЕТК шахти. В блоці 3 здійснюється розрахунок за (4.14) параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронних двигунів системи за каталожними даними згідно відомих методик [29]. Блок 4 відповідає здійсненню математичного моделювання перехідного процесу в шахтному ЕТК з використанням запропонованої у р. 2 моделі, що описано виразом (4.23).

Результатом моделювання є, серед іншого, матриця Y_7 величин сукупної кількості електрики, що пройшла через опори $R_{e1}, \mathbf{K}, R_{ek}$ при виникненні витоку в кожному з n відгалужень мережі. Блоки 5 та 6

Відсутність величин Q_{ij} , що порушують вимогу (4.24), свідчить про задовільні показники перехідного процесу при витоку струму на землю для всіх відгалужень мережі. В цьому разі розрахунок завершується (блоки 11, 12).

Якщо величина Q_{ij} не задовольняє висунутим вимогам (гілка «Ні» блока 7), необхідно розглянути можливість зміни параметрів i -го гнучкого кабеля (i -й рядок матриці X_4) шляхом коригування довжини або перетину жил (блок 8). При цьому мають бути враховані обмеження, що накладаються іншими критеріями (струмове навантаження, термічна стійкість, технологічні умови та ін.). Якщо змінити параметри ГКі є можливим (наприклад, припускається знизити на 10-20% зменшити довжину кабеля), необхідно внести оновлені дані до i -го рядка матриці X_4 (блок 10), повторно провести моделювання (блок 4) та знову виконувати циклічну перевірку виконання умови (4.24). Якщо параметри ГКі не підлягають зміні (гілка «Ні» блоку 8), для такого відгалуження мають бути передбачені додаткові заходи щодо корекції перехідних процесів після вимкнення напруги живлення при наявності витоку струму на землю (блок 9).

Таким чином, удосконалено методику розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних ЕТК (зокрема, довжин та перетинів жил гнучких кабелів) шляхом доповнення оцінкою перехідного процесу після вимкнення напруги живлення за величиною сукупної кількості електрики через опір кола витоку струму на землю, для здійснення чого застосовується обґрунтована у р. 2 математична модель багатомашинного електротехнічного комплексу шахти та спеціальний алгоритм аналізу результатів моделювання. Запропоновано спосіб щодо корекції перехідних процесів в багатомашинних шахтних ЕТК після вимкнення напруги живлення.

ВИСНОВКИ

Обґрунтована математична модель багатомашинного електротехнічного комплексу для аналітичних досліджень перехідних процесів з урахуванням особливостей функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти. Визначено особливості впливу зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів на параметри електробезпеки шахтного дільничного електротехнічного комплексу в контексті утворення складової кількості електрики в колі витоку струму на землю в процесі та після захисного відключення шахтної дільничної електромережі. Дослідженнями перехідних процесів при відключенні напруги живлення шахтного дільничного ЕТК типових конфігурацій напругою 660 В та 1140 В визначено характер енергетичного обміну між асинхронними двигунами під час вибігу при стохастичному відключенні комутаційних апаратів силових приєднань, проаналізовано характер зменшення величини ЕРС вибігу двигунів, що підтримує струм витоку на землю при пошкодженій ізоляції одного з силових кабелів, і процес стохастичної зміни сукупних параметрів ізоляції відносно землі кабелів мережі, які електрично зв'язані із колом витоку струму на землю.

Вперше отримані функціональні залежності кількості електрики в колі витоку струму на землю від довжини кабеля пошкодженого відгалуження та завантаження асинхронних двигунів з урахуванням процесу вибігу останніх.

Удосконалено методику розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних електротехнічних комплексів (довжин та перерізів жил гнучких кабелів) шляхом доповнення її оцінкою перехідного процесу після відключення напруги живлення за величиною сукупної кількості електрики через опір кола витоку струму на землю. Запропоновано спосіб щодо корекції перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексів після відключення напруги живлення.

Додаток А

Відомості з моделювання

Таблиця А.1

Розшифрування позицій на рис. 2.4, 2.6, 2.7, 2.9, 2.12, А.2 – А.4

Позиція	Аналітична залежність, яка реалізується позначеним блоком (групою блоків)
<i>1</i>	<i>2</i>
1	Перше рівняння системи (2.5), обчислює просторовий вектор потокозчеплення статора та ГК \bar{y}_1
2	Друге рівняння системи (2.5), обчислює просторовий вектор потокозчеплення ротора \bar{y}_r
3	Третє рівняння системи (2.5), являє собою основне рівняння динаміки електропривода, дозволяє обчислити частоту обертання ротора двигуна ω
4	Залежність (2.10) для обчислення просторового вектора струму статорного ланцюга \bar{i} за потокозчепленнями \bar{y}_1 та \bar{y}_r
5	Вираз (2.11), що дозволяє обчислити значення просторового вектора струму ротора \bar{i}_r за потокозчепленнями \bar{y}_1 та \bar{y}_r
6	Рівняння (2.6) для обрахування електромагнітного моменту асинхронного двигуна
7	Залежність (2.8), що зв'язує обертаючі моменти еквівалентної двополусної та реальної багатополусної асинхронної машини
8	Залежність (2.9), яка зв'язує моменти інерції еквівалентної двополусної та реальної багатополусної асинхронної машини
9	Вираз (2.7), що зв'язує частоти обертання ротора еквівалентної двополусної та реальної багатополусної асинхронної машини
10	Залежність (2.20) для обчислення значень просторового вектора напруги на затискачах статора двигуна відгалуження \bar{u}_s
11	Залежність (2.21), що зв'язує значення просторового вектора напруги на затискачах статора двигуна \bar{u}_s , обчисленого при з'єднанні фаз відгалуження у «трикутник», з аналогічним просторовим вектором \bar{u}_{se} , що утворений із фазних напруг еквівалентної «зірки» статора
12	Залежність (2.15), що зв'язує просторовий вектор струму відгалуження для еквівалентного «трикутника» \bar{i} із аналогічним вектором для еквівалентної «зірки» \bar{i}_e
13	Вираз (2.14), що встановлює зв'язок просторового вектора напруги на вході відгалуження \bar{u}_1 , утвореного з фазних напруг еквівалентного «трикутника» відгалуження, з аналогічним вектором \bar{u}_{1e} , що утворений з фазних напруг еквівалентної «зірки»

1	2
14	Залежність (2.17), що визначає значення змінної стану КА відгалуження b за допомогою логічної операції «АБО»
15	Формула (2.16) для визначення опору КА відгалуження залежно від стану його контактів
16	Залежність (2.18) для обчислення значень змінної b'' , що визначає самовільне відключення комутаційного апарата відгалуження через зниження напруги на котушці керування
17	Обчислення складових активного опору фази еквівалентного трикутника відгалуження R_1 за залежністю (2.4)
18	Залежність (2.34) для обчислення опору автоматичного вимикача в залежності від стану його контактів
19	Вираз (2.35), що визначає значення змінної стану автоматичного вимикача a
20	Диференційне рівняння (2.37), що описує процеси в загальній частині мережі «ТР-АВ-МК»
21	Вирази (2.38) та (2.39), що описують алгоритм роботи апарата захисту від витоків струму на землю
22	Залежності (2.43) та (2.44) для обчислення у довільний момент перебігу аварійної ситуації відповідно сукупної ємності та активного опору ізоляції фаз кабелів, що мають електричний зв'язок із місцем виникнення витоку струму на землю, а також формули (2.42)
23	Залежності (2.47) та (2.48), що моделюють роботу пристрою автоматичної компенсації ємнісної складової струму витоку, а також допоміжні блоки для визначення моментів зміни конфігурації мережі та генерації реалізацій випадкової величини коефіцієнта розладу компенсатора
24	Система диференційних рівнянь (2.50), що дозволяє обчисити миттєві значення струму витоку
25	Обчислення ефективного значення струму витоку та, згідно виразу (2.51), кількості електрики, що пройшла через опір кола однофазного витоку струму на землю
26	Перше рівняння системи (2.23), яка описує асинхронний двигун при функціонування у складі багатодвигунового відгалуження
27	Вираз (2.24) для обчислення просторового вектора струму статора АД при роботі у складі багатодвигунового відгалуження
28	Друге рівняння системи (2.23), яка описує асинхронний двигун при функціонування у складі багатодвигунового відгалуження
29	Вираз (2.25) для обчислення просторового вектора струму ротора АД при роботі у складі багатодвигунового відгалуження
30	Диференційне рівняння (2.22), що описує процеси у КА та гнучкому кабелі багатодвигунового відгалуження

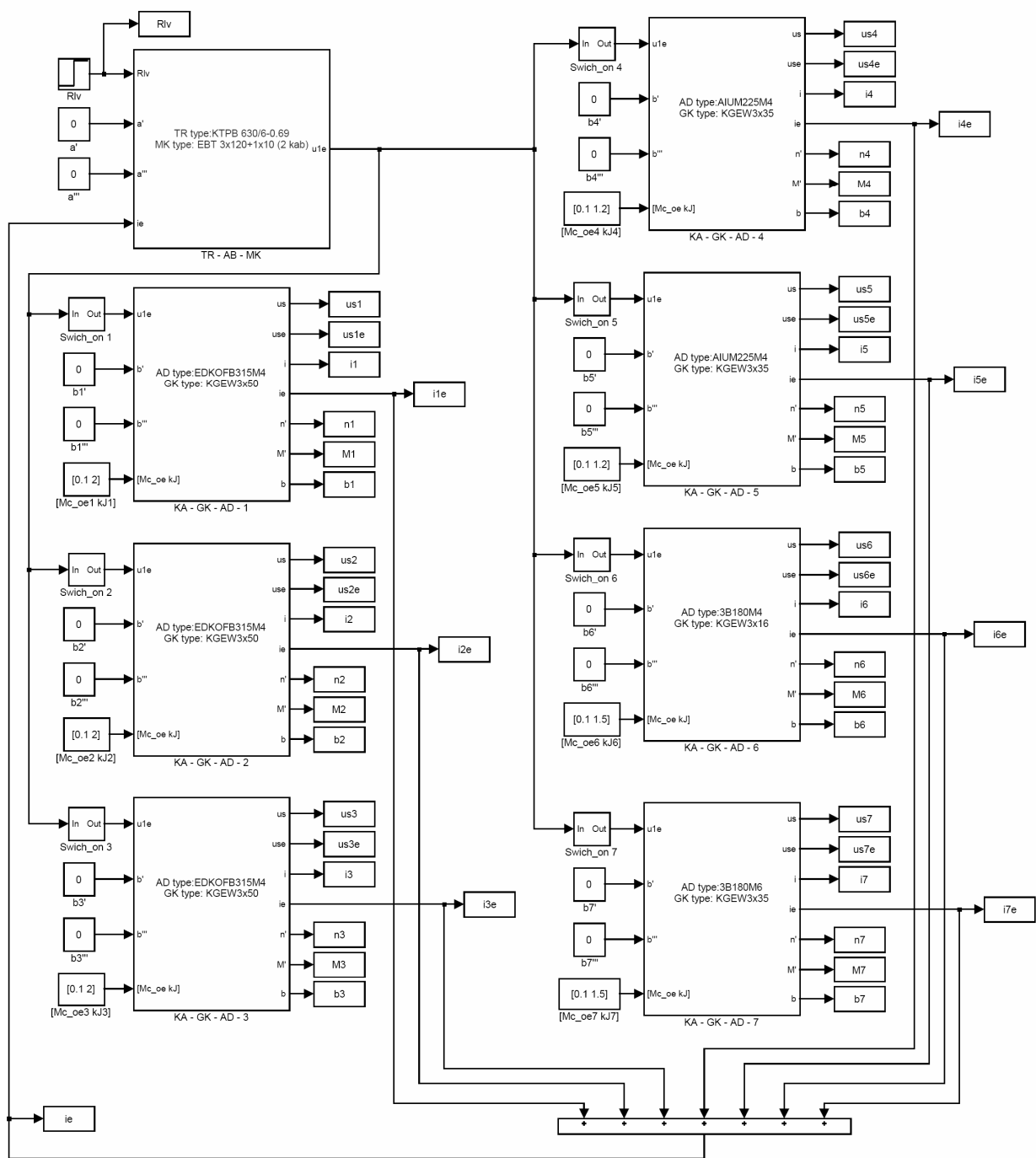


Рис. А.1. Структурна схема комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 660 В

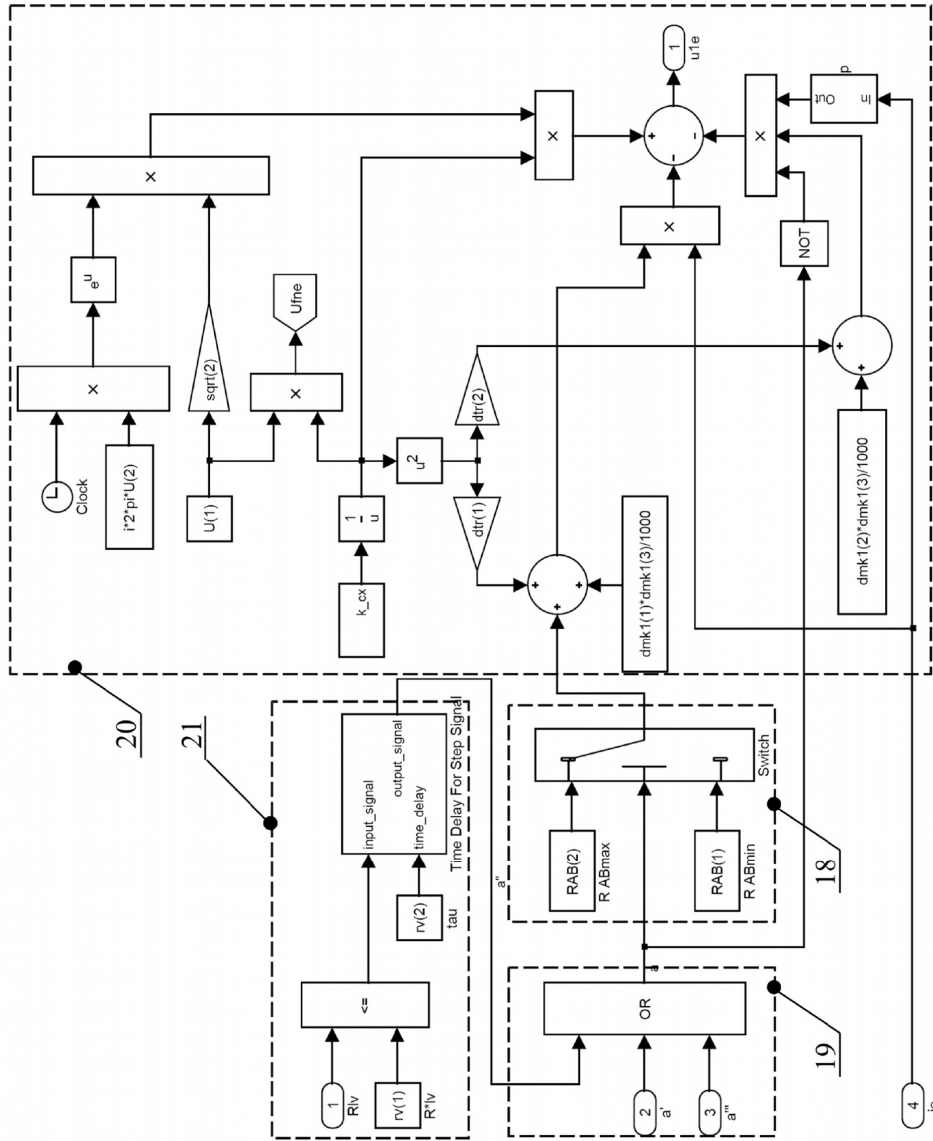


Рис. А.2. Структура підсистеми «TR-AB-MK» комп'ютерної моделі загальної частини ЕТК ДШ; позиції 18-21 розшифровані в табл. А.1

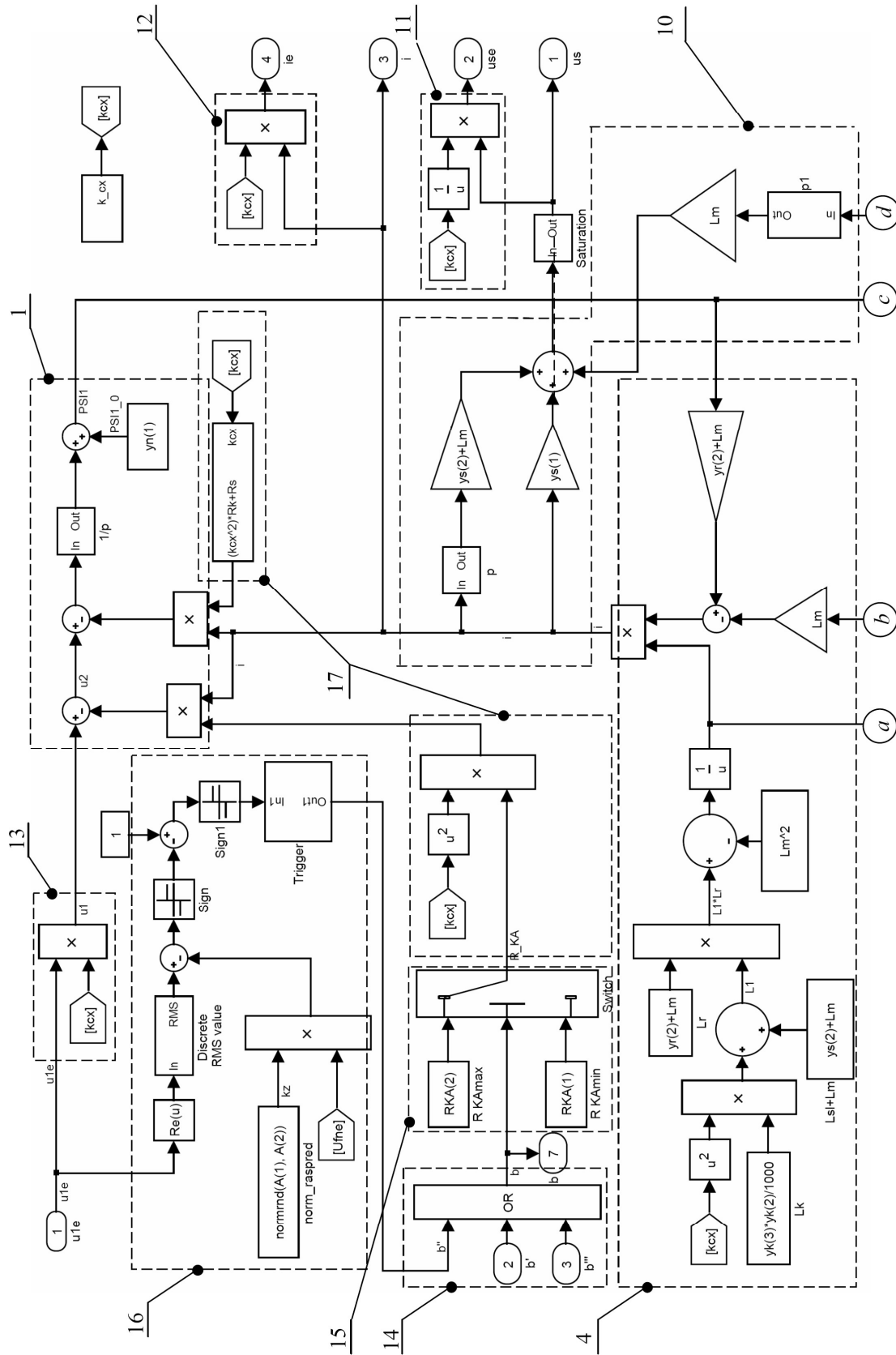


Рис. А.3 (початок). Внутрішня структура підсистем "КА-ГК-АД-І" комп'ютерної моделі ЕТК ДШ; позиції розшифровані в табл. А.1

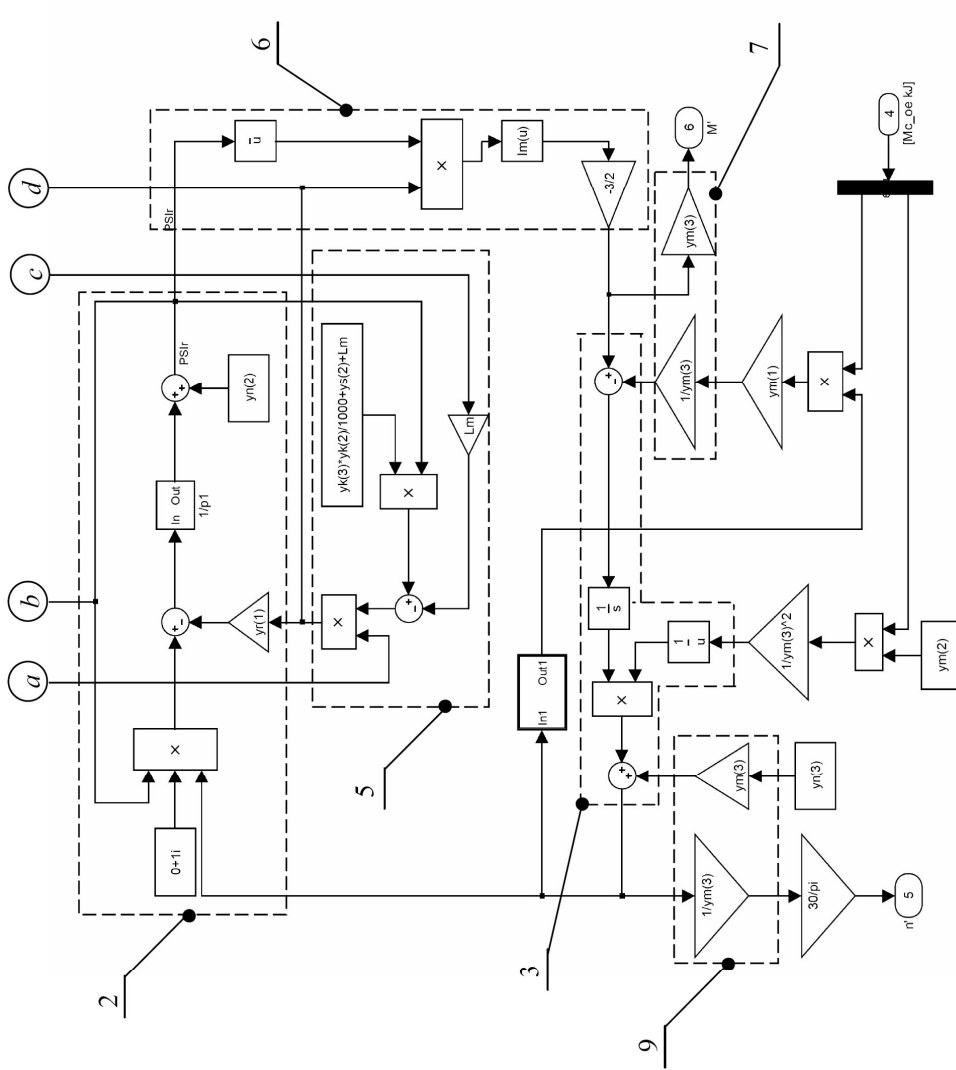


Рис. А.3 (закінчення). Внутрішня структура підсистем “КА-СК-AD-І” комп’ютерної моделі ЕТК ДШ; позиції розшифровані в табл. А.1

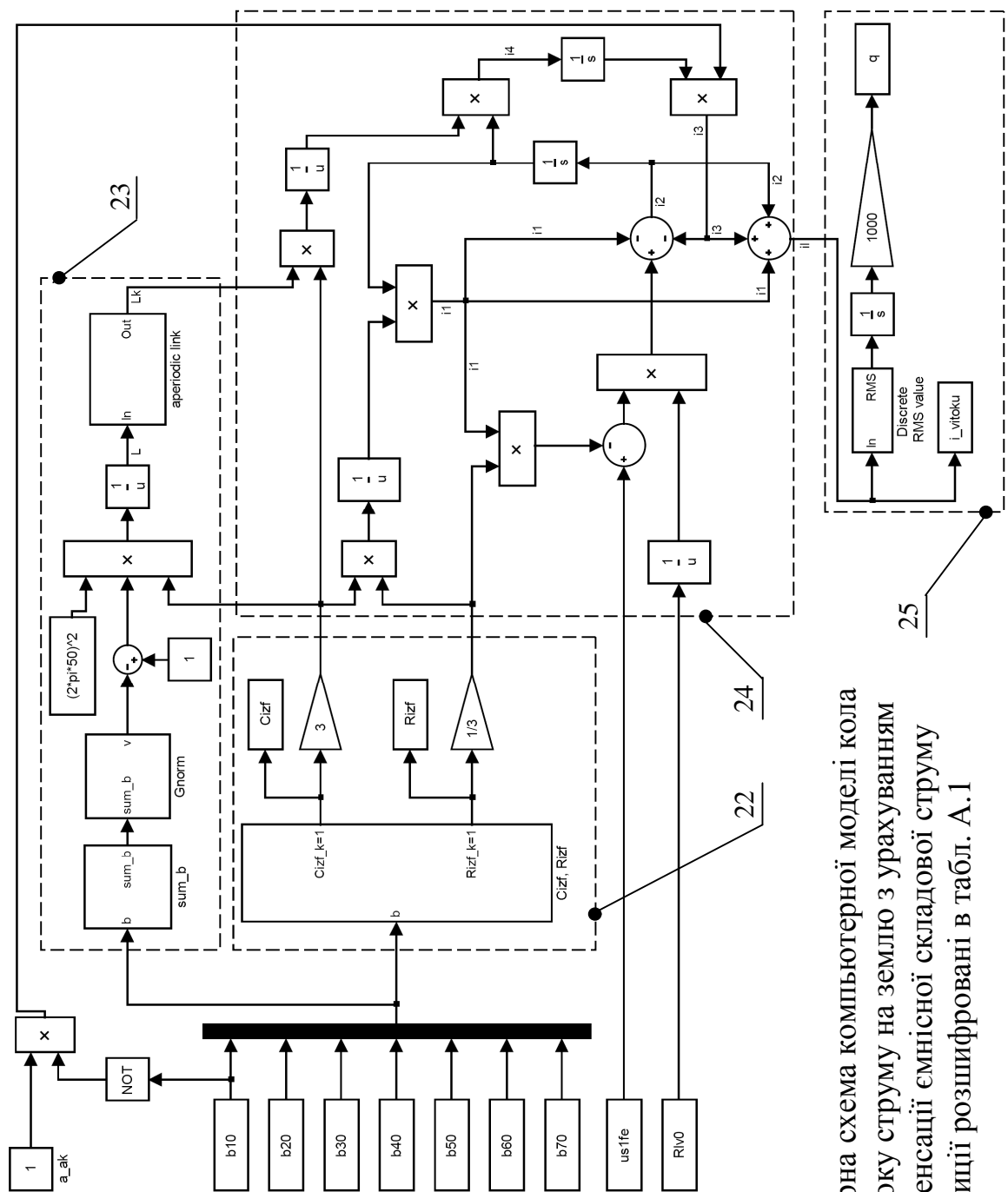


Рис. А.4. Структурна схема комп'ютерної моделі кола однофазного витоку струму на землю з урахуванням пристрою компенсації ємнісної складової струму витоку; позиції розшифровані в табл. А.1

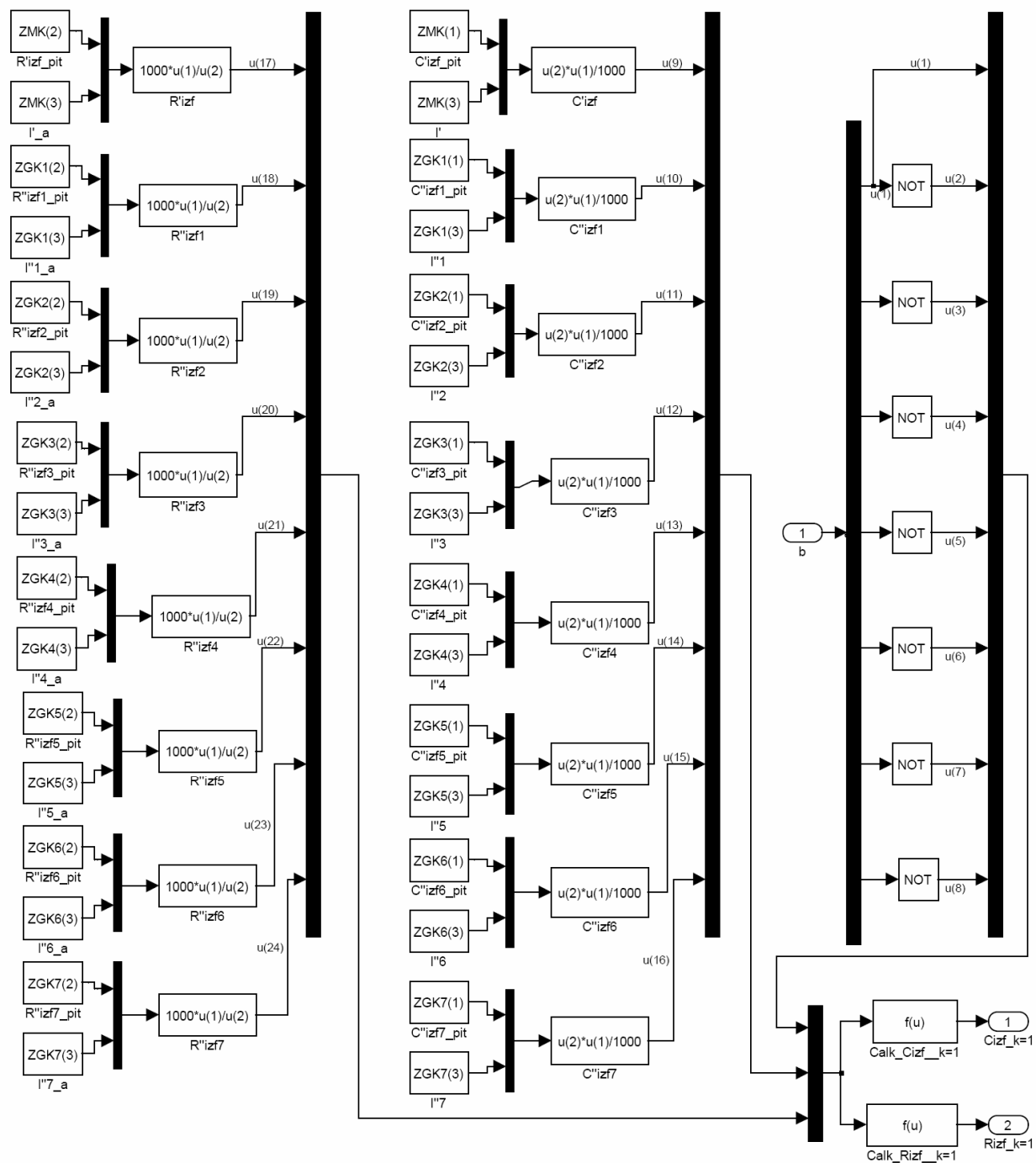


Рис. А.5. Внутрішня структура підсистеми «Cizf , Rizf» комп'ютерної моделі кола витoku струму на землю у першому з семи відгалужень ЕТК ДШ

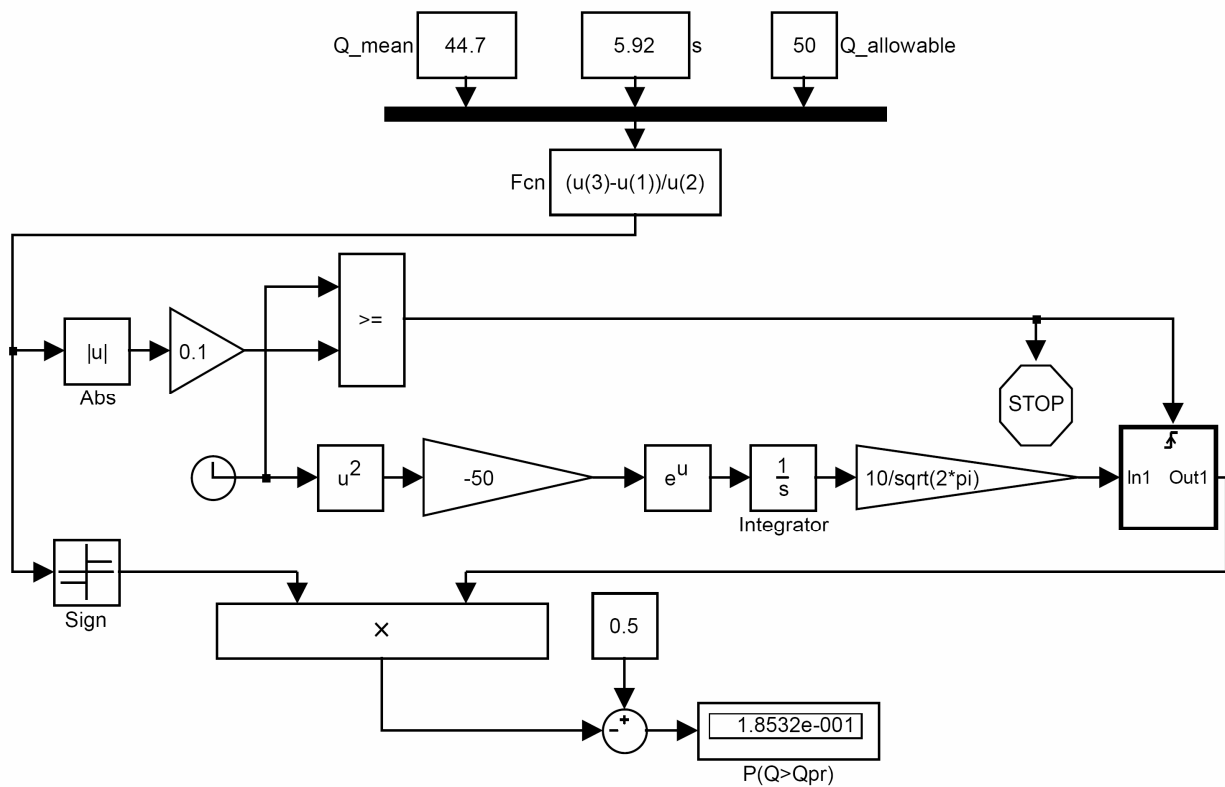


Рис. А.6. Комп'ютерна модель для оцінки імовірності $P(Q > Q_{nprun})$ за вибірковими характеристиками загальної кількості електрики Q згідно залежності (2.54)

Таблиця А.2
Технічні характеристики електродвигунів частини ЕТК ДШ напругою 660 В, що прийнята для моделювання

№	Тип електродвигуна	Номін. потужність, кВт	Синхр. частота оберт., об/хв	Номін. лінійна напруга, В	Схема	У номінальному режимі			Іп/Ін	Мп/Мн	Мmax/Мн	момент інерції, кг·м ²
						ковзання, %	ККД, %	cos φ				
1	ЭДКОФВ315М4	160	1500	660	Δ	1,1	94	0,85	7,0	2,5	3,0	2
2	АИУМ225М4	55	1500	660	Y	1,6	92,5	0,87	7,5	3,2	3,1	0,99
3	ЗВ180М4	30	1500	660	Y	2,4	90	0,85	7,5	2,0	2,6	0,3
4	ЗВ180М6	18,5	1000	660	Y	2,2	88	0,81	7,0	2,0	2,4	0,5

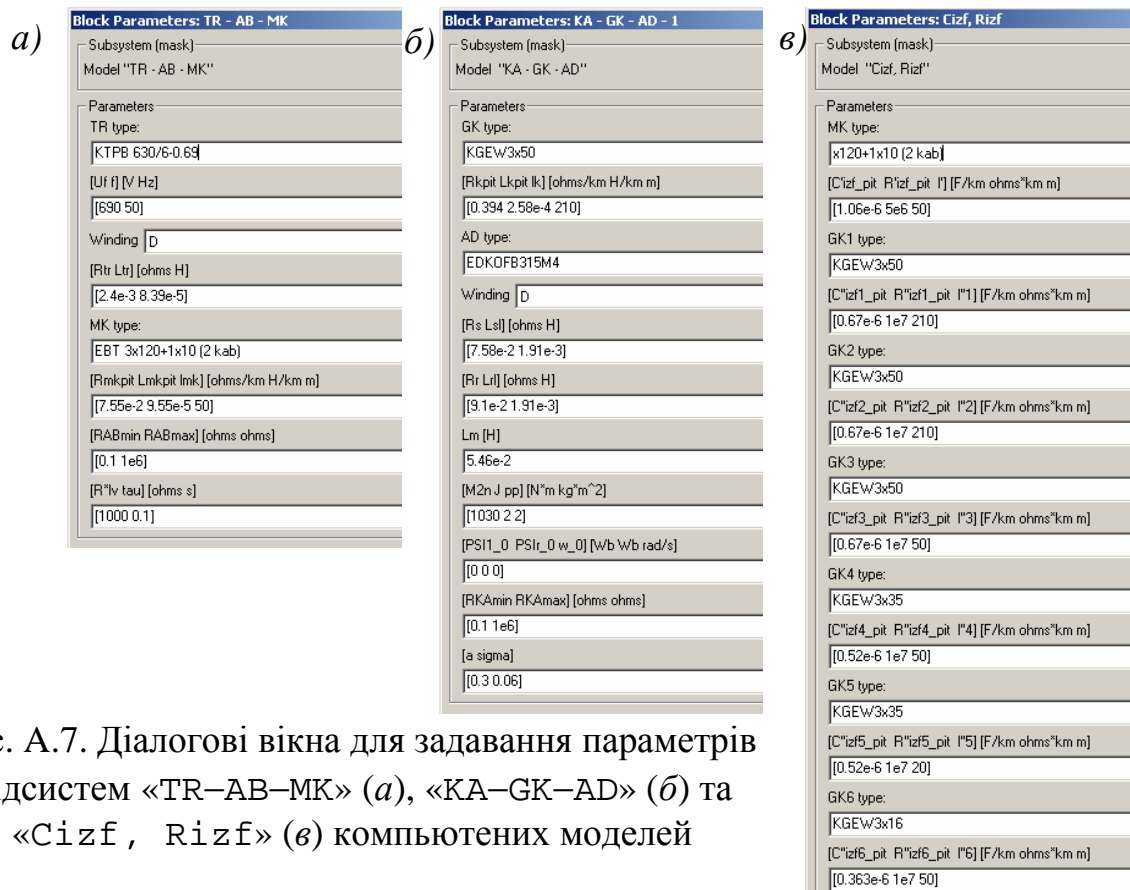


Рис. А.7. Діалогові вікна для задавання параметрів підсистем «TR–AB–МК» (а), «KA–GK–AD» (б) та «Cizf, Rizf» (в) комп'ютерних моделей

Таблиця А.3

Параметри підсистеми «TR–AB–МК» комп'ютерної моделі ЕТК ДШ, яка моделює загальну частину мережі напругою 660 В

№	Параметр	Розмірність	Машинна змінна		Значення параметра
			у діалог. вікні	на структур. схемі	
1	Тип підстанції		TR type	–	КТПВ 630/6–0,69
2	U_{ϕ}	В	Uf	U(1)	690
3	f	Гц	f	U(2)	50
4	Схема		Winding	C	Δ (трикутник)
5	R_{mp}	Ом	Rtr	dtr(1)	$2,4 \cdot 10^{-3}$
6	L_{mp}	Гн	Ltr	dtr(2)	$8,39 \cdot 10^{-5}$
7	Тип магістр. кабеля		MK type	–	ЭВТ 3x120+1x10 (2 кабелі)
8	$R_{MK\ num}$	Ом/км	Rmkpit	dmk1(1)	$7,55 \cdot 10^{-2}$ (двох кабелів)
9	$L_{MK\ num}$	Гн/км	Lmkpit	dmk1(2)	$9,55 \cdot 10^{-5}$ (двох кабелів)
10	l_{MK}	м	lmk	dmk1(3)	50 (кожного)
11	$R_{AB\ min}$	Ом	RABmin	RAB(1)	0,1
12	$R_{AB\ max}$	Ом	RABmax	RAB(2)	10^6
13	$R_{лг}^*$	Ом	R*lv	rv(1)	1000
14	t	с	tau	rv(2)	0,1

Таблиця А.4

Параметри підсистем "КА-СК-AD-i" комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 660 В

№	Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра для відгалуження №								
			1	2	3	4	5	6	7		
			КГЭШ								
			Машинні змінні								
			у діалог. вікні	на структур. схемі							
1	Тип гнучкого кабеля		Gktype	-	3x50	3x50	3x50	3x35	3x35	3x16	3x35
2	$R_{к\text{ит}}$	Ом/км	Rkpit	yk (1)	0,394	0,394	0,394	0,539	0,539	1,220	0,539
3	$L_{к\text{ит}}$	Гн/км	Lkpit	yk (2)	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$
4	$I_{к}$	м	lk	yk (3)	210	210	50	50	20	50	50
5	Тип двигуна		ADtype	-	ЭДКОФВ315М4	ЭДКОФВ315М4	ЭДКОФВ315М4	АИУМ225М4	АИУМ225М4	3В180М4	3В180М6
6	Схема		Winding	W	Δ (трикутник)						
7	R_s	Ом	Rs	ys (1)	$7,58 \cdot 10^{-2}$	$7,58 \cdot 10^{-2}$	$7,58 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$2,72 \cdot 10^{-1}$	$4,09 \cdot 10^{-1}$
8	L_{sl}	Гн	Lsl	ys (2)	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$
9	R_r	Ом	Rr	yr (1)	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$3,13 \cdot 10^{-1}$	$4,58 \cdot 10^{-1}$
10	L_{rl}	Гн	Lrl	yr (2)	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$
11	L_m	Гн	Lm	Im	$5,46 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$9,99 \cdot 10^{-2}$	$1,29 \cdot 10^{-1}$
12	M_{2n}	Н·м	M2n	ym (1)	1030	1030	1030	356	356	196	181
13	J	кг·м ²	J	ym (2)	2	2	2	0,99	0,99	0,3	0,5
14	p	пар	pp	ym (3)	2						
15	$\bar{\psi}_l(0)$	Вб	PSI1_0	yn (1)	0						
16	$\bar{\psi}_r(0)$	Вб	PSIR_0	yn (2)	0						
17	$\omega(0)$	рад/с	w_0	yn (3)	0						
18	R_{KAmin}	Ом	RKAmin	RKA (1)	0,1						
19	R_{KAmax}	Ом	RKAmax	RKA (2)	10^6						
20	a	в.о.	a	A (1)	згідно умов експеримента						
21	σ	в.о.	sigma	A (2)	згідно умов експеримента						
22	k_J	в.о.	kJ	-	2						
23	M_c	в.о.	Mc	-	0,1						

Таблиця А.5

Параметри підсистеми «Sizf, R'izf» комп'ютерної моделі кола однофазного
 вигоку струму на землю у мережі напругою 660 В

№	Параметр	Од. виміру	Машинна змінна		Значення параметра для відгалуження №						
			у діалоговому вікні	на структ. схемі	1	2	3	4	5	6	7
1	Тип МК		МК type	–	ЭВТ 3x120+1x10 (два паралельні кабелі)						
2	C'_{izf_pit}	Ф/км	C'_{izf_pit}	ZMK (1)	1.06·10 ⁻⁶ (двох паралельних кабелів)						
3	R'_{izf_pit}	Ом·км	R'_{izf_pit}	ZMK (2)	5·10 ⁶ (двох паралельних кабелів)						
4	I'	м	I'	ZMK (3)	50 (кожного кабеля)						
5	Тип ГК		GK type	–	КГЭШ						
6	C''_{izf_pit}	Ф/км	C''_{izf_pit}	ZGK (1)	3x50	3x50	3x50	3x35	3x35	3x16	3x35
7	R''_{izf_pit}	Ом·км	R''_{izf_pit}	ZGK (2)	0,67·10 ⁻⁶						
8	I''	м	I''	ZGK (3)	210	210	50	50	20	50	50
9	μ_v	в.о.	mean (v)	mV	0						
10	σ_v	в.о.	std (v)	sv	0,033						

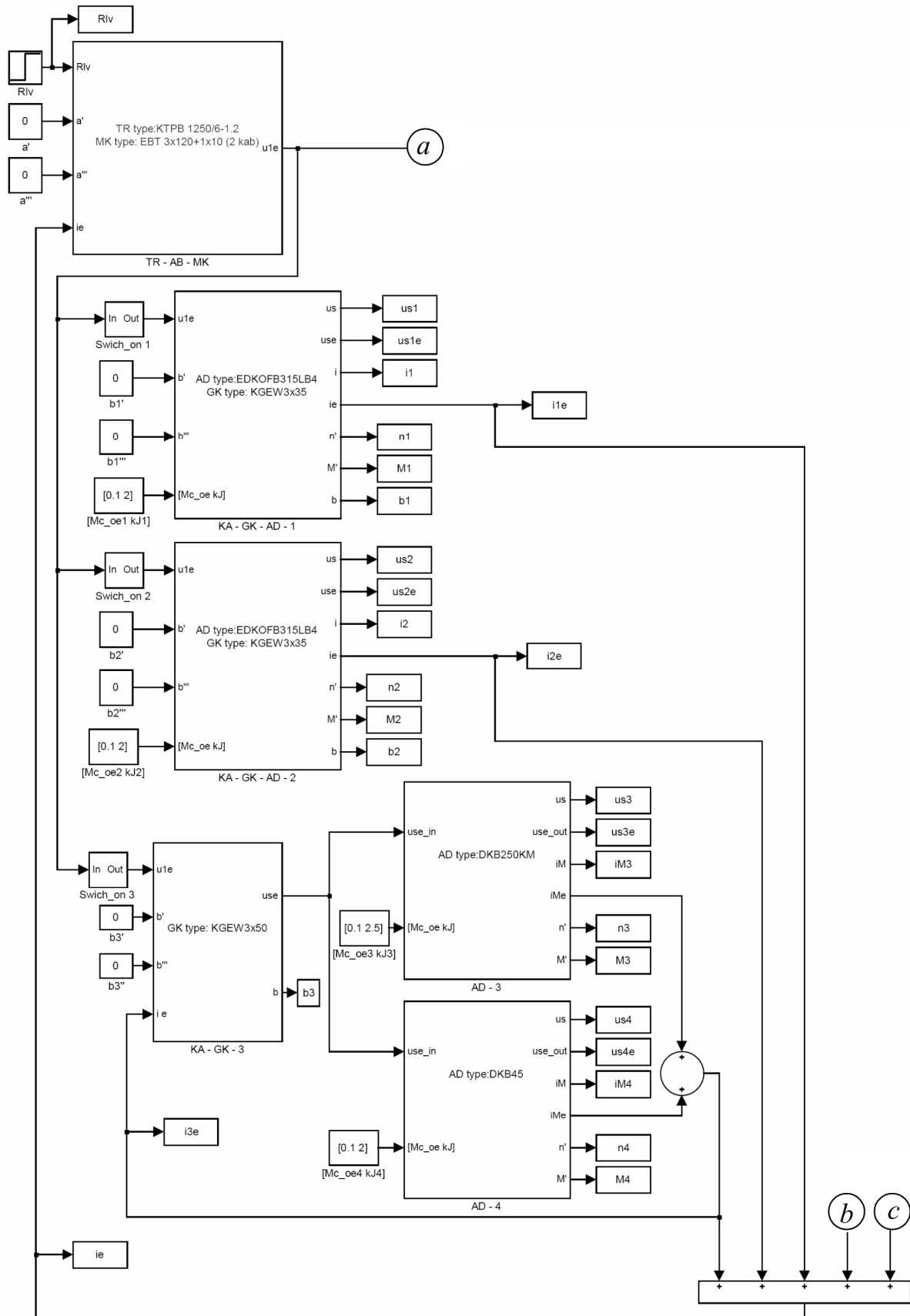


Рис. А.8 (початок). Структурна схема комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 1140 В

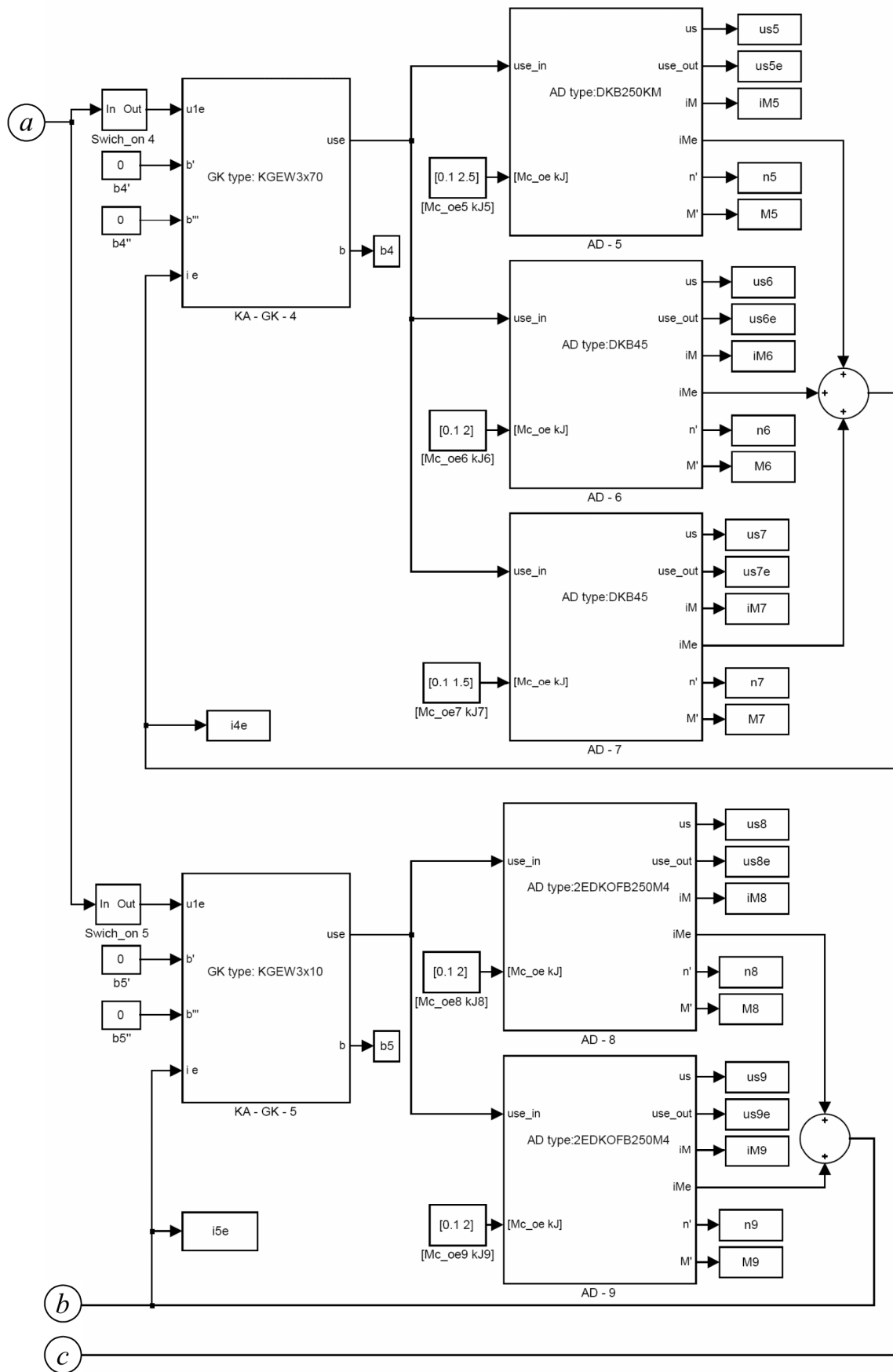


Рис. А.8 (закінчення). Структурна схема комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 1140 В

Таблиця А.7

Технічні характеристики електродвигунів ЕТК ДШ напругою 1140 В

№	Тип електродвигуна	Номинальна потужність, кВт	Синхронна частота обертання, об/хв	Номинальна лінійна напруга, В	Схема	У номінальному режимі			Іп/Ін	Мп/Мн	Мmax/Мн	момент інерції, кг·м ²
						ковзання, %	ККД, %	cos φ				
1	ДКВ250КМ	250	1500	1140	Y	1,3	94,0	0,88	7,9	1,5	3,5	2,1
2	ДКВ45	45	1500	1140	Y	1,4	90,0	0,85	5,3	2,1	2,2	0,31
3	ЭДКОФВ315LB4	250	1500	1140	Y	1,3	95,4	0,85	8,5	2,6	3,8	2,8
4	2ЭДКОФВ250М4	55	1500	1140	Y	1,5	92,5	0,86	7,5	3,2	3,1	0,6

Таблиця А.8

Параметри підсистеми «TR–AB–МК» комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 1140 В

№	Параметр	Розмірність	Машинна змінна		Значення параметра
			у діалог. вікні	на структур. схемі	
1	Тип підстанції		TR type	–	КТПВ 1250/6–0,69
2	U_{ϕ}	В	Uf	U(1)	690
3	f	Гц	f	U(2)	50
4	Схема		Winding	C	Y (зірка)
5	R_{mp}	Ом	Rtr	dtr(1)	$1,5 \cdot 10^{-3}$
6	L_{mp}	Гн	Ltr	dtr(2)	$4,8 \cdot 10^{-6}$
7	Тип магістр. кабеля		MK type	–	ЭВТ 3x120+1x10 (2 кабелі)
8	$R_{MK\ num}$	Ом/км	Rmkpit	dmk1(1)	$7,55 \cdot 10^{-2}$ (двох кабелів)
9	$L_{MK\ num}$	Гн/км	Lmkpit	dmk1(2)	$9,55 \cdot 10^{-5}$ (двох кабелів)
10	l_{MK}	м	lmk	dmk1(3)	250 (кожного)
11	$R_{AB\ min}$	Ом	RABmin	RAB(1)	0,1
12	$R_{AB\ max}$	Ом	RABmax	RAB(2)	10^6
13	R_{Δ}^*	Ом	R*lv	rv(1)	1000
14	t	с	tau	rv(2)	0,07

Таблиця А.9 (початок)
 Параметри підсистем, що репрезентують відгалуження мережі, комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 1140 В

№	Параметр	Одиниця виміру	Значення параметра для відгалуження №													
			Машинні змінні у		1		2		3		4		5		6	
			діалог. вікні	структ. схемі	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14		
1	2	3														
1	Тип гнучкого кабеля		GKtype	-			3x35	3x35	3x50	КГЭШ					3x10	
2	$R_{к\text{ min}}$	Ом/км	Rkpit	$y_k(1)$		0,539	0,539	0,394			0,281			1,960		
3	$L_{к\text{ min}}$	Гн/км	Lkpit	$y_k(2)$		$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$			$2,52 \cdot 10^{-4}$			$2,93 \cdot 10^{-4}$		
4	l_k	м	Lk	$y_k(3)$		390	55	390			390			55		
	Двигун					M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9		
5	Тип двигуна		ADtype	-		ЭДКОФВ 315LB4	ЭДКОФВ 315LB4	ДКВ 250KM	ДКВ45	ДКВ 250KM	ДКВ45	ДКВ45	ДКВ45	2ЭДКОФ В250M4		
6	Схема		Winding	W						Y (зірка)						
7	R_s	Ом	Rs	$y_s(1)$		$5,62 \cdot 10^{-2}$	$5,62 \cdot 10^{-2}$	$5,641 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-1}$	$5,641 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-1}$	$2,79 \cdot 10^{-1}$	$2,931 \cdot 10^{-1}$	$2,931 \cdot 10^{-1}$		
8	L_{sl}	Гн	Lsl	$y_s(2)$		$9,351 \cdot 10^{-4}$	$9,351 \cdot 10^{-4}$	$1,022 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-3}$	$1,022 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$		
9	R_r	Ом	Rr	$y_r(1)$		$6,968 \cdot 10^{-2}$	$6,968 \cdot 10^{-2}$	$6,995 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-1}$	$6,995 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-1}$	$3,18 \cdot 10^{-1}$	$3,517 \cdot 10^{-1}$	$3,517 \cdot 10^{-1}$		
10	L_{rl}	Гн	Lrl	$y_r(2)$		$9,351 \cdot 10^{-4}$	$9,351 \cdot 10^{-4}$	$1,022 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-3}$	$1,022 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-3}$	$7,737 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$		
11	L_m	Гн	Lm	Lm		$3,262 \cdot 10^{-2}$	$3,262 \cdot 10^{-2}$	$3,964 \cdot 10^{-2}$	$1,811 \cdot 10^{-1}$	$3,964 \cdot 10^{-2}$	$1,811 \cdot 10^{-1}$	$1,811 \cdot 10^{-1}$	$1,629 \cdot 10^{-1}$	$1,629 \cdot 10^{-1}$		
12	M_{2H}	Н·м	M2n	$y_m(1)$		1613	1613	1613	349	1613	349	349	355	355		
13	J	кг·м ²	J	$y_m(2)$		2,8	2,8	2,1	0,31	2,1	0,31	0,31	0,6	0,6		
14	p	пар	pp	$y_m(3)$												
15	$\psi_1(0)$	Вб	PSI1_0	$y_n(1)$												
16	$\psi_r(0)$	Вб	PSIr_0	$y_n(2)$												
17	$\omega(0)$	рад/с	w_0	$y_n(3)$												
18	$R_{K\text{ min}}$	Ом	RKamin	RKA(1)									0,1			

Таблиця А.9 (закінчення)

Параметри підсистем, що репрезентують відгалуження мережі, комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 1140 В													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
19	R_{KAmax}	Ом	R_{KAmax}	РКА (2)					10^6				
20	a	в.о.	a	A (1)	0,3	0,5	0,4			0,5			0,4
21	σ	в.о.	σ	A (2)					0,06				
22	k_J	в.о.		-	2	2	2,5	2	2,5	2	1,5		2
23	M_c	в.о.	M_c	-					0,1				

Таблиця А.10
Параметри підсистеми «Sizf, R'izf» моделі кола витoku струму на землю у мережі напругою 1140 В

№	Параметр	Фіз. вимірю	Машинна змінна		Значення параметра для відгалуження №								
			у діалоговому вікні	на структур. схемі	1	2	3	4	5				
1	Тип МК		МК type	-									
2	C'_{izf_pit}	Ф/км	C'_{izf_pit}	ZMK (1)									
3	R'_{izf_pit}	Ом·км	R'_{izf_pit}	ZMK (2)									
4	l'	м	l'	ZMK (3)									
5	Тип ГК		ГК type	-									
6	C''_{izf_pit}	Ф/км	C''_{izf_pit}	ZGK (1)									
7	R''_{izf_pit}	Ом·км	R''_{izf_pit}	ZGK (2)									
8	l''	м	l''	ZGK (3)									
9	μ_v	в.о.	mean (v)	mv									
10	σ_v	в.о.	std (v)	sv									

Таблиця А.11

Технічні характеристики електродвигуна, що використовуються при імітаційному експериментуванні

Тип електродвигуна	Номинальна потужність, кВт	Синхронна частота обертання, об/хв	Номинальна лінійна напруга, В	Схема	У номінальному режимі			Іп/Ін	Мп/Мн	Мmax/Мн	момент інерції, кг·м ²
					ковзання, %	ККД, %	cos φ				
ЭДКОФВ315М4	160	1500	660	Δ	1,1	94,0	0,85	7,0	2,5	3,0	2

Таблиця А.12

Параметри підсистеми «TR–AB–MK» комп'ютерної моделі ЕТК ДШ, яка моделює загальну частину мережі

№	Параметр	Розмірність	Машинна змінна	Значення параметра
1	Тип підстанції		TR type	ТСВП–1000
2	U_{ϕ}	В	Uf	690
3	f	Гц	f	50
4	Схема		Winding	Δ (трикутник)
5	R_{mp}	Ом	Rtr	0,0035
6	L_{mp}	Гн	Ltr	$6,05 \cdot 10^{-5}$
7	Тип магістр. кабеля		MK type	ЭВТ 3x120+1x10 (2 кабелі)
8	$R_{MK\ num}$	Ом/км	Rmkpit	0,0755 (2 кабелів)
9	$L_{MK\ num}$	Гн/км	Lmkpit	$9,55 \cdot 10^{-5}$ (2 кабелів)
10	l_{MK}	м	lmk	250 (кожного з кабелів)
11	$R_{AB\ min}$	Ом	RABmin	0,1
12	$R_{AB\ max}$	Ом	RABmax	10^6
13	R_{lv}^*	Ом	R*lv	1000
14	t	с	tau	0,1

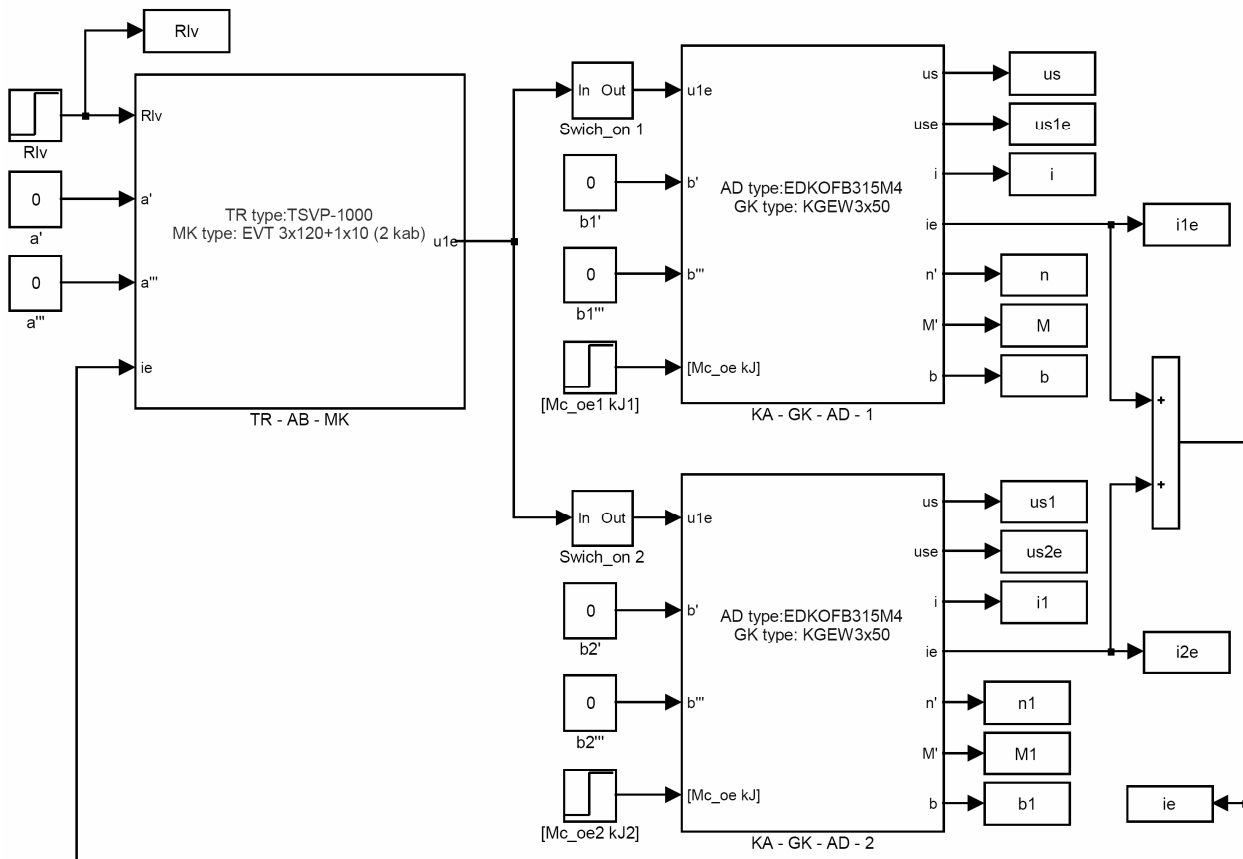


Рис. А.10. Структурна схема комп'ютерної моделі ЕТК ДШ за наявності двох відгалужень

Таблиця А.13
 Параметри підсистем «КА–ГК–АД» комп'ютерної моделі ЕТК ДШ, які моделюють відгалуження системи

№	Параметр	Од. виміру	Машинна змінна	Параметр дійсний для двигунів	Значення параметра
1	2	3	4	5	6
1	Тип гнучкого кабеля		GKtype	BCi	КГЭШ
					3x50
2	$R_{k\ num}$	Ом/км	Rkpit		0,394
3	$L_{k\ num}$	Гн/км	Lkpit		$2,58 \cdot 10^{-4}$
4	l_k	м	lk	№1	55
				№2	x_1
5	Тип двигуна		ADtype	BCi	ЭДКОФВ315М4
6	Схема		Winding		Δ (трикутник)
7	R_s	Ом	Rs		$7,58 \cdot 10^{-2}$
8	L_{sl}	Гн	Lsl		$1,91 \cdot 10^{-3}$
9	R_r	Ом	Rr		$9,1 \cdot 10^{-2}$
10	L_{rl}	Гн	Lrl		$1,91 \cdot 10^{-3}$

1	2	3	4	5	6
11	L_m	Гн	Lm		$5,46 \cdot 10^{-2}$
12	M_{2H}	Н·м	M2n		1030
13	J	кг·м ²	J		2
14	P	пар	pp		2
15	$\bar{y}_1(0)$	Вб	PSI1_0		0
16	$\bar{y}_r(0)$	Вб	PSIr_0		0
17	$w(0)$	рад/с	w_0		0
18	R_{KAmin}	Ом	RKAmin		0,1
19	R_{KAmax}	Ом	RKAmax		10^6
20	a	в.о.	a		0,5
21	s	в.о.	sigma		0,06
22	k_J	в.о.	kJ		2
23	M_c	в.о.	Mc		x_2

Таблиця А.14

Параметри комп'ютерної моделі однофазного витoku струму на землю

№	Параметр	Одиниця виміру	Машинна змінна	Значення параметра
1	Тип магістр. кабеля		MK type	ЭВТ 3x120+1x10 (2 каб.)
2	$C'_{iz \phi num}$	Ф/км	C'izf_pit	$1,06 \cdot 10^{-6}$ (2 кабелів)
3	$R'_{iz \phi num}$	Ом·км	R'izf_pit	$5 \cdot 10^6$ (2 кабелів)
4	l'	м	l'	250 (кожного кабеля)
5	Тип ГК №1		GK1 type	КГЭШ 3x50
6	$C''_{iz \phi 1 num}$	Ф/км	C''izf1_pit	$0,67 \cdot 10^{-6}$
7	$R''_{iz \phi 1 num}$	Ом·км	R''izf1_pit	$10 \cdot 10^6$
8	l''_1	м	l''1	55
9	Тип ГК №2		GK2 type	КГЭШ 3x50
10	$C''_{iz \phi 2 num}$	Ф/км	C''izf2_pit	$0,67 \cdot 10^{-6}$
11	$R''_{iz \phi 2 num}$	Ом·км	R''izf2_pit	$10 \cdot 10^6$
12	l''_2	м	l''2	x_1

Скорочений текст допоміжної програми run_odnof_x1.m для реалізації плану однофакторного імітаційного дослідження впливу довжини кабеля аварійного відгалуження на електробезпеку експлуатації ЕТК ДШ

<pre>format compact m=100 %number of replicate observations % x1=var x2=0.1 % Section #1 disp('Section #1') x1=240 for z=1:m clear i* u* n* M1 M2 b* Rlv t_vitoku t sim('AD2_x3_2') us2fe=cat(2,t,real(us2e)); b10=cat(2,t,b1); b20=cat(2,t,b2); Rlv0=cat(2,t,Rlv); sim('ut2_M2_x3_2') S1(z)=max(q); end save S_1 S1 clear S1 % Section #10 disp('Section #10') x1=330 for z=1:m</pre>	<pre>clear i* u* n* M1 M2 b* Rlv t_vitoku t sim('AD2_x3_2') us2fe=cat(2,t,real(us2e)); b10=cat(2,t,b1); b20=cat(2,t,b2); Rlv0=cat(2,t,Rlv); sim('ut2_M2_x3_2') S10(z)=max(q); end save S_10 S10 clear S10 clear clc load S_1; load S_10; %Kolmogorov-Smirnov test A=rot90(S1,3); cdfn=normcdf(A,mean(A),std(A)); HS1=kstest(A,[A, cdfn],0.05) A=rot90(S10,3); cdfn=normcdf(A,mean(A),std(A)); HS10=kstest(A,[A, cdfn],0.05) save S_statist</pre>
--	--

Методика обробки результатів імітаційних досліджень

Припустимо, що в імітаційному дослідженні розглядався вплив на об'єкт фактору x , який фіксувався на k рівномірно розподілених рівнях. Кількість паралельних спостережень для всіх рівнів факторів була однаковою і складала m . Загальна кількість зареєстрованих відгуків системи становила $n = k \cdot m$. Точки, отримані в результаті моделювання, позначимо (x_i^0, y_{ij}) , де x_i^0 – i -й рівень фактора x , $i = \overline{1, k}$; y_{ij} – відгук об'єкта у j -му паралельному спостереженні при x_i^0 рівні фактора x , $j = \overline{1, m}$. За критерієм згоди Колмогорова–Смирнова отримані вибірки перевіряються на нормальність розподілення. Якщо немає підстав відкидати гіпотезу про нормальне розподілення даних кожної вибірки за рівня значущості α , перевіряється гіпотеза про однорідність вибірових дисперсій за критерієм Кохрена.

Вибіркове середнє відгуку для i -го рівня фактору x_i^0 :

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}. \quad (\text{A.1})$$

Вибіркова дисперсія залежної величини для i -го значення аргумента:

$$s_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2. \quad (\text{A.2})$$

Значення критерія Кохрена за вибірковими дисперсіями:

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^k s_i^2}. \quad (\text{A.3})$$

порівнюється із критичним $G_{кр}(a; m-1; k)$, яке для рівня значущості $a = 0,05$; $m-1=100-1=99$ ступенів свободи та $k=10$ вибірок становить:

$$G_{кр}(0,05; 99; 10) = 0,1453. \quad (\text{A.4})$$

Виконання нерівності $G < G_{кр}$ свідчить про відсутність підстав відкидати гіпотезу про однорідність вибіркових дисперсій при заданому рівні значущості a та дозволяє переходити до визначення щільності зв'язку між досліджуваними змінними. Оцінка генеральної дисперсії обчислюється наступним чином:

$$\hat{S}^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i^2. \quad (\text{A.5})$$

При виконанні співвідношення $G > G_{кр}$ гіпотеза про однорідність вибіркових дисперсій відкидається за прийнятого рівня значущості a , приймається альтернативна гіпотеза про їх неоднорідність. Висувається гіпотеза про пропорційність умовних дисперсії залежної змінної $D(y/x)$ деякій функції $h^2(x)$ [53]:

$$D(y/x) = S^2 h^2(x). \quad (\text{A.6})$$

Зворотня до $h^2(x)$ функція дозволяє обраховувати значення статистичних вагів $w(x)$:

$$w(x) = \frac{1}{h^2(x)}. \quad (\text{A.7})$$

Нормовані статистичні ваги для i -го значення аргумента оцінюються за залежністю [53]:

$$w_i = \frac{1}{s_i^2 \sum_{j=1}^k \frac{1}{s_j^2}}, \quad (\text{A.8})$$

причому має виконуватися співвідношення:

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1. \quad (\text{A.9})$$

За обчисленими w_i визначаються оцінки функції $h^2(x)$:

$$h^2(x_i^0) = \frac{1}{w_i}. \quad (\text{A.10})$$

Вид лінії регресії $\hat{h}^2(x)$ обирається з-поміж поліномів першого ($\hat{h}^2(x) = a_0 + a_1x$) та другого ($\hat{h}^2(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$) ступеня за методом найменших квадратів. Оцінка точності підбору лінії регресії $\hat{h}^2(x)$ проводиться за вибірковою дисперсією:

$$d = \frac{1}{k-p-1} \sum_{i=1}^k [\hat{h}^2(x_i^0) - h^2(x_i^0)]^2, \quad (\text{A.11})$$

де p – ступінь полінома $\hat{h}^2(x)$.

Гіпотеза про вид функції $h^2(x)$ не протерічить результатам моделювання, якщо застосування критерія однорідності до нормованих дисперсій

$$s_i'^2 = \frac{s_i^2}{\hat{h}^2(x_i^0)} \quad (\text{A.12})$$

при прийнятому рівні значущості не дасть підстав для відкидання гіпотези:

$$\frac{D(y/x_1^0)}{\hat{h}^2(x_1^0)} = \frac{D(y/x_2^0)}{\hat{h}^2(x_2^0)} = \mathbf{K} = \frac{D(y/x_k^0)}{\hat{h}^2(x_k^0)}. \quad (\text{A.13})$$

Перевірка однорідності нормованих дисперсій здійснюється за критерієм Кохрена:

$$G' = \frac{s'_{\max}{}^2}{\sum_{i=1}^k s_i'^2}. \quad (\text{A.14})$$

Якщо за прийнятого рівня значущості відсутні підстави для відкидання гіпотези про однорідність нормованих вибірових дисперсій (виконується $G' < G_{кр}$), умовні дисперсії можна вважати пропорційними функції $\hat{h}^2(x)$.

З урахуванням значень кривої регресії $\hat{h}^2(x)$ в точках x_i^0 уточнюються нормовані статистичні ваги:

$$\hat{w}_i = \frac{1}{\hat{h}^2(x_i^0)}. \quad (\text{A.15})$$

В якості оцінки S^2 (A.6) припускається використовувати сукупну оцінку цього параметра, що, при вибірках однакового об'єму, складає [53]:

$$\hat{S}^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{w}_i s_i^2. \quad (\text{A.16})$$

Визначимо ступінь щільності зв'язку між досліджуваними змінними [53]. Якщо гіпотеза про однорідність вибірових дисперсій залежної змінної не була відкинута та за однакового числа спостережень m при кожному значенні фактора, вибірове значення коефіцієнта лінійної кореляції обчислюється за залежністю:

$$\hat{r} = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^0 \bar{y}_i - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s_x \cdot s_y}, \quad (\text{A.17})$$

де

середнє значень фактора:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i^0; \quad (\text{A.18})$$

загальне середнє результатів спостережень:

$$\bar{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{y}_i ; \quad (\text{A.19})$$

середнє квадратичне відхилення значень фактора від середнього:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i^0 - \bar{x})^2} ; \quad (\text{A.20})$$

середнє квадратичне відхилення індивідуальних результатів спостережень від загального середнього \bar{y} :

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2} . \quad (\text{A.21})$$

У випадку пропорційності умовних дисперсії залежної змінної деякій функції від x вибіркоче значення коефіцієнта лінійної кореляції обчислюється наступним чином:

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i x_i^0 \bar{y}_i - \bar{x} \bar{y}}{s_x s_y} , \quad (\text{A.22})$$

де

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^k \hat{w}_i x_i^0 ; \quad (\text{A.23})$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^k \hat{w}_i \bar{y}_i ; \quad (\text{A.24})$$

$$s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i (x_i^0 - \bar{x})^2} ; \quad (\text{A.25})$$

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2} . \quad (\text{A.26})$$

Для оцінки значущості обрахованої величини вибіркового коефіцієнта лінійної кореляції використовується нерівність:

$$|\hat{r}| \sqrt{\frac{n-2}{1-\hat{r}^2}} < t_a(n-2) , \quad (\text{A.27})$$

де $t_a(n-2)$ – точка розподілення Ст'юдента для рівня значущості a та з $n-2$ ступенями свободи, для рівня значущості $a=0,05$ та $n-2=998$ ступенів свободи її значення становить:

$$t_{0,05}(998) = 1,645. \quad (\text{A.28})$$

В разі виконання умови (A.27) приймається гіпотеза про відсутність кореляційного зв'язку. Виконання зворотньої нерівності підтверджує статистичну значимість кореляційного зв'язку, що досліджується.

Вибіркове значення кореляційного відношення, інтерпретація якого не залежить від виду досліджуваної регресійної залежності, обчислюється наступним чином [53]:

$$\hat{r}_{y/x} = \frac{s_{\bar{y}(x)}}{s_y}, \quad (\text{A.29})$$

де $s_{\bar{y}(x)}$ характеризує розсіювання окремих середніх \bar{y}_i навколо свого загального середнього \bar{y} , якщо гіпотеза про однорідність вибірових дисперсій залежної змінної не була відкинута, визначається за залежністю:

$$s_{\bar{y}(x)} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y})^2}, \quad (\text{A.30})$$

а при пропорційності умовних дисперсії залежної змінної деякій функції від x обчислюється за залежністю:

$$s_{\bar{y}(x)} = \sqrt{m \sum_{i=1}^k \hat{w}_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2}. \quad (\text{A.31})$$

Для оцінки значимості кореляційного відношення $\hat{r}_{y/x}$ використовується співвідношення:

$$\frac{\hat{r} \sqrt{n-2}}{1 - \hat{r}^2} < t_{0,05}(n-2), \quad (\text{A.32})$$

в разі виконання якого робиться висновок про відсутність кореляційного зв'язку між y та x . Виконання зворотньої нерівності підтверджує статистичну значимість кореляційного зв'язку, що досліджується.

При визначенні характеру залежності між досліджуваними змінними можливі наступні варіанти:

– якщо \hat{r} є значимим, а $\hat{r}_{y/x}$ – незначимим, то необхідно провести додатковий аналіз розподілення;

– якщо \hat{r} є незначимим, а $\hat{r}_{y/x}$ – значимим, то зв'язок нелінійний;

– якщо \hat{r} та $\hat{r}_{y/x}$ є незначимими, то зв'язок відсутній;

– якщо \hat{r} та $\hat{r}_{y/x}$ є значимими, то гіпотезу про лінійний вид залежності перевіряють за допомогою критерія W^2 [53]:

$$W^2 = \frac{(n-k)(\hat{r}_{y/x}^2 - \hat{r}^2)}{(k-2)(1 - \hat{r}_{y/x}^2)}. \quad (\text{A.33})$$

Вважати гіпотезу про лінійний вид регресії статистично необгрунтованою за рівня значущості α дозволяє виконання нерівності:

$$W^2 > F(\alpha; k-2; n-k), \quad (\text{A.34})$$

де $F(\alpha; k-2; n-k)$ – критична точка розподілення Фішера–Снедекора з числами ступенів свободи $\nu_1 = k-2$ та $\nu_2 = n-k$. Для рівня значущості $\alpha = 0,05$ та ступенів свободи $\nu_1 = 8$, $\nu_2 = 990$ критична точка дорівнює:

$$F(0,05; 8; 990) = 1,95. \quad (\text{A.35})$$

В разі виконання зворотної умови обирається лінійна залежність як найбільш проста.

Розрахуємо параметри лінії регресії за методом найменших квадратів. Якщо гіпотеза про лінійний вид шуканої залежності не була відкинута, загальний вигляд регресійної прямої є наступним:

$$\hat{Y}(x) = \hat{a} + \hat{b} \cdot (x - \bar{x}), \quad (\text{A.36})$$

де оцінки параметрів \hat{a} та \hat{b} становлять:

$$\hat{a} = \bar{y}; \quad \hat{b} = \hat{r} \frac{s_y}{s_x}, \quad (\text{A.37})$$

причому параметри \hat{r} , \bar{y} , s_x , s_y визначаються за залежностями (A.17), (A.19) – (A.21) відповідно, якщо гіпотеза про однорідність вибірових дисперсій залежної змінної не була відкинута, або за залежностями (A.22), (A.24) – (A.26), якщо умовні дисперсії залежної змінної пропорційні деякій функції від x .

Якщо гіпотеза про лінійний вид регресії була відкинута, то робиться припущення про параболічний вид залежності:

$$\hat{Y}(x) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x + \hat{a}_2x^2. \quad (\text{A.38})$$

Дисперсія результатів спостережень у відносно значень за регресійним поліномом $\hat{Y}(x, \bar{a})$ ступеня p із вектором коефіцієнтів $\bar{a} = \{\hat{a}_0, \mathbf{K}, \hat{a}_p\}$ визначається наступним чином:

– при невідкиданні гіпотези про однорідність вибірових дисперсій залежної змінної:

$$s^2 = \frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m [y_{ij} - \hat{Y}(x_i^{\mathbf{0}}, \bar{a})]^2; \quad (\text{A.39})$$

– при пропорційності умовної дисперсії залежної змінної відомій функції аргумента:

$$s^2 = \frac{1}{n-p-1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \hat{w}_i [y_{ij} - \hat{Y}(x_i^{\mathbf{0}}, \bar{a})]^2. \quad (\text{A.40})$$

Оцінки параметрів a_0 , a_1 та a_2 знаходяться із умови мінімізації дисперсії s^2 . Для цього використовується чисельний симплекс–метода Нелдера–Міда, що реалізований функцією `lminsearch`.

Побудова довірчих інтервалів дозволяє оцінити, на скільки можуть відхилитися осереднені значення залежної змінної, обчислені за емпіричним регресійним зв'язком, від істинних умовних середніх, що задаються теоретичною регресійною залежністю. Теоретичне середнє регресії за кожного фіксованого значення аргумента (розглядаються точки $x_i^{\mathbf{0}}$) з імовірністю $P = 1 - \alpha$ знаходиться в діапазоні [53]:

$$\hat{Y}(x) \pm t_{a/2}(n-p-1) \cdot s \cdot D_p(x), \quad (\text{A.41})$$

де p – ступень полінома рівняння регресії; n – загальна кількість спостережень; s – стандартне відхилення результатів спостережень у від відповідних значень за рівнянням регресії; $t_{a/2}(n-p-1)$ – точка розподілення Ст'юдента для рівня значущості $a/2$ та з $n-p-2$ ступенями свободи; $D_p(x)$ – величина, що визначається для кожного x за залежностями:

– для полінома першого ступеня $p=1$ та при невідкиданні гіпотези про однорідність вибірових дисперсій залежної змінної:

$$D_1(x) = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{m \sum_{i=1}^k (x_i^0 - x)^2}}; \quad (\text{A.42})$$

– для полінома другого ступеня $p=2$ та при пропорційності умовної дисперсії залежної змінної відомій функції аргумента:

$$D_2(x) = \sqrt{1 + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i (x_i^0 - \bar{x})^2} + \frac{j_2^2(x)}{\sum_{i=1}^k j_2^2(x_i^0)}}, \quad (\text{A.43})$$

де

$$j_2(x) = x^2 - \frac{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i (x_i^0)^3 - \bar{x} \sum_{i=1}^k \hat{w}_i (x_i^0)^2}{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i (x_i^0)^2 - \bar{x}^2} (x - \bar{x}) - \sum_{i=1}^k \hat{w}_i (x_i^0)^2. \quad (\text{A.44})$$

Таблиця А.16

Машинні змінні, що використовуються

Параметр	y	x^0	s_i^2	\bar{y}_i	$s_{\bar{y}(x)}$	G_{kp}	w_i	$h^2(x_i^0)$	$\hat{h}^2(x_i^0)$	
Машинна змінна	y	x	s2_i	y_mean_i	sy_m	Gkr	we_i	he	h2_i	
Параметр	$s_i'^2$	\hat{w}_i	\hat{S}^2	W^2	\bar{x}	\bar{y}	s_x	s_y	$\hat{r}_{y/x}$	\hat{r}
Машинна змінна	s2p_i	w_i	s2	W2	x_m	y_m	sx	sy	ro	r

Додаток Б

Матеріали експериментальних досліджень

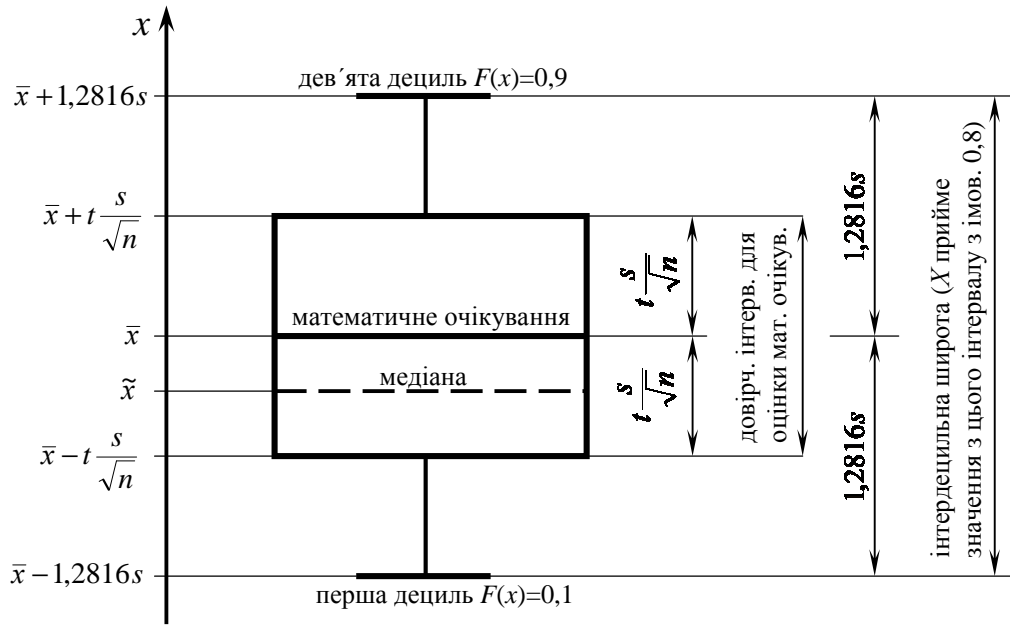


Рис. Б.1. Фігура для графічного відображення чисельних характеристик нормального розподілення імовірностей дійсної випадкової величини X з функцією розподілення $F(x)$: \bar{x} – математичне очікування дійсної величини X ; \tilde{x} – медіана; s – стандартне відхилення; t – коефіцієнт розподілення Ст'юдента для довірчої імовірності g та числа ступенів свободи $(n-1)$, n – об'єм вибірки.

Таблиця Б.1

Параметри, що характеризують розподілення вибірових значень сталої часу затухання ЕРС двигунів, які обчислені за експериментальними осцилограмами зниження напруги при одиночному та груповому вибігу; також теоретично обраховані сталі часу затухання ЕРС вибігу

Параметри	е к с п е р и м е н т						
	I	V	VIII	IX	XV	XVII	
	д в и г у н и						
	M1	M2	M3	M1+M2	M2+M3	M1+M2+M3	
с т а л і ч а с у							
	T_1	T_2	T_3	T_{12}	T_{23}	T_{123}	
Об'єм вибірки	29	26	27	26	29	27	
Міри положення	с	с	с	с	с	с	
мат. очікування	0,136	0,387	0,469	0,261	0,433	0,316	
медіана	0,134	0,385	0,467	0,261	0,437	0,319	
дисперсія	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$5,90 \cdot 10^{-5}$	$2,48 \cdot 10^{-4}$	$5,40 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-4}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	
станд. відхилення	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$7,68 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$7,35 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$7,50 \cdot 10^{-3}$	
розмах	$5,33 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-2}$	$6,56 \cdot 10^{-2}$	$2,74 \cdot 10^{-2}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$2,66 \cdot 10^{-2}$	
коефіцієнт варіації	$9,52 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$3,36 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-2}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$	
асиметрія	0,583	0,731	0,455	-0,279	-0,690	-1,078	
ексцес	2,248	0,847	-0,031	-0,293	-0,145	-0,910	
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	с	с	с	с	с	с	
нижня межа	0,131	0,384	0,463	0,258	0,428	0,313	
верхня межа	0,141	0,39	0,476	0,264	0,439	0,319	
Довірч. інтервал для оцінки стандарт. відхилення	с	с	с	с	с	с	
нижня межа	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$6,03 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$5,76 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	
верхня межа	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	
Теоретично обрахована стала часу затухання ЕРС обертання	с	с	с	с	с	с	
	0,132	0,389	0,470	0,263	0,432	0,314	

Таблиця Б.2 (початок)

Параметри розподілення тривалості часовий інтервалів, що характеризують виток струму

Експеримент		I		II		III		IV		V		VI	
Часовий інтервал		$t_2 - t_1$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_3 - t_2$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_3 - t_2$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_3 - t_5$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_2 - t_1$, с
Об'єм вибірки		30	29	30	30	30	30	30	30	30	30	30	27
Параметри	Міри положення	0,074	0,071	0,122	0,073	0,012	0,071	0,014	0,050	0,074	0,074	0,073	0,073
	мат. очікування, с	0,073	0,071	0,122	0,072	0,013	0,071	0,013	0,041	0,074	0,074	0,073	0,073
	медіана, с	$7,15 \cdot 10^{-6}$	$9,98 \cdot 10^{-6}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$8,27 \cdot 10^{-6}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$
	дисперсія, с ²	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-3}$	$3,88 \cdot 10^{-3}$	$4,14 \cdot 10^{-3}$	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$5,09 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-3}$	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$3,40 \cdot 10^{-3}$
	станд. відхилення, с	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$9,90 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$
розмах, с	$3,64 \cdot 10^{-2}$	$4,44 \cdot 10^{-2}$	$5,34 \cdot 10^{-2}$	$5,33 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-1}$	$4,04 \cdot 10^{-2}$	$3,61 \cdot 10^{-1}$	$6,48 \cdot 10^{-1}$	$4,32 \cdot 10^{-2}$	$4,32 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-2}$	
коефіцієнт варіації	0,598	0,131	0,092	0,669	-0,362	0,278	0,648	0,825	-0,251	0,825	-0,251	-0,425	
асиметрія	-0,661	-0,691	-0,352	0,105	1,121	-0,673	-0,539	-1,032	0,374	-0,539	0,374	-0,509	-0,509
ексцес	0,073	0,070	0,120	0,072	0,010	0,070	0,012	0,038	0,073	0,073	0,073	0,072	0,072
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	нижня межа, с	0,075	0,072	0,124	0,074	0,014	0,072	0,016	0,062	0,075	0,075	0,074	0,074
Довірч. інтервал для оцінки мат. відхил.	верхня межа, с	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$5,20 \cdot 10^{-3}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{-3}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$2,68 \cdot 10^{-3}$
	нижня межа, с	$3,59 \cdot 10^{-3}$	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$8,77 \cdot 10^{-3}$	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$5,57 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$	$6,84 \cdot 10^{-3}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-3}$
Експеримент		VI		VII		VIII		IX		X			
Часовий інтервал		$t_3 - t_2$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_5 - t_2$, с	$t_3 - t_5$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_3 - t_2$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_2 - t_1$, с	$t_3 - t_2$, с	$t_3 - t_2$, с	$t_3'' - t_2$, с	$t_3'' - t_2$, с
Об'єм вибірки		28	28	30	30	29	29	28	30	30	30	30	30
Параметри	Міри положення	0,366	0,077	0,010	0,055	0,075	0,263	0,074	0,074	0,232	0,232	0,222	0,222
	мат. очікування, с	0,369	0,077	0,010	0,057	0,074	0,262	0,074	0,074	0,232	0,232	0,222	0,222
	медіана, с	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$8,27 \cdot 10^{-5}$	$8,27 \cdot 10^{-5}$	$7,73 \cdot 10^{-5}$	$7,73 \cdot 10^{-5}$
	дисперсія, с ²	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$2,80 \cdot 10^{-2}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$9,09 \cdot 10^{-3}$	$9,09 \cdot 10^{-3}$	$8,79 \cdot 10^{-3}$	$8,79 \cdot 10^{-3}$
	станд. відхилення, с	$4,60 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$	$9,30 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$4,50 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$3,40 \cdot 10^{-2}$
розмах, с	$3,52 \cdot 10^{-2}$	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$6,33 \cdot 10^{-1}$	$5,05 \cdot 10^{-1}$	$5,04 \cdot 10^{-2}$	$4,35 \cdot 10^{-2}$	$3,60 \cdot 10^{-2}$	$4,70 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	$3,96 \cdot 10^{-2}$	$3,96 \cdot 10^{-2}$	
коефіцієнт варіації	-0,748	-0,187	0,176	-0,233	0,441	0,352	0,000	0,000	0,057	-0,110	-0,102	-0,102	
асиметрія	-0,437	0,159	-0,872	-1,008	0,167	-0,541	-0,191	0,126	-0,163	-0,163	-0,256	-0,256	
ексцес	0,361	0,076	0,008	0,045	0,074	0,259	0,073	0,073	0,229	0,229	0,219	0,219	
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікув.	верхня межа, с	0,371	0,078	0,012	0,065	0,076	0,267	0,075	0,075	0,235	0,235	0,225	0,225
Довірч. інтервал для оцінки мат. відхил.	нижня межа, с	$1,02 \cdot 10^{-2}$	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$4,97 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$2,98 \cdot 10^{-2}$	$9,10 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$7,24 \cdot 10^{-3}$	$7,24 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$7,00 \cdot 10^{-3}$
	верхня межа, с	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$4,68 \cdot 10^{-3}$	$8,38 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$4,68 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$

Таблиця Б.2 (закінчення)

Експеримент		XI			XII			XIII			XIV				
		$t_2 - t_1, c$	$t_3' - t_2, c$	$t_3'' - t_2, c$	$t_2 - t_1, c$	$t_3' - t_2, c$	$t_3'' - t_2, c$	$t_2 - t_1, c$	$t_3 - t_2, c$	$t_3 - t_2, c$	$t_2 - t_1, c$	$t_2 - t_1, c$			
Параметри	Об'єм вибірки	29	29	29	30	30	30	30	29	30	29				
	Часовий інтервал														
	Міри положення	0,072	0,263	0,257	0,075	0,239	0,230	0,075	0,009	0,055	0,075				
	медіана, с	0,072	0,257	0,250	0,076	0,238	0,232	0,075	0,009	0,055	0,077				
	дисперсія, с ²	$9,19 \cdot 10^{-6}$	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$4,42 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$5,27 \cdot 10^{-5}$	$4,49 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$				
	станд. відхилення, с	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$2,10 \cdot 10^{-2}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$7,26 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$5,20 \cdot 10^{-3}$				
	розмах, с	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$7,70 \cdot 10^{-2}$	$1,90 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	$2,60 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$8,60 \cdot 10^{-2}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$				
	коефіцієнт варіації	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$7,73 \cdot 10^{-2}$	$8,19 \cdot 10^{-2}$	$6,68 \cdot 10^{-2}$	$3,04 \cdot 10^{-2}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$4,60 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-1}$	$3,86 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-2}$				
	асиметрія	-0,136	0,891	0,935	-0,337	0,207	-0,702	-0,350	0,026	-0,052	-1,155				
	екецес	-0,291	1,673	1,515	-0,475	0,304	-0,456	-0,092	0,386	0,138	0,724				
Параметри	Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	нижня межа, с	0,071	0,255	0,249	0,073	0,236	0,227	0,074	0,008	0,047	0,073			
		верхня межа, с	0,073	0,271	0,265	0,077	0,242	0,233	0,076	0,010	0,063	0,077			
	Довірч. інтервал для оцінки станд. відхил.	нижня межа, с	$2,41 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$4,02 \cdot 10^{-3}$	$5,78 \cdot 10^{-3}$	$5,34 \cdot 10^{-3}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$			
		верхня межа, с	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$6,77 \cdot 10^{-3}$	$9,75 \cdot 10^{-3}$	$9,00 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-3}$	$2,86 \cdot 10^{-2}$	$7,03 \cdot 10^{-3}$			
	Експеримент		XIV			XV			XVI			XVII		XVIII	
	Часовий інтервал														
	Об'єм вибірки	29	30	30	28	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Міри положення	0,010	0,064	0,072	0,075	0,325	0,241	0,074	0,237	0,232	0,163	0,157	0,157	0,157	0,157
	медіана, с	0,009	0,066	0,072	0,076	0,326	0,240	0,074	0,234	0,224	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157
	дисперсія, с ²	$3,68 \cdot 10^{-5}$	$4,04 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$5,59 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$9,45 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$7,99 \cdot 10^{-4}$	$8,37 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$
станд. відхилення, с	$6,07 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$9,72 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	
розмах, с	$2,10 \cdot 10^{-2}$	$7,90 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$5,20 \cdot 10^{-2}$	$3,80 \cdot 10^{-2}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	
коефіцієнт варіації	$6,01 \cdot 10^{-1}$	$3,12 \cdot 10^{-1}$	$4,42 \cdot 10^{-2}$	$3,13 \cdot 10^{-2}$	$4,31 \cdot 10^{-2}$	$4,04 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	$1,79 \cdot 10^{-1}$	
асиметрія	0,546	-0,244	0,094	-0,045	-0,007	0,195	-0,199	0,393	0,847	0,707	0,707	0,707	0,707	0,707	
екецес	-0,296	-0,195	-0,721	-0,062	-0,617	0,266	-0,550	-0,371	-0,412	-0,382	-0,382	-0,382	-0,382	-0,382	
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	нижня межа, с	0,008	0,056	0,071	0,074	0,320	0,237	0,072	0,227	0,221	0,152	0,152	0,152	0,152	
	верх. межа, с	0,012	0,072	0,073	0,076	0,330	0,245	0,076	0,248	0,242	0,174	0,174	0,174	0,174	
Довірч. інтервал для оцінки станд. відхил.	нижня межа, с	$4,81 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$7,74 \cdot 10^{-3}$	$3,21 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$2,30 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	
	верх. межа, с	$8,20 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$5,41 \cdot 10^{-2}$	$3,80 \cdot 10^{-2}$	$3,89 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$	

Таблиця Б.3

Параметри, що характеризують розподілення вибірових значень Q через опір кола витоку струму на землю за час аварійного процесу, обраховані за результатами проведених на дослідницькому стенді експериментів

Параметри	Одиниці виміру	е к с п е р и м е н т								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Об'єм вибірки		30	30	30	30	30	28	30	30	29
Міри положення	мат. очікування	34,20	27,46	19,89	15,54	81,13	65,65	16,72	76,43	60,69
	медіана	34,19	27,16	19,92	15,49	81,82	65,56	16,55	76,40	60,36
Міри розсіяння	дисперсія	0,981	1,565	0,592	0,821	13,390	1,415	0,562	1,441	1,244
	станд. відхилення	0,990	1,251	0,770	0,906	3,659	1,190	0,750	1,200	1,115
	розмах	4,32	4,67	2,65	3,34	11,50	5,03	3,16	4,58	4,33
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	нижня межа	33,83	26,99	19,6	15,21	79,77	65,19	16,44	75,97	60,26
	верхня межа	34,57	27,93	20,18	15,88	82,5	66,11	17	76,88	61,11
Довірч. інтервал для оцінки станд. відхилення	нижня межа	0,789	0,996	0,613	0,722	2,914	0,941	0,597	0,953	0,885
	верхня межа	1,330	1,681	1,034	1,217	4,916	1,619	1,007	1,623	1,508
Інтердецильна широта	перша дециль $K_{0,1}$	32,93	25,86	18,91	14,38	76,44	64,12	15,76	74,89	59,26
	дев'ята дециль $K_{0,9}$	35,47	29,06	20,88	16,7	85,82	67,17	17,68	77,97	62,11
Імовірність $P(Q > Q_{прип})$		$<1 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-10}$	0,99	0,99	$<1 \cdot 10^{-10}$	0,99	0,99
Параметри	Один. виміру	е к с п е р и м е н т								
Об'єм вибірки		30	30	30	30	28	30	30	30	30
Міри положення	мат. очікування	44,98	55,59	63,68	18,06	18,18	99,97	70,49	80,28	60,59
	медіана	45,04	55,52	63,66	18,05	18,12	99,96	70,37	79,96	60,78
Міри розсіяння	дисперсія	1,518	1,800	2,664	0,978	0,715	2,494	1,570	2,625	1,220
	станд. відхилення	1,232	1,341	1,632	0,989	0,846	1,579	1,253	1,620	1,104
	розмах	4,72	5,47	6,71	3,86	3,14	6,63	5,67	6,73	4,73
Довірчий інтерв. для оцінки мат. очікування	нижня межа	44,52	55,09	63,07	17,69	17,85	99,38	70,02	79,67	60,18
	верхня межа	45,44	56,09	64,29	18,43	18,5	100,56	70,95	80,88	61
Довірч. інтервал для оцінки станд. відхилення	нижня межа	0,981	1,068	1,300	0,788	0,669	1,258	0,998	1,290	0,880
	верхня межа	1,655	1,802	2,192	1,329	1,151	2,121	1,683	2,176	1,484
Інтердецильна широта	перша дециль $K_{0,1}$	43,4	53,87	61,59	16,8	17,09	97,94	68,88	78,2	59,17
	дев'ята дециль $K_{0,9}$	46,56	57,31	65,77	19,33	19,26	101,99	72,09	82,36	62
Імовірність $P(Q > Q_{прип})$		$2,3 \cdot 10^{-5}$	0,99	0,99	$<1 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-10}$	0,99	0,99	0,99	0,99

Таблиця Б.4

Параметри, що характеризують розподілення вибірових значень Q через опір кола витоку струму на землю за час аварійного процесу, отримані для умов лабораторних експериментів шляхом математичного моделювання

Параметри	Одиниці виміру	е к с п е р и м е н т								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Об'єм вибірки		30	30	30	30	30	30	30	30	30
Міри положення	мат. очікування	32,98	27,24	20,27	15,35	77,17	61,61	16,86	76,97	58,05
	медіана	33,03	27,26	20,40	15,22	77,22	61,59	16,46	76,99	58,12
Міри розсіяння	дисперсія	0,139	0,239	0,558	0,602	0,201	0,475	1,234	0,132	0,201
	станд. відхилення	0,373	0,489	0,747	0,776	0,448	0,689	1,111	0,364	0,448
	розмах	1,57	1,95	2,91	2,74	1,97	2,64	4,76	1,68	1,92
Довірчий інтерв. для оцінювання	нижня межа	32,84	27,06	19,99	15,06	77,01	61,35	16,45	76,84	57,89
	верхня межа	33,12	27,42	20,55	15,64	77,34	61,87	17,28	77,11	58,22
Довірч. інтервал для оцінки стандарт. відхилення	нижня межа	0,297	0,389	0,595	0,618	0,357	0,549	0,885	0,290	0,357
	верхня межа	0,501	0,657	1,003	1,042	0,602	0,926	1,492	0,489	0,602
Інтердецильна широта	перша дециль $K_{0,1}$	32,51	26,61	19,31	14,36	76,60	60,72	15,44	76,51	57,48
	дев'ята дециль $K_{0,9}$	33,46	27,87	21,23	16,35	77,75	62,49	18,28	77,44	58,63
Різниця між теор. та емпір. вибірк. середн.	%	3,5	0,8	1,9	1,2	4,9	6,2	0,8	0,7	4,3
Параметри	Одиниці виміру	е к с п е р и м е н т								
Об'єм вибірки		30	30	30	30	30	30	30	30	30
Міри положення	мат. очікування	44,39	54,44	62,26	17,31	17,31	92,94	68,70	77,05	58,78
	медіана	44,20	54,49	62,19	17,54	17,08	92,79	68,72	77,02	59,04
Міри розсіяння	дисперсія	0,690	0,953	0,487	0,739	1,302	0,248	0,707	0,199	1,583
	станд. відхилення	0,831	0,976	0,698	0,860	1,141	0,498	0,841	0,446	1,258
	розмах	3,78	3,85	2,49	3,48	4,76	1,92	3,86	1,73	5,26
Довірчий інтерв. для оцінювання	нижня межа	44,08	54,08	62	16,99	16,88	92,75	68,38	76,89	58,31
	верхня межа	44,7	54,81	62,52	17,63	17,73	93,12	69,01	77,22	59,25
Довірч. інтервал для оцінки стандарт. відхилення	нижня межа	0,662	0,777	0,556	0,685	0,909	0,397	0,670	0,355	1,002
	верхня межа	1,116	1,311	0,938	1,155	1,533	0,669	1,129	0,599	1,690
Інтердецильна широта	перша дециль $K_{0,1}$	43,32	53,19	61,37	16,21	15,84	92,30	67,62	76,48	57,17
	дев'ята дециль $K_{0,9}$	45,45	55,69	63,16	18,41	18,77	93,57	69,78	77,62	60,39
Різниця між теор. та емпір. вибірк. середн.	%	1,3	2,1	2,2	4,2	4,8	7	2,5	4	3

Таблиця Б.5

Порівняння з експериментальними даними результатів розрахунку за залежністю (3.8) загальної кількості електрики через опір кола витоку за час аварійного процесу для умов експериментів I, V, IX, XV, XVII

експ. експ.	$U_{л},$ В	$R_{\theta},$ Ом	$m(\Delta t_{3\theta}),$ с	$m(T),$ с	$C_{из\phi},$ Ф/фаза	Q за (3.8), А·с	експер. вибіркова середня $m(Q),$ А·с	різниця між обр. знач. та експерим. вибіркового середнього, %
I			0,074	0,136	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$37,34 \cdot 10^{-3}$	$34,20 \cdot 10^{-3}$	9
V			0,074	0,387	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$87,77 \cdot 10^{-3}$	$81,13 \cdot 10^{-3}$	8
IX	404	1000	0,074	0,261	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$66,81 \cdot 10^{-3}$	$60,69 \cdot 10^{-3}$	10
XV			0,072	0,433	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$104,04 \cdot 10^{-3}$	$99,97 \cdot 10^{-3}$	4
XVII			0,074	0,316	$2,25 \cdot 10^{-6}$	$82,27 \cdot 10^{-3}$	$80,28 \cdot 10^{-3}$	2

Таблиця Б.6

Порівняння з експериментальними даними результатів розрахунку за залежністю (3.20) загальної кількості електрики через опір кола витоку за час аварійного процесу для умов експерименту III

$U_{л},$ В	$R_{\theta},$ Ом	$m(\Delta t_{3\theta}),$ с	$m(T'''),$ с	$C_{из\phi},$ Ф/фаза	$C_{из\phi\text{ав}},$ Ф/фаза
404	1000	0,073	0,136	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$
Q за залежністю (3.20), мА·с		експер. $m(Q),$ мА·с		різниця між обрах. знач. та експер. вибірковою середньою, %	
20,25		19,89		2	

Таблиця Б.7

Порівняння з експериментальними даними результатів розрахунку за залежністю (3.19) загальної кількості електрики через опір кола витоку за час аварійного процесу для умов експериментів II, VI, VIII

експеримент	$U_{л},$ В	$R_{\theta},$ Ом	$m(\Delta t_{3\theta}),$ с	$m(T'),$ с	$m(T''),$ с	$m(t_3 - t_2),$ с	$C_{из\phi},$ Ф/фаза	$C_{из\phi\text{ав}},$ Ф/фаза	$\frac{t_3 - t_2}{t_3 - t_2} = \nu$	Q за (3.19), мА·с	експерим. $m(Q),$ мА·с	різниця між обрахованим знач. та експерим. вибірковою середньою, %
II			0,071	0,136	0,136	0,122	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$	0,41	29,91	27,46	9
VI	404	1000	0,073	0,387	0,387	0,366	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	0,39	70,10	65,65	7
VIII			0,075	0,469	0,469	0,263	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	0,57	79,21	76,43	4

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Электрификация горных работ: учебн. для вузов / [Белый М. М., Заика В. Т., Пивняк Г. Г. и др.]; под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1992. – 383с.
2. Электроснабжение угольных шахт / [Волотковский С. А., Разумный Ю. Т., Пивняк Г. Г. и др.]. – М.: Недра, 1984. – 376 с.
3. Щуцкий В.И. Электрификация подземных горных работ: [учеб. для вузов] / Щуцкий В. И., Волощенко Н. И., Плащанский Л. А. – М.: Недра, 1986. - 364 с.
4. Апараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929–78. С изменениями согласно ИУС 11–80, 7–81, 11–83. Соответствует СТ СЭВ 2309–80. – [Вступил в силу 01.01.1979]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13с. – (Межгосударственный стандарт).
5. Ландкоф Л. Б. Совершенствование двигателей угольных комбайнов и электроснабжение очистных забоев / Л. Б. Ландкоф, И. Я. Чернов // Взрывозащищенное электрооборудование: [сб. науч. трудов УкрНИИВЭ / под общей ред. Пивняка Г.Г.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. - С. 242–249.
6. Динамика совершенствования двигателей с водяным охлаждением для забойных машин угольной промышленности / [Ю. И. Дмитренко, Е. Б. Ковалев, А. В. Кукулевский, К. Д. Макаров] // Взрывозащищенное электрооборудование: [сб. науч. трудов УкрНИИВЭ / под общей ред. Пивняка Г.Г.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. - С.257–271.
7. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / [Дзюбан В. С., Ширнин И. Г., Ванеев Б. Н., Гостищев В. М.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. –
Т.1.: (Гл. 1–21). – 447 с.;
Т.2.: (Гл. 22–44). – 440 с.
8. Маренич К.М. Проблематика спільної роботи групи двигунів в електричній мережі технологічної дільниці гірничого підприємства / К. М. Маренич, С. В. Василець // «Форум гірників – 2005»: міжнар. конф., 12–14 жовтня 2005р.: матеріали конф. – Д.: Нац. гірничий ун-т, 2005. – Т. 3. – С.123-131.
9. Автоматизований електропривод машин і установок шахт і рудників: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / [К.М.Маренич, Ю.В. Товстик, В.В.Турупалов, С.В. Василець, І.Я.Лізан]. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 245с.
10. Горные машины и оборудование: Учеб. пособие для вузов: В 2т. / П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин, Н.М. Лысенко; Под общ. ред. П.А. Горбатова; Донец. нац. техн. ун-т. – Донецк: ДонНТУ, 2003. Т.1. – 295с.: ил.

11. Андреев В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 775 с.
12. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П.]; за ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. – 334 с.
13. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
14. Маренич К. Н. Математическое моделирование процессов в шахтной низковольтной сети при дуговом замыкании / К. Н. Маренич, С. В. Василец // Математические методы в технике и технологиях: XVIII междунар. науч. конф., 31 мая – 2 июня 2005г.: сб. трудов, Казань. Т. 5 / под ред. В. С. Балакирева. – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 212-215.
15. Василец С. В. Математическое моделирование электрической дуги при замыкании в гибком кабеле участка шахты / С. В. Василец // Севергеоэкотех-2005: VI междунар. молодеж. науч. конф., 23–25 марта 2005 г.: материалы конф. – Ухта: УГТУ, 2006. – Ч.1 – С. 10-13.
16. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности / [Гладилин Л. В., Щуцкий В. И., Бацезев Ю. Г., Чеботарев Н. И.]. – М.: Недра, 1977. – 327с.
17. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б. М. Ягудаев, Н. Ф. Шишкин, В. В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152с.
18. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабець Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]. – Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. – 151 с.
19. Озерной М. И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт / М. И. Озерной – [5–е изд., перераб. и доп.]. – М.: Недра, 1975. – 448 с.
20. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В. С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
21. Корнеева А.Н. Состояние электротравматизма на угольных предприятиях Украины и пути его снижения / А. Н. Корнеева // Уголь Украины». – 2003. – №5. – С. 37-39.
22. Cawley J. C. Electrical Accidents in the Mining Industry, 1990-1999 / J.C. Cawley // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39, No. 6, Nov/Dec. – Pittsburgh, PA, USA. – p. 1570-1577. – Mode of access: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/pubs/pubreference/outputid96.htm>. – Title from the screen.
23. Richard L. Reynolds History of coal mine electrical fatalities since 1970. – Mode of access: <http://www.msha.gov/S&HINFO/TECHRPT/ELECTRICAL/HISTORY.pdf>. – Title from the screen.

24. Риман Я. С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я. С. Риман – М.: Недра, 1977. – 206с.

25. Цапенко Е.Ф. Электробезопасность на горных предприятиях: учеб. пособие / Е.Ф. Цапенко, С.З. Шкудин. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. - 103с.

26. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

27. Дзюбан В.С. Об электромагнитной постоянной времени затухания обратной э. д. с. шахтных электродвигателей / В.С. Дзюбан, Я.С. Риман // Взрывобезопасное электрооборудование: труды ВНИИВЭ. – 1969. – Вып. VI. – С. 196–207.

28. Озерной М.И. Переходные процессы в шахтной участковой сети при коммутации асинхронных короткозамкнутых электродвигателей / М.И. Озерной, В.М. Фарович // Горный журнал. – 1969. – №3. – С.136–141.

29. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240с.

30. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей / Ю.М. Голоднов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136с.

31. Маренич К.Н. Проблематика электробезопасности системы «кабель-двигатель» участка шахты / К.Н. Маренич // Наукові праці Донецького державного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – 2001. – Вип. 27. – С. 270-277.

32. Marenych K. Theoretical research into motor back EMF influence on emergency state in the electrotechnical complex of mine section / Marenych K., Vasylets S., Kovalyova I. // Proceedings of Donetsk National Technical University. - No 1. - 2010. - pp.81-87.

33. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки двигунів як фактор погіршення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти / Маренич К.М., Василець С.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», випуск 9 (158). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – С. 160-165.

34. Маренич К.М. Спільна робота двигунів як фактор формування зворотнього енергетичного потоку в дільничній електромережі шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2010. – С.231-241.

35. Маренич К.М. Структура та дослідження математичної моделі процесів при виникненні струму витоку на землю в електротехнічному комплексі дільниці шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація», вип. 18 (169). - Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – С.141-151.

36. Маренич К.Н. Исследование процессов в участковой электросети при групповом выбеге асинхронных двигателей / К.Н. Маренич, С.В.

Василець // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2005. – Вип. 74. – С. 30-36.

37. Василець С.В. Обґрунтування математичної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти в режимі вибігу двигунів споживачів / С.В. Василець, К.М. Маренич // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: VI міжнар. наук.-техн. конф., 24-27 квітня 2006р.: зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С.33–36.

38. Маренич К.М. Математична модель електротехнічного комплексу дільниці шахти після захисного відключення напруги / К.М. Маренич, С.В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 104. – С.121-128.

39. Василець С.В. Моделирование процессов в электротехническом комплексе участка шахты после защитного отключения напряжения / С.В. Василець // Севергеоэко-2007: VIII междунац. молодежная науч. конф., 21-23 марта 2007г.: материалы конф. – Ухта: УГТУ, 2007. – Ч. 1. – С.9-13.

40. Маренич К.М. Математичне моделювання електротехнічного комплексу дільниці шахти при виникненні витоку струму на землю / К.М. Маренич, С.В. Василець // «Форум гірників – 2007»: міжнар. конф., 11–13 жовтня 2007р.: матеріали конф. – Д.: Нац. гірничий ун-т, 2007. – С.222-231.

41. Маренич К.М. Математичне моделювання асинхронного електродвигуна як об'єкта електротехнічного комплексу дільниці шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 4(40), част. 3. – С. 132-139.

42. Маренич К.М. Обґрунтування ефективності нейтралізації зворотньої ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти / К. М. Маренич, С. В. Василець // Технічна електродинаміка. – 2009. – №2. – С. 42–47.

43. Маренич К.М. Математичне моделювання струму витоку в умовах дільниці шахти після захисного відключення напруги / К. М. Маренич, С. В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо–електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 12 (113). – С.171–178.

44. Маренич К. М. Уточнення стану ланцюга однофазного витоку струму на землю в умовах електротехнічного комплексу дільниці шахти після захисного відключення мережі / К. М. Маренич, С. В. Василець // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. – №2 (17). – С. 71-74.

45. Якобс А.И. О нормировании уровня электробезопасности и допустимого напряжения прикосновения / А.И. Якобс, С.И. Коструба // Электричество. – 1978. – №1. – С.58–60.

46. ГОСТ 12.1.010–76 (СтСЭВ 3517–81). Взрывобезопасность. Общие требования. – Введ. 1978–01–01; с изм. №1 1983г. (ИУС 6–83). – М.: Изд–во стандартов, 1987. – 7с. – (Система стандартов безопасности труда).

47. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – [9–е изд.] – М.: Высш. шк., 2003. – 479с.

48. Энергоснабжение высокопроизводительных угледобывающих комплексов / [Чернов И.Я., Ландкоф Л.Б., Шилов В.В. и др.] // Уголь Украины. – 2002. – № 9. – С. 21–23.

49. Маренич К.Н. Исследование влияния ЭДС вращения группы двигателей в режиме выбега на величину тока утечки в электросети участка шахты / К.Н. Маренич, С.В. Василец // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірнично-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 83. – С. 303–308.

50. Маренич К.М. Аналіз енергетичних співвідношень у електротехнічному комплексі дільниці шахти під час групового вибігу електродвигунів споживачів / К.М. Маренич, С.В. Василець // Взрывозащищенное электрооборудование: [сб. науч. трудов УкрНИИВЭ / под общей ред. Пивняка Г.Г.]. – Донецк: ООО «Юго–Восток, Лтд», 2007. – С. 137–142.

51. Сивокобиленко В.Ф. Математичне моделювання групового вибігу електродвигунів споживачів технологічної дільниці шахти / Сивокобиленко В.Ф., Маренич К.М., Василець С.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірнично-електромеханічна. –Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 101. – С.103–110.

52. Василец С.В. Компьютерное моделирование процессов в испытательном стенде для обкатки приводных блоков скребковых конвейеров / С.В. Василец, К.Н. Маренич, А.Н. Бурлака // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: V міжнар. наук.-техн. конф., 16–19 травня 2005р.: зб. наук. праць. – Донецьк, ДонНТУ, 2005. – С.11–15.

53. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей / С.А. Айвазян. – М.: Металлургия, 1968. – 227 с.

54. Гришин В.К. Статистические методы анализа и планирования экспериментов / В.К. Гришин. – М.: Изд–во Московского ун–та, 1975. – 128 с.

55. Маренич К.М. Аналіз параметрів системи «тиристорний регулятор напруги – асинхронний генератор» як елемента навантаження приводного блоку під час випробувань / К.М. Маренич, О.М. Бурлака, С.В. Василець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – №6 (63). – С. 110–116.

56. Маренич К.Н. Определение параметров перспективного стенда для обкатки приводных блоков скребковых конвейеров / К.Н. Маренич, А.Н. Бурлака, С.В. Василец // Математические методы в технике и технологиях:

материалы XIX междунар. науч. конф. (Воронеж, 30 мая – 2 июня 2006г.). – Воронеж: ВГТА, 2006. – С.186–189.

57. Федорашко Ю.И. Защита от токов утечки с автоматическим самоконтролем в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 6 кВ: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Ю.И. Федорашко . – Алматы, 2006. – 18 с.

58. Патент на винахід 82111 (UA), МПК (2006) H02H 3/16 Спосіб захисту людини від ураження електричним струмом в мережі з ізольованою нейтраллю / К.М. Маренич, С.В. Василець. – а 2006 00387. Заявл. 16.01.2006. Опубл 11.03.2008. Бюл. №5

59. Маренич К.М. Підвищення безпеки експлуатації електромережі дільниці шахти шляхом припинення дії зворотної ЕРС двигунів / Маренич К.М., Василець С.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 23(196), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – С.183-205.

60. Маренич К.М. Автоматичне гасіння зворотної ЕРС двигунів споживачів електротехнічного комплексу дільниці шахти як спосіб підвищення безпеки експлуатації / К.М. Маренич, С.В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 20 (182). - Донецьк, ДонНТУ, 2011. – С. 50-57.

61. Маренич К.М. Моделювання автокомпенсації ємнісної складової струму витоку при зниженні частоти ЕРС вибігу двигунів дільничної електромережі / К.М. Маренич, С.В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 19(175), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – 184 с.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

МАРЕНИЧ Костянтин Миколайович
ВАСИЛЕЦЬ Святослав Володимирович

**ЗВОРОТНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТОКИ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЯК ФАКТОР
НЕБЕЗПЕКИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ШАХТИ**

Монографія

Коректор *І.В. Ковальова*

Редакційно-технічне оформлення, комп'ютерна верстка *С.В. Василиць*

Дизайн обкладинки *К.М. Маренич*

Підп. до друку 28.09.2012 Формат 60x84/16.

Папір PolSpeed. Друк різнографія.

Ум. друк. арк. 12,88. Обл.-вид. арк. 11,97.

Тираж 300 прим. Замовлення № 1393.

Видавництво: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». Україна, 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58. Тел.: (062) 301-08-67.

Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи:
серія ДК № 2982 від 21.09.2007.

Надруковано: ТОВ «Друк-Інфо», 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, к. 1.113.
Тел. (062) 335-64-55