

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Середа Олександр Григорійович



УДК 621.316.573:621.3.064.23:621.316.925.1:621.316.91

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ, ДІАГНОСТИКИ, КОНТРОЛЮ
ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрах «Електричні апарати» та «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Шевченко Сергій Юрійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри «Передача електричної енергії».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кривонос Валерій Єгорович,
Азовський морський інститут Національного університету
«Одеська морська академія» МОН України, м. Маріуполь,
завідувач кафедри «Інженерія та технології»;

доктор технічних наук, професора
Назаренко Ігор Петрович,
Таврійський державний агротехнологічний університет імені
Дмитра Моторного МОН України, м. Мелітополь, декан
факультету електроенергетики та комп'ютерних технологій;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Тугай Юрій Іванович,
Інститут електродинаміки Національної академії наук
України, м. Київ, завідувач відділу № 14 оптимізації систем
електропостачання.

Захист відбудеться «06» травня 2021 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «01» квітня 2021 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Володимир ІВАХНО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення безперебійного електропостачання електротехнічних комплексів промислових підприємств їх електричні мережі повинні бути обладнані відповідними пристроями та апаратами релейного захисту (РЗ) та протиаварійної автоматики (ПА) з метою автоматичної ліквідації аварійних режимів. Використання сучасних технологій промисловими підприємствами обумовлює зміну кількісного та якісного складу електроприймачів. Для забезпечення необхідного для технологічного процесу рівня експлуатаційної надійності необхідно постійно удосконалювати захисні характеристики апаратів захисту, що діють на відключення електричного кола електротехнічного комплексу. Технічна досконалість апаратів захисту значною мірою визначається здатністю їх вимірювальних органів своєчасно ідентифікувати вид і місце пошкодження.

З розвитком трифазних електроенергетичних мереж, зокрема систем електропостачання електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ, залишаються аварійні режими, до яких апарати максимального струмового захисту (МСЗ) недостатньо чутливі. До таких режимів, що порушують нормальне електропостачання електротехнічних комплексів, належать: віддалені короткі замикання (КЗ); обрив нейтрального провідника (*N*-провідника), що призводить до перенапруг у однофазних споживачів електроенергії; перевантаження асинхронних електродвигунів (АД), а також *N*-провідника вищими гармонійними складовими струму; однофазні КЗ на *N*-провідник. Такі режими вимагають теоретичного розвитку таких напрямків дослідження, як моделювання перехідних електромагнітних процесів в електротехнічних комплексах та системах (ЕТКС) низької напруги (НН), зокрема при несиметричних режимах роботи розподільних електричних мереж (РЕМ) електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ магістральної конфігурації, а також практичного розвитку теорії цифрової обробки аналогових сигналів (ЦОС), що дозволяє розширити перелік діагностованих аварійних режимів роботи енергосистеми електротехнічних комплексів.

Удосконалення захисних характеристик пристроїв та апаратів РЗ та ПА з метою підвищення їх технічного рівня в частині ефективного діагностування аварійних режимів електричної частини енергосистем електротехнічних комплексів, а також зі створенням математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення методології, яка розширює їх функціональні можливості, є надзвичайно **актуальною проблемою**, що і визначило напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрах «Електричні апарати» та «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») згідно завдань держбюджетних та господарчо-договірних науково-дослідних робіт: «Розробка методів для підвищення ефективності транспорту електричної енергії та експлуатаційної надійності електроенергетичних мереж України» (№ ДР 0109U006061, МОН України), «Розробка рекомендацій щодо захисту від перенапруг повітряних захищених електричних ліній 6-35 кВ» (№ ДР 0114U003936, ТОВ «СІКАМ Україна», м. Київ); «Розробка методики та практики застосування для безконтактного контролю робочого стану проводів повітряних ліній» (№37479, АК «Харківобленерго»); за договором №90 «Про творчу співпрацю» від

05.12.2016 року, та договором №1022 «Про партнерство» від 06.03.2017 року, укладених між НТУ «ХПІ» та Науково-виробничим товариством з обмеженою відповідальністю «ВІРА, ЛТД» (НВ ТОВ «ВІРА, ЛТД»), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів та науковим керівником.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є подальший розвиток теорії електромагнітних перехідних процесів в електротехнічних комплексах і системах (ЕТКС) НН при несиметричних режимах роботи РЕМ, а саме розробка системного комплексу наукових методів застосування цифрових технологій для вдосконалення захисних характеристик апаратів РЗ та ПА розподільних мереж електропостачання електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати існуючі проблеми, пов'язані з координацією з надструму апаратів МСЗ розподільних мереж електропостачання електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ, а саме проблеми, пов'язані із забезпеченням віддаленого резервування (ВР) відмов власних апаратів РЗ віддалених приєднань.
2. Проаналізувати існуючі проблеми, пов'язані із захистом однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, спричинених обривом N -провідника в електричних мережах електротехнічних комплексів з розподіленням вздовж лінії електропередачі (ЛЕП) нелінійним навантаженням.
3. Проаналізувати існуючі проблеми, пов'язані з удосконаленням алгоритмів теплового захисту електромеханічних перетворювачів, а саме АД.
4. Розробити комплекс методів визначення коефіцієнта потужності електричного кола в перехідному режимі виникнення надструму для формування критерію ідентифікації виду надструму з метою захисту ЛЕП від струмів віддалених КЗ, а також для забезпечення ВР відмов власних апаратів МСЗ віддалених приєднань;
5. Розробити спрощений метод аналізу гармонійного складу фазних струмів за наявності нелінійних електричних навантажень і, як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми фазних струмів, який дозволить розширити перелік діагностованих аварійних режимів РЕМ електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ.
6. Розробити метод аналізу середньоквадратичних значень фазних струмів несинусоїдальної форми, який дозволяє без залучення аналізу їх гармонійного складу сформулювати критерій швидкої ідентифікації аварійних режимів N -провідника РЕМ електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ з метою захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг спричинених обривом N -провідника;
7. Розробити комплекс методів діагностування теплового стану АД, що працюють в повторно-короткочасному режимі роботи, шляхом безпосереднього контролю над температурою обмоток статора в момент пуску.
8. Розробити метод теплового захисту АД в умовах нелінійних спотворень синусоїдальної форми фазних струмів.

Об'єкт дослідження – електромагнітні перехідні процеси в електротехнічних комплексах і системах в аварійних режимах роботи магістральних розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.

Предмет дослідження – фізичні параметри та характеристики пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматики магістральних розподільних мереж електропостачання електротехнічних комплексів та систем напругою 0,4 кВ.

Методи дослідження. В основу роботи покладено системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях методу системного аналізу та синтезу, а також теорії електромагнітних перехідних процесів в електроенергетичних системах для діагностування аварійних режимів роботи розподільних мереж електропостачання, теорії електричних кіл для формування комплексних критеріїв спрацьовування апаратів МСЗ, теорії цифрової обробки сигналів, теорії дискретних сигналів і систем, а також метод спектрального аналізу й фільтрації дискретних сигналів для розкладання сигналів, що являють собою складні коливання, на гармонійні складові, сучасні методи математичного моделювання в середовищі Simulink.

Достовірність наукових положень роботи підтверджується: коректним використанням відомих теоретичних та експериментальних методів обґрунтування отриманих результатів; узгодженістю даних експерименту та наукових висновків; експериментальними даними, поданими в роботах інших авторів; обґрунтованим вибором основних припущень та обмежень; використанням апробованого математичного апарату; поєднанням теоретичних досліджень з великим обсягом машинних експериментів; даними лабораторних експериментів; збіжністю аналітично отриманих результатів моделювання з експериментальними даними та результатами практичного впровадження; апробацією основних результатів роботи на наукових симпозиумах та конференціях; отриманими актами впровадження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблений теоретично обґрунтований метод розкладання сигналів, що являють собою складні коливання, на гармонійні складові, якій полягає в тім, що дискретизація аналогової залежності в часі здійснюється множенням її на гратчасту дельта-функцію $\delta(t)$ з частотою меншою за подвоєну частоту Найквіста, що дало можливість розширити перелік діагностованих аварійних режимів розподільних електричних мереж електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ.
2. Вперше розроблений теоретично обґрунтований метод формування комплексних критеріїв спрацьовування апаратів МСЗ при міжфазних КЗ, в якому ідентифікація аварійних режимів електричної мережі здійснюється за ступенем спотворень середньоквадратичних значень фазних струмів в перехідному режимі збурення електричного кола, що дозволило знизити поріг чутливості апаратів МСЗ до рівня струмів віддалених КЗ, значення яких менші за пускові струми асинхронних електродвигунів підключених на початку довгої лінії електропередачі (ЛЕП).
3. Вперше розроблений метод ковзного моніторингу величини середньоквадратичного значення струму, який полягає в цілеспрямованому внесенні спотворень в обчислення середньоквадратичного значення струму шляхом вибору відповідної частоти дискретизації гратчастої дельта-функції, що дозволило сформулювати критерій спрацювання пристроїв релейного захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг спричинених обривом N -провідника без залучення гармонійного аналізу спектру фазних струмів й, тим самим, діагностувати обрив N -провідника в будь-якому місці розгалуженої РЕМ електротехнічних комплексів з розподіленням вздовж ЛЕП нелінійним електричним навантаженням.
4. Вперше розроблений метод вибіркового вилучення третьої гармонійної складової струму шляхом вибору відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової

залежності струму в часі, що дозволило врахувати гармонійний спектр струму в N -провіднику РЕМ електротехнічних комплексів з різною характеристикою навантаження й, тим самим, вдосконалити алгоритм захисту N -провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних КЗ.

5. Вперше розроблені методи безпосереднього контролю над тепловим станом АД, які враховують вплив зміни активного опору обмоток статора при зміні їх температури на нерівномірність екстремальних значень миттєвої потужності, яку споживає електродвигун при пуску, що дозволило підвищити ефективність теплового захисту АД, які працюють в повторно-короткочасному режимі роботи.
6. Розроблений метод гармонійного аналізу нелінійних спотворень синусоїдальної форми фазних струмів, який відрізняється від існуючих визначенням вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме струму п'ятої гармоніки, шляхом безперервного моніторингу суми квадратів дискретних значень фазних струмів, які відповідають дискретизації вихідної аналогової залежності в часі з частотою дискретизації ґратчастої дельта-функції вдвічі більшою за частоту зміни струму п'ятої гармоніки, що дозволило забезпечити зниження порогу чутливості теплового захисту асинхронних електродвигунів при струмах перевантаження.
7. Здобула подальший розвиток теорія електромагнітних перехідних процесів в ЕТКС НН при несиметричних режимах роботи магістральних РЕМ напругою 0,4 кВ, який полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої та квазімиттєвої потужності в перехідному режимі виникнення надструму, що дозволило забезпечити режим віддаленого резервування відмов власних апаратів максимального струмового захисту віддалених приєднань.
8. Здобув подальший розвиток метод цифрової обробки аналогових сигналів, який полягає в множенні аналогової залежності струму в часі на ґратчасті дельта-функції з різними інтервалами дискретизації меншими або такими, що дорівнюють подвоєній частоті Найквіста, що дозволило прискорити аналіз гармонійного спектру фазних струмів, а також струму в N -провіднику за наявності нелінійних спотворень їх синусоїдальної форми при нелінійних навантаженнях.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблені алгоритми швидкої ідентифікації виду надструму, зокрема пускових струмів АД, за час, що не перевищує одного періоду зміни фазної електрорушійної сили після виникнення збурення електричного кола, що дозволило знизити поріг чутливості апаратів МСЗ до рівня струмів віддалених КЗ.
2. Розроблені алгоритми функціонування мікроконтролерних (МК) розчіплювачів автоматичних вимикачів (АВ) при обриві N -провідника в будь-якому місці розгалуженої РЕМ електротехнічних комплексів з розподіленим вздовж ЛЕП нелінійним навантаженням, в яких формування критерію спрацьовування захисту здійснюється за рахунок математичних операцій інтегрування квадратів миттєвих значень фазних струмів без залучення аналізу їх гармонійного складу.
3. Розроблений алгоритм функціонування МК розчіплювачів АВ при захисті N -провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних КЗ, який базується на ковзному моніторингу середньоквадратичного значення струму в N -провіднику в режимі, коли цілеспрямовано внесені спотворення в обчислення шляхом вибору відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності

в часі дозволяють не враховувати струм третьої гармоніки при захисті від однофазних КЗ і враховувати при реалізації захисту від перевантажень а, відтак забезпечити селективність захистів РЕМ напругою 0,4 кВ з глухим заземленням нейтралі без залучення гармонійного аналізу спектра струму в N -провіднику.

4. Розроблені алгоритми діагностування теплового стану АД в перехідному режимі пуску шляхом безпосереднього контролю над температурою обмоток статора за зміною їх активного опору при нагріванні, суть якого полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої та квазімиттєвої потужностей, що споживаються в режимі пуску, що дозволило підвищити ефективність теплового захисту АД, які працюють в повторно-короткочасному режимі роботи.
5. Розроблений алгоритм функціонування реле теплового захисту АД, який враховує вищі гармонійні складові у фазних струмах, а саме струм п'ятої гармоніки, що дозволило знизити поріг чутливості теплового захисту асинхронних електродвигунів при струмах перевантаження.

Результати роботи впроваджені в мікроконтролерних розчіплювачах РЕМ113СУХЛЗ, РЕМ124СУХЛЗ, РЕМ134СУХЛЗ, РЕМ136СУХЛЗ для низьковольтних АВ виробництва НВ ТОВ «ВІРА, ЛТД», м. Харків, Україна.

АК «Харківобленерго» впроваджено методику та основні математичні співвідношення, які зв'язують такі показники, як струм та питома втрата потужності циліндричних струмопроводів з вихідними сигналами електромагнітного перетворювача для безконтактного визначення енергетичних показників електромереж.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно. Серед них розробка методів формування оптимальних алгоритмів функціонування МК засобів протиаварійного керування, а саме: запропоновані нові рішення та розроблені алгоритми швидкого формування критеріїв ідентифікації різних видів збурення електричного кола: віддаленого КЗ, однофазного КЗ на N -провідник, пуску АД, обриву N -провідника, перевантаження N -провідника; встановлені процедури ЦОС з метою вилучення інформації про такі параметри електричного кола, як коефіцієнт потужності й гармонійний спектр фазних струмів; теоретично обґрунтовано метод діагностування аварійних режимів електричного кола, який полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається в перехідному режимі виникнення надструму; одержані математичні співвідношення для визначення гармонійного складу фазних струмів несинусоїдальної форми; розроблені методи теплового захисту АД, що працюють в повторно-короткочасному режимі, шляхом безпосереднього контролю над температурою обмоток статора; реалізовано у вигляді алгоритму функціонування мікроконтролерного пристрою захисту технічне рішення, яке дозволяє в режимі ковзного моніторингу сформуванню час спрацьовування реле захисту АД від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів; доведена доцільність формування критерію спрацьовування захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних КЗ без залучення гармонійного аналізу спектра струму.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних наукових конференціях та симпозиумах MicroCAD (Харків, 2014, 2016 рр.); «SIEMA»: Проблеми удосконалення

електричних машин і апаратів. Теорія і практика. (Харків, 2013-2015 pp.); «SIEMA»: Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. (Харків, 2016-2020 pp.); «NDT days 2013»/«Дни на безразрушителния контрол 2013» (Bulgarian-Russian Seminar «Diagnostics of energetic systems», Созополь, Болгарія, 2013 p.).

Публікації. Результати наукових досліджень викладено в 44 друкованих працях: 29 публікацій у наукових фахових виданнях України з них 3 у наукометричних базах Scopus та Web of Science Core Collection, 4 публікації у іноземних періодичних виданнях з них 3 у наукометричній базі Scopus, 11 патентів України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 320 сторінок. Робота містить 273 сторінки основного тексту, 166 найменувань використаних джерел на 22 сторінках, 2 додатки на 16 сторінках, 55 рисунки за текстом, 11 рисунків на 9 окремих сторінках, 1 таблиця за текстом.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, показаний її зв'язок із науковими планами та програмами, сформульована мета й задачі досліджень, визначені об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів, подані відомості про апробацію та основні публікації за темою проведених досліджень.

У першому розділі проаналізовані існуючі підходи до вирішення проблем, пов'язаних з діагностуванням таких режимів, що порушують нормальне електропостачання електротехнічних комплексів, як віддалені КЗ, обрив N -провідника, перевантаження АД та N -провідника вищими гармоніками струму, однофазні КЗ на N -провідник.

По-перше, було з'ясовано, що знизити поріг чутливості апаратів МСЗ до струмів віддалених КЗ і забезпечити пов'язаний із цим режим ВР відмов власних захистів віддалених приєднань заважають пускові струми АД, підключених на початку довгої ЛЕП. Існуючі методи та засоби відокремлення пускових струмів АД від струмів віддалених КЗ мають недоліки, пов'язані з недостатньою швидкістю визначення коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) електричного кола в момент виникнення надструму та сталого середньоквадратичного значення струму збурення електричного кола. Крім того, існуючий східчасто-часовий принцип селективного захисту багаторівневої мережі розподілу електроенергії призводить до надмірних термічних та динамічних впливів струмів КЗ на верхніх рівнях захисту в режимі ВР.

По-друге, було з'ясовано, що забезпечити ефективне діагностування обриву N -провідника в будь-якому місці розгалуженої РЕМ з розподіленням вздовж ЛЕП електричним навантаженням заважають нелінійні електричні навантаження, які призводять до нелінійних спотворень синусоїдальної форми фазних струмів i , як наслідок, к появи вищих гармонійних складових струму. Крім того, наявність вищих гармонік у фазних струмах заважає забезпечити селективний захист РЕМ при однофазних КЗ на N -провідник та захист самого N -провідника від перевантаження третьою гармонікою. Існуючі методи гармонійного аналізу з використанням дискретного перетворення Фур'є потребують надмірного математичного ресурсу для реалізації їх в алгоритмах керування існуючими пристроями РЗ та ПА.

По-третє, було з'ясовано, що існуючі алгоритми теплового захисту АД при перевантаженнях в повторно-короткочасному режимі роботи мають недоліки, пов'язані з недоотриманням достовірної інформації щодо температури обмоток статора. Оскільки обмотки не всіх АД обладнані тепловими датчиками, існуючі алгоритми теплового захисту не завжди ефективно обмежують надмірний тепловий вплив надструмів, особливо в повторно-короткочасному режимі роботи. Крім того, наявність вищих гармонік у фазних струмах заважає забезпечити ефективний тепловий захист АД в тривалому режимі роботи. Наявність струму п'ятої гармоніки призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток статора.

З проведеного аналізу випливає необхідність удосконалення захисних характеристик апаратів протиаварійного керування.

У другому розділі розроблені методи захисту РЕМ від струмів віддалених симетричних КЗ і забезпечення пов'язаного із цим режиму ВР відмов власних апаратів МСЗ віддалених приєднань.

Звернемося до схеми електричної мережі зображеної на рис. 1.

Віддалене КЗ на ЛЕП показано в місці приєднання вимикача $QF_{3.7}$. Вимикач $QF_{1.1}$ повинен бути чутливим до струмів $I_{cc\ far}$ КЗ наприкінці лінії в місці інсталяції $QF_{3.7}$ і не реагувати на пусковий струм I_{st} АД M_1 , підключеного на початку лінії. Величина I_{st} може перевищувати значення $I_{cc\ far}$. Для ВР потрібно, щоб струмова уставка I_{sd2} вимикача $QF_{1.1}$, встановленого на початку ЛЕП, дорівнювала $(1,5 \div 3)I_r$, де I_r – номінальний робочий струм вимикача $QF_{1.1}$. Таке ж співвідношення має бути забезпечено між величиною I_{cc} очікуваного струму КЗ за вимикачем $QF_{3.7}$, розташованим на вході навантаження $Z_{3.7}$, і величиною I_r вимикача $QF_{1.1}$. Отже, зниження уставки I_{sd2} до рівня $I_{cc\ far}$ вимикача $QF_{1.1}$, встановленого вище в багаторівневій системі МСЗ, особливо актуально при $I_{cc\ far} \approx I_{cc}$, коли КЗ сталося на невеликій відстані за $QF_{3.7}$.

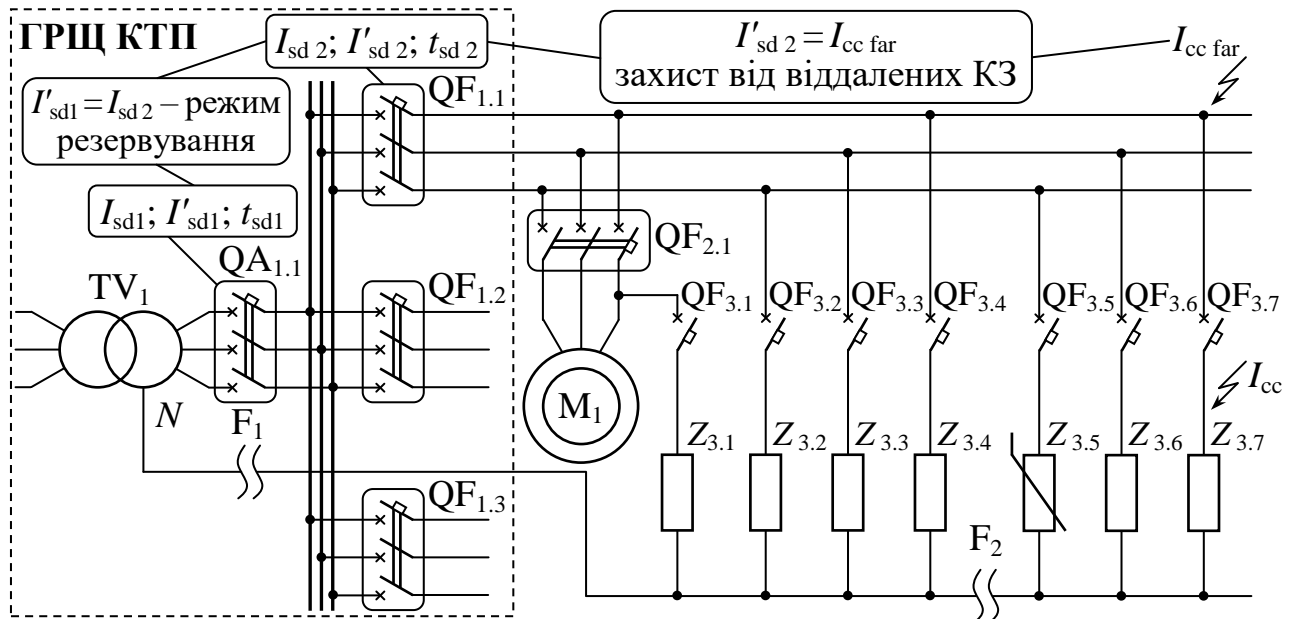


Рисунок 1 – Фрагменти схеми магістральної мережі електропостачання

На першому етапі була здійснена спроба ідентифікувати надструм використовуючи тільки середньоквадратичні значення фазних струмів $I_{ph(a,b,c)}$.

Для цього була проаналізована залежність в часі суми

$$\sum_{a,b,c} \Delta I_{\text{ph}T_1}^2 = \Delta I_{\text{ph}T_1a}^2 + \Delta I_{\text{ph}T_1b}^2 + \Delta I_{\text{ph}T_1c}^2 \quad (1)$$

квадратів середньоквадратичних значень $\Delta I_{\text{ph}T_1(a,b,c)}$ струмів збурення в кожній фазі за перший період T_1 (перші 20 мс) після виникнення надструму.

Було встановлено, що при пуску АД сума (1) за перший період T_1 після виникнення надструму майже на 20% більша, ніж за другий період T_2 . А при віддаленому КЗ сума (1) на 10% менша, ніж за період T_2 .

Приблизно однаковими виходять суми $\sum_{a,b,c} \Delta I_{\text{ph}T_2}^2$ за період T_2 і при пуску АД, і

при віддаленому КЗ. Тому можна прийняти, що величина $\Delta I_{\text{ph}T_2}$, розрахована за період T_2 , є істинним середньоквадратичним значенням ΔI_{ph} симетричної складової струму збурення. Відтак, порівняння сум $\sum_{a,b,c} \Delta I_{\text{ph}T_1}^2$ та $\sum_{a,b,c} \Delta I_{\text{ph}T_2}^2$, розрахованих в

перший T_1 та другий T_2 періоди струму збурення, дозволяє ідентифікувати вид збурення.

Проте, час ідентифікації описаним методом становить два періоди зміни фазної ЕРС (40 мс для робочої частоти 50 Гц). У ряді випадків для забезпечення режиму ВР такої швидкодії апаратів МСЗ буде недостатньо.

Оскільки реалізація інтегрального швидкодіючого селективного захисту, досягається за рахунок швидкого, протягом 10 мс після виникнення надструму, заздалегідь до згасання аперіодичної складової, визначення періодичної складової цього струму $\Delta I_{\text{ph}(a,b,c)}$ та $\cos\varphi$ кола зі струмом збурення, то на другому етапі була вирішена задача зменшення часу ідентифікації надструму. Цифрові технології дозволяють до завершення перехідного процесу визначити величини $\cos\varphi$ та $\Delta I_{\text{ph}(a,b,c)}$. Для цього була використана силова функція $S(t)$ електричного кола, що характеризує сумарні електродинамічні зусилля в трифазній системі струмів

$$S[\Delta i_{(a,b,c)}^2(t)] = \Delta i_a^2(t) + \Delta i_b^2(t) + \Delta i_c^2(t) = 3\Delta I_{\text{ph}}^2 [1 - 2e^{-t/\tau} \cos(\omega t) + e^{-2t/\tau}], \quad (2)$$

де $\Delta I_{\text{ph}} = \Delta I_{\text{ph}(a,b,c)} = \Delta I_{\text{pha}} = \Delta I_{\text{phb}} = \Delta I_{\text{phc}}$ – при симетричному трифазному КЗ.

На рис. 2 наведені залежності (2) для двох значень: $\cos\varphi = 0,3$, що відповідає пуску АД та $\cos\varphi = 0,7$, що відповідає віддаленому КЗ.

Якщо струм збурення ідентифіковано як трифазний, то сумарний інтеграл Джоуля в трьох фазах за період T зміни фазної ЕРС:

$$Q_{sm\Sigma} = \sum Q_{sm(a,b,c)} = Q_{sma} + Q_{smb} + Q_{smc}. \quad (3)$$

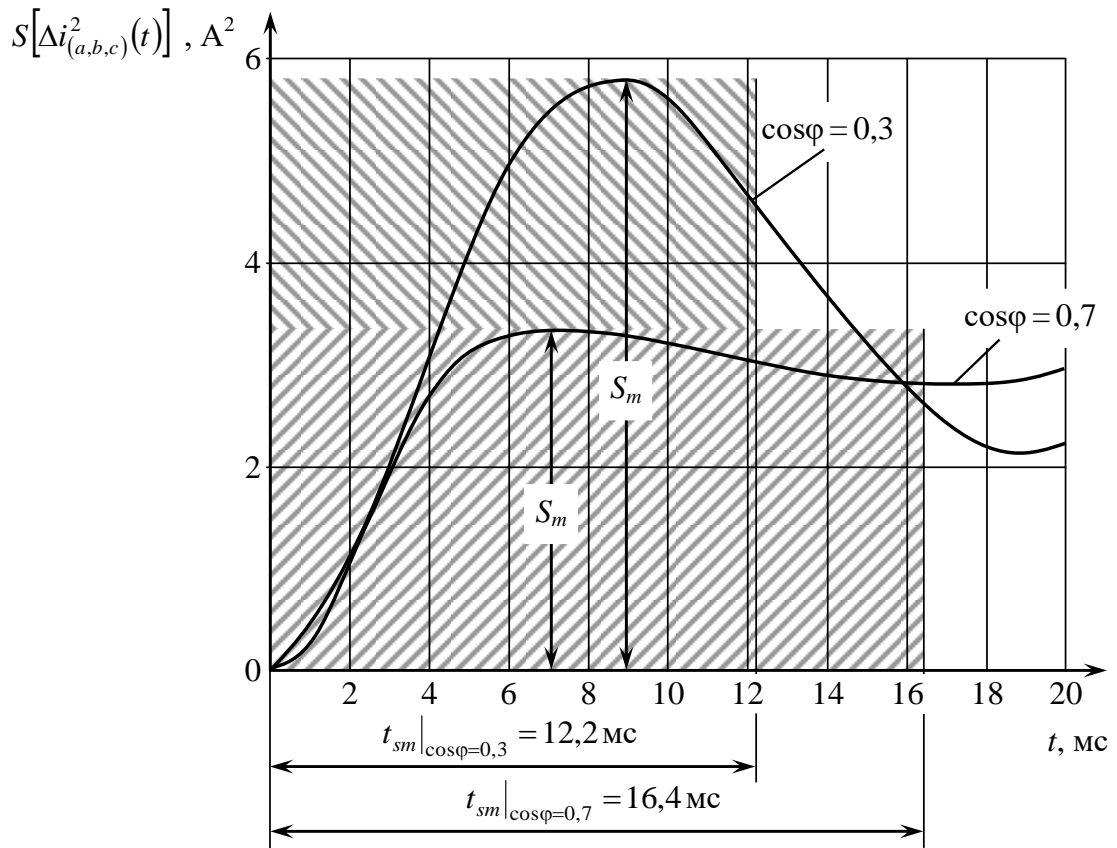
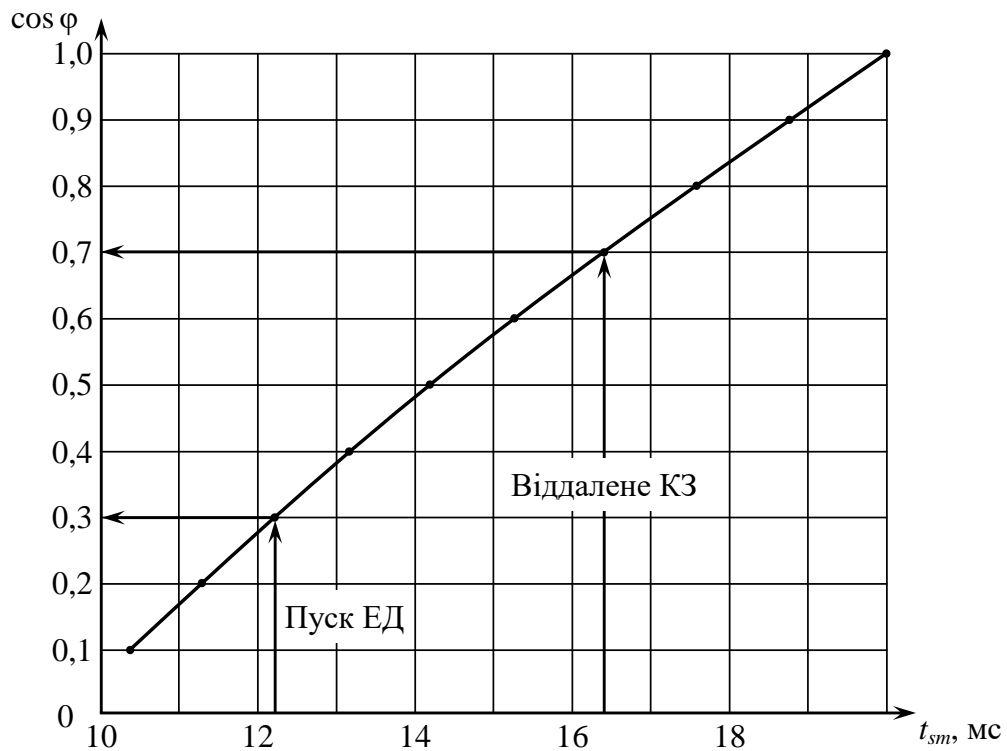
Діленням величини $Q_{sm\Sigma}$ на значення S_m (рис. 2) визначається час:

$$t_{sm} = Q_{sm\Sigma} / S_m. \quad (4)$$

Фізична сутність t_{sm} – це час, протягом якого термічна дія максимального S_m значення суми (2) буде еквівалентна фактичній сумарній термічній дії надструмів за час, що дорівнює періоду T зміни фазних ЕРС:

$$\int_0^T S[\Delta i_{(a,b,c)}^2(t)] dt = \int_0^{t_{sm}} S_m dt = S_m \cdot t_{sm}. \quad (5)$$

При $\cos\varphi = 0,3$ та $\cos\varphi = 0,7$ час t_{sm} істотно відрізняється, що свідчить про вагомість параметру t_{sm} для надійного визначення величини $\cos\varphi$ (рис. 3).

Рисунок 2 – Зміна функції $S(t)$ в часіРисунок 3 – Залежність $\cos \varphi$

Поєднання параметрів: $\Delta I_{ph(a,b,c)}$, $\cos \varphi$ та виду (двофазний або трифазний) надструму, дозволяє сформувавши критерій спрацьовування апарату МСЗ.

На рис. 4 подана удосконалена захисна часоштоворова характеристика апарату МСЗ. Удосконалена характеристика забезпечує чутливість пристроїв МСЗ до струмів віддалених КЗ, режим ВР, а також високу швидкодію селективного захисту.

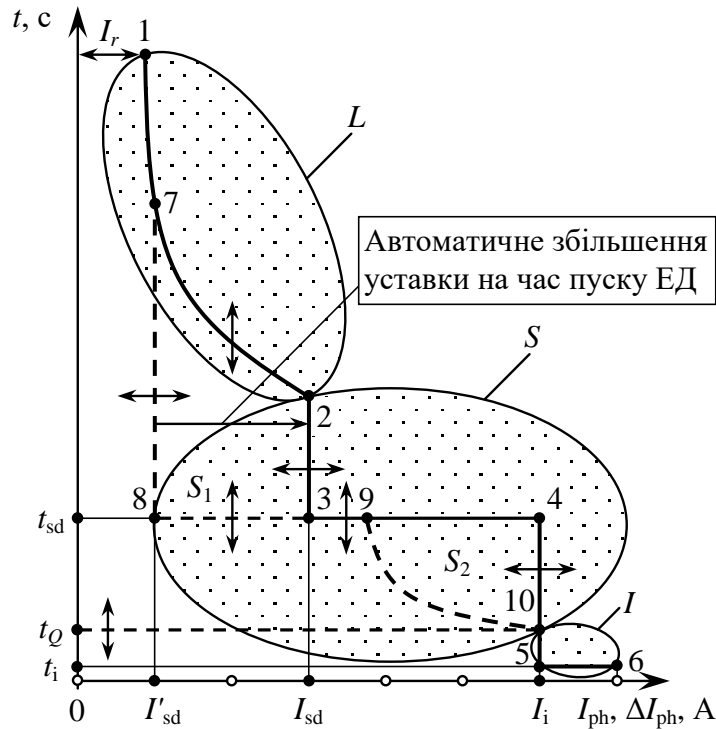


Рисунок 4 – Удосконалена захисна характеристика АВ низької напруги:

L – захист від струмів перевантаження; S – захист від міжфазних КЗ;
 S_1 – захист при віддалених КЗ або резервування; S_2 – швидкодіючий інтегральний селективний захист; I – миттєве спрацьовування; I_{sd} – уставка захисту S , що забезпечує нормальний пуск АД; I'_{sd} – уставка захисту S чутлива до струмів віддалених КЗ; I_i – уставка миттєвого спрацьовування

Прискорити ідентифікацію пускового струму I_{st} АД можливо за дискретними значеннями фазних струмів $i_{j(a,b,c)}$ та відповідних дискретних значень фазних напруг $u_{j(a,b,c)}$, а точніше за їх добутками: миттєві значення потужностей $p_{j(a,b,c)}$. За допомогою математичного моделювання проаналізовані залежності в часі сумарної для трифазного електричного кола миттєвої потужності $p_{\Sigma em}(t)$, що споживає АД при пуску

$$p_{\Sigma em}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) = 3I_{ph}U_{ph} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau}], \quad (6)$$

де $p_a(t) = i_a(t) \cdot u_a(t)$; $p_b(t) = i_b(t) \cdot u_b(t)$; $p_c(t) = i_c(t) \cdot u_c(t)$ – залежності в часі миттєвих потужностей, що споживає АД при пуску в фазах a, b, c , відповідно.

Характер зміни в часі потужностей $p_{(a,b,c)}(t)$ в кожній фазі окремо при пуску АД, а саме їх екстремальні значення, визначатимуться моментом виникнення струму I_{st} та величиною τ постійної часу згасання аперіодичної складової надструму. Момент ψ , фаза виникнення надструму, є величиною випадковою, тому за характером зміни в часі потужностей $p_{(a,b,c)}(t)$ отримати інформацію щодо величини τ неможливо. Таку інформацію можливо отримати з аналізу залежності (6) протягом перших 15 мс після виникнення збурення електричного кола у вигляді надструму (рис. 5).

На рис. 6 подані залежності (6) для двох випадків виникнення надструму електричного кола: $\cos\varphi = 0,2$, що відповідає струму I_{st} , та $\cos\varphi = 0,7$ при віддаленому КЗ.

В обох випадках зміна відбувається з коливанням від максимального p_{max} до мінімального p_{min} значення. При цьому значення p_{max} й p_{min} при різних $\cos\varphi$ істотно відрізняються. «Розмах» екстремальних значень $\Delta p^{0,2} = p_{max}^{0,2} - p_{min}^{0,2}$ для електричного кола з $\cos\varphi = 0,2$ виявляється приблизно вдвічі більшим ніж аналогічний «розмах» $\Delta p^{0,7} = p_{max}^{0,7} - p_{min}^{0,7}$ для електричного кола з $\cos\varphi = 0,7$.

Отже, за значеннями p_{max} та p_{min} можна оцінити $\cos\varphi$ в перехідному режимі виникнення збурення електричного кола та ідентифікувати вид струму цього збурення. Щоб критерій ідентифікації за величинами p_{max} та p_{min} не залежав від абсолютних значень струму та напруги, він повинен бути виражений у відносних одиницях. Зручним коефіцієнтом, що характеризує ступінь нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності («розмах» між p_{max} та p_{min}) в залежності від $\cos\varphi$, є співвідношення

$$K_P = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max} + p_{min}}. \quad (7)$$

На рис. 1.7 наведена залежність коефіцієнта K_P при різних $\cos\varphi$. З залежності випливає, що в момент пуску АД, коли $\cos\varphi = 0,2 \div 0,3$, значення коефіцієнта K_P дорівнюють $1,5 \div 0,8$, а коли $\cos\varphi = 0,7 \div 0,8$ при віддаленому КЗ, $K_P = 0,13 \div 0,08$. Мінімальне значення K_P при пуску АД виходить в 6 разів більшим, ніж його найбільше значення при віддаленому КЗ.

Отже, коефіцієнт K_P , є достатньо значущою складовою критерію ідентифікації виду струму збурення електричного кола, в тому числі пускового струму АД.

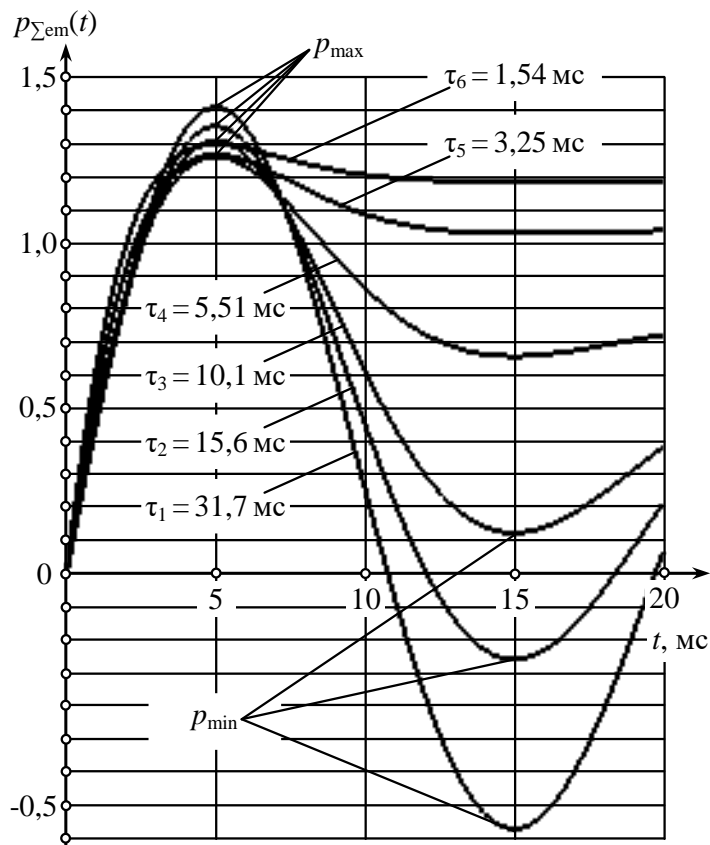


Рисунок 5 – Зміна в часі сумарної миттєвої потужності трифазного кола

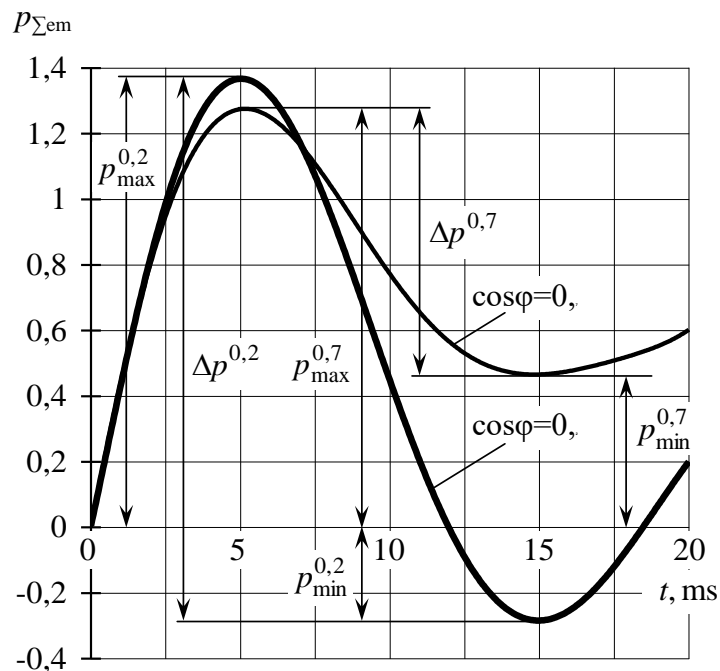


Рисунок 6 – Зміна в часі сумарної миттєвої потужності трифазного кола

Якщо КЗ буде не віддаленим, а наближеним до джерела живлення, то $\cos \varphi$ електричного кола при такому струмі збурення може дорівнювати $0,2 \div 0,3$, як при пуску АД.

Тоді додатковою складовою критерією ідентифікації струму I_{st} буде величина середньоквадратичного значення симетричної складової струмів збурення $\Delta I_{ph(a,b,c)}$ в кожній фазі. Жодне зі значень $\Delta I_{ph(a,b,c)}$ не повинне перевищувати відомого значення пускового струму I_{st} асинхронного електродвигуна:

$$\Delta I_{ph(a,b,c)} \leq I_{st}. \quad (8)$$

Швидко визначення величин $\Delta I_{ph(a,b,c)}$ здійснюється шляхом аналізу величини p_{max} . З'ясовано, що кожному значенню $\cos \varphi$, а отже кожному значенню K_P буде відповідати певне співвідношення між p_{max} та сталим значенням p_{st} функції $p_{\Sigma em}(t)$ (рис. 5).

Якщо знайдені p_{min} та p_{max} і визначений K_P , то стале значення p_{st} визначається так:

$$p_{st} = p_{max} / K_{st}, \quad (9)$$

де $K_{st} = p_{max} / p_{st}$ – коефіцієнт, що характеризує співвідношення потужностей p_{max} та p_{st} при різних значеннях коефіцієнта K_P .

Залежність коефіцієнта K_{st} від коефіцієнта K_P відображено на рис. 8. Тоді

$$\Delta I_{ph(a,b,c)} = \frac{\Delta p_{st}}{U_{0a} + U_{0b} + U_{0c}}, \quad (10)$$

де Δp_{st} – стале значення потужності $p_{\Sigma em}(t)$ викликане струмами збурення $\Delta I_{ph(a,b,c)}$; U_{0a} , U_{0b} , U_{0c} – середньоквадратичні значення фазних напруг за період T_0 , що передує першому періоду T_1 виникнення струму збурення.

Фрагмент алгоритмічної схеми функціонування пристрою керування МСЗ, що ілюструє його роботу при ідентифікації струму I_{st} , наведений на рис. 9.

Розроблений метод ідентифікації пускових струмів I_{st} АД має наступні переваги. Ідентифікація струмів I_{st} за допомогою функції (2) потребує безперервного моніторингу та порівняння миттєвих значень цієї функції з метою визначення екстремального S_m значення. При різних постійних часу τ перехідного процесу збурення електричного кола значення S_m будуть в різні моменти часу від початку перехідного процесу. Крім того, розрахунок інтегралів (3) потребує додаткового, по суті надлишкового, ресурсу арифметико-логічного пристрою (АЛП) мікроконтролера.

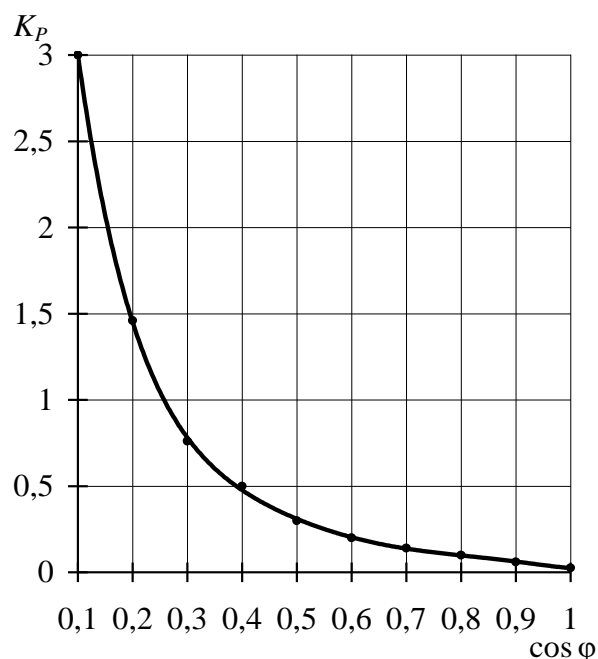


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта K_P від $\cos \varphi$

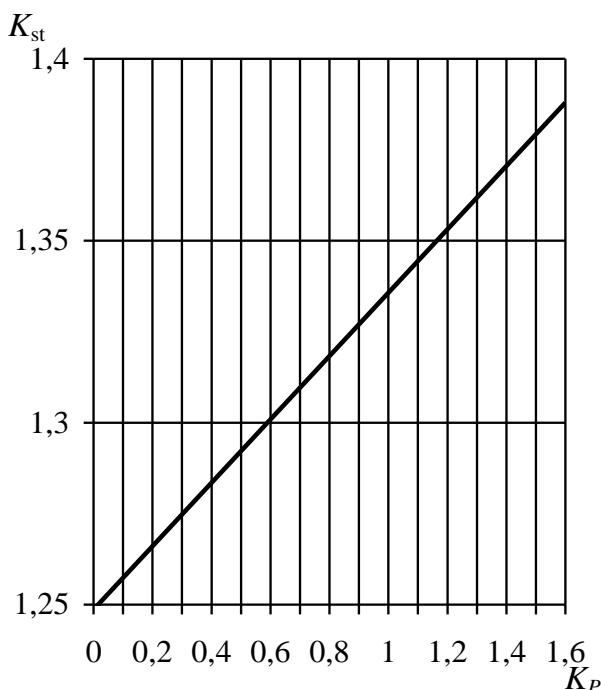


Рисунок 8 – Взаємозв'язок коефіцієнтів K_{st} та K_P

У випадку ідентифікації струмів I_{st} за допомогою залежності (6) значення p_{max} й p_{min} за будь-якої постійної часу t мають місце через 5 та 15 мс від початку перехідного процесу, відповідно. Таким чином, потрібен менший ресурс АЛП мікроконтролера.

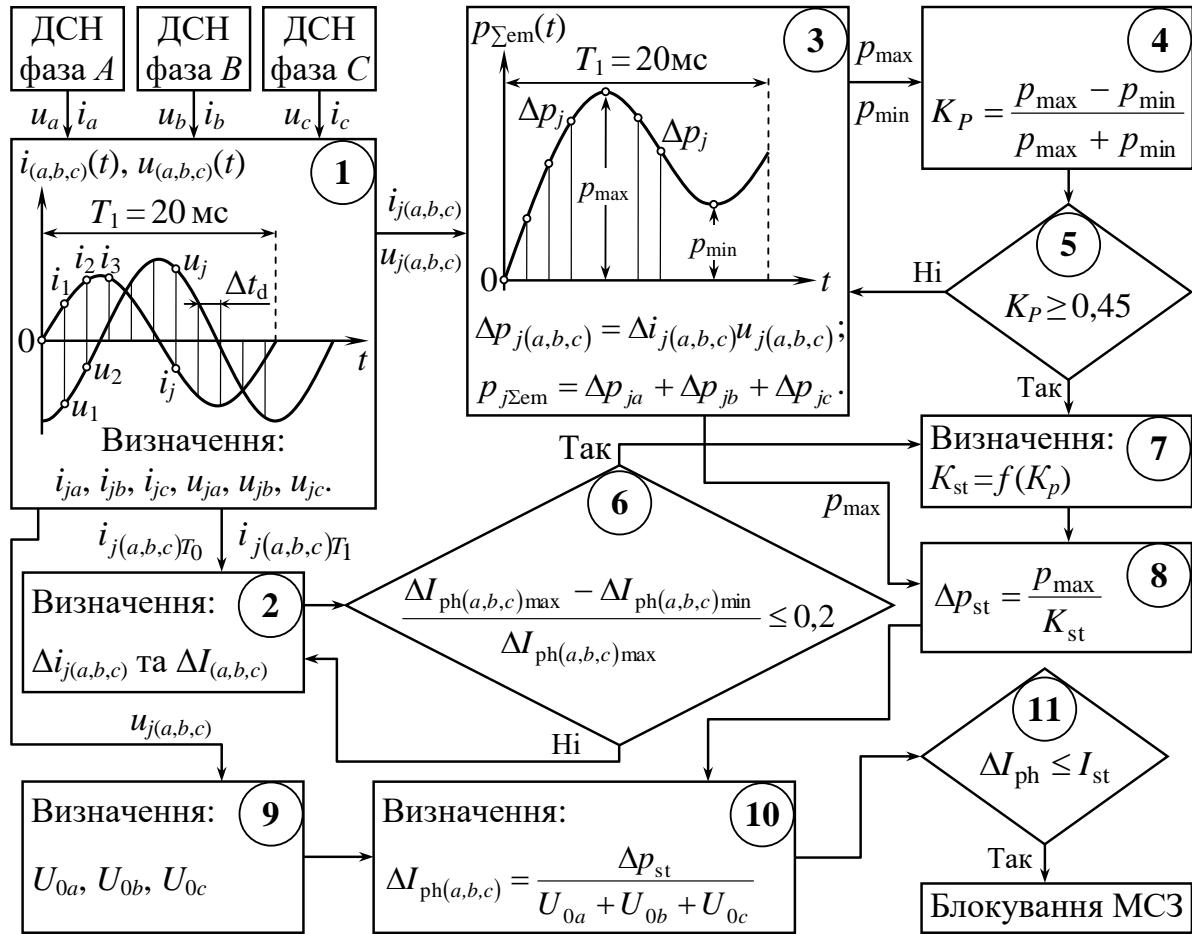


Рисунок 9 – Фрагмент алгоритмічної схеми функціонування мікроконтролерного пристрою керування максимальним струмовим захистом

У третьому розділі розроблені методи захисту UN однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, спричинених обривом N -провідника. При обриві N -провідника в місцях F_1 або F_2 (рис. 1 та 10) можливі перенапруги у однофазних споживачів внаслідок перекосу фазних напруг. Факт обриву визначається порівнянням очікуваного I'_N з фактичним I_N значеннями струму в N -провіднику.

Коли відсутні вищі гармоніки в фазних струмах $i_{ph(a,b,c)}(t)$ величина I_N визначається несиметрією струмів $i_{ph(a,b,c)}(t)$, а величина I'_N дорівнює модулю геометричної суми векторів фазних струмів, зрушених на 120° ел:

$$I'_N = \sum_{a,b,c} \dot{I}_{ph(a,b,c)} = \left| \dot{I}_{pha} + \dot{I}_{phb} + \dot{I}_{phc} \right|. \quad (11)$$

За наявності вищих гармонійних складових величина I_N визначається ще й наявністю струмів вищих гармонік. I_N дорівнює геометричній сумі діючих значень непарних гармонік не кратних трьом та арифметичній сумі діючих значень 3-ї гармоніки.

Відтак, побудова захисту UN потребує гармонійного аналізу струмів $i_{ph(a,b,c)}(t)$. Навіть в симетричному режимі в N -провіднику будуть арифметично підсумовуватися 3-ті гармоніки в струмах $i_{ph(a,b,c)}(t)$.

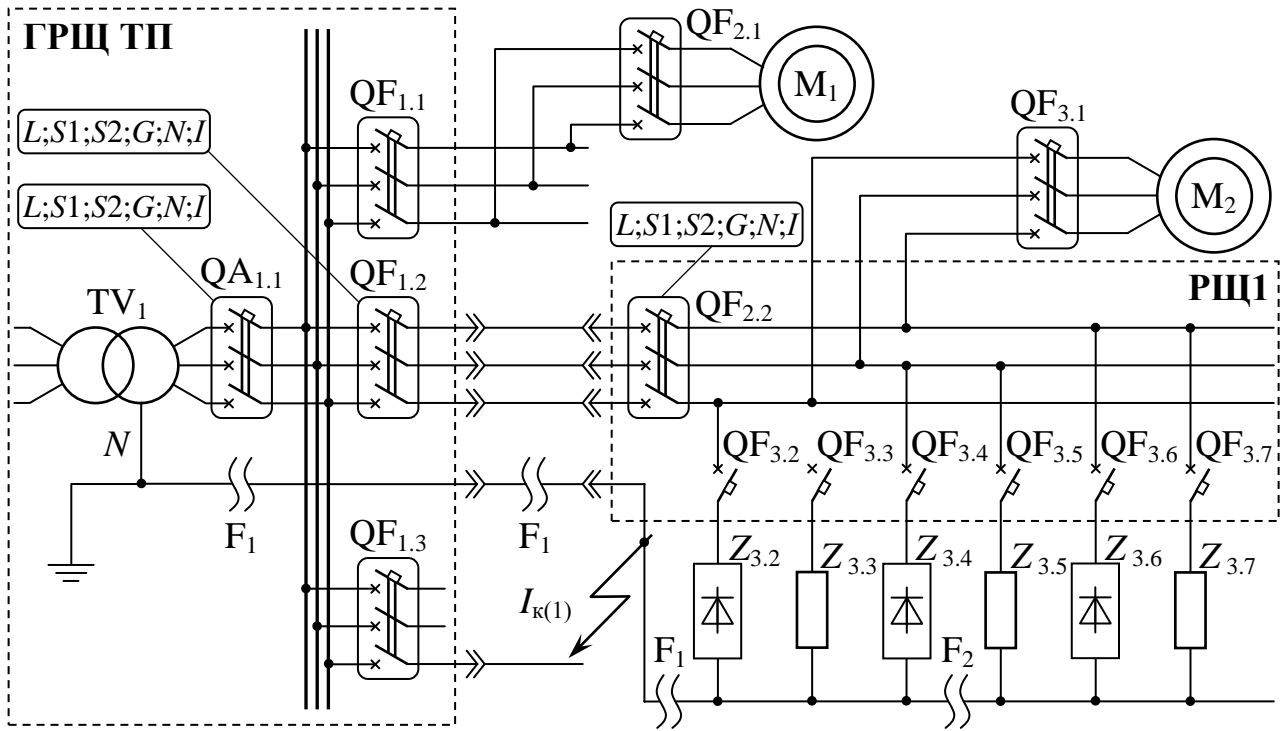


Рисунок 10 – Фрагмент схеми РЕМ з кабельними ЛЕП

Середньоквадратичне значення I'_N очікуваного струму в N -провіднику:

$$I'_N = \sqrt{(i'_{1N})^2 + (I'_{3N})^2 + (i'_{5N})^2} = \sqrt{\left(\sum_{a,b,c} i_{1(a,b,c)}\right)^2 + \left(\sum_{a,b,c} I_{3(a,b,c)}\right)^2 + \left(\sum_{a,b,c} i_{5(a,b,c)}\right)^2}, \quad (12)$$

де $I_{1(a,b,c)}$, $I_{3(a,b,c)}$, $I_{5(a,b,c)}$ – відповідно середньоквадратичні значення струмів 1-ої, 3-ої та 5-ої гармонійних складових в кожній фазі a, b, c .

Розроблений метод ґрунтується на ствердженні: якщо максимальна частота f_k в спектрі $i_{ph(a,b,c)}(t)$ чітко дорівнює половині частоти дискретизації f_d δ -функції, а початок відліку відповідає дискретним значенням $i_{j(a,b,c)}=0$, то при відновленні вихідного сигналу з дискретного буде відсутня k -та гармоніка.

Це реалізується шляхом множення залежностей $i_{ph(a,b,c)}(t)$ на ґратчасті δ -функції з **різними** інтервалами дискретизації $\Delta t_d = 1/f_d$. Здійснюється множення залежностей $i_{ph(a,b,c)}(t)$ на δ -функцію з **додатковими** інтервалами дискретизації Δt_d рівно вдвічі меншими за період зміни потрібної n -ї гармоніки, де $n = k, k-2, k-4, \dots, 1$, відповідні номера потрібних непарних гармонік.

За значеннями $i_{j(a,b,c)}$ відповідним дискретним відлікам множення струмів $i_{ph(a,b,c)}(t)$ на функції $\delta(t - k\Delta t_k)$, де $\Delta t_k = T_{(k)}/2$, визначаються діючі значення струмів без урахування k -ї гармоніки, тобто значення $I_{ph(k-2)(a,b,c)}$ з найвищою $k-2$ гармонікою.

Залежність, що пов'язує $I_{ph(a,b,c)}$ із значеннями гармонійних складових:

$$I_{ph(a,b,c)} = \sqrt{I_{1(a,b,c)}^2 + I_{3(a,b,c)}^2 + I_{5(a,b,c)}^2}. \quad (13)$$

де $I_{1(a,b,c)}$, $I_{3(a,b,c)}$, $I_{5(a,b,c)}$ – середньоквадратичні значення відповідних гармонік.

Середньоквадратичні значення $I_{phk(a,b,c)}$ струмів k -ї гармоніки:

$$I_{phk(a,b,c)} = \sqrt{I_{ph(a,b,c)}^2 - I_{ph(k-2)(a,b,c)}^2}. \quad (14)$$

В аналогічний спосіб визначаються значення більш низьких гармонік:

$$I_{\text{ph}n(a,b,c)} = \sqrt{I_{\text{ph}(a,b,c)}^2 - \sum_{p=n+1}^k I_{p(a,b,c)}^2 - I_{\text{ph}(n-1)(a,b,c)}^2} \cdot \quad (15)$$

Отже, при інтервалі дискретизації Δt_{d5} обчислені значення $I_{\text{ph-5}(a,b,c)}$ струмів $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ складатимуться тільки з 1-ї ($I_{1(a,b,c)}$) та 3-ї ($I_{3(a,b,c)}$) гармонік:

$$I_{\text{ph-5}(a,b,c)} = \sqrt{I_{1(a,b,c)}^2 + I_{3(a,b,c)}^2} \cdot \quad (16)$$

$$I_{5(a,b,c)} = \sqrt{I_{\text{ph}(a,b,c)}^2 - I_{\text{ph-5}(a,b,c)}^2} \cdot \quad (17)$$

Суть обчислення значень $I_{1(a,b,c)}$, $I_{3(a,b,c)}$, $I_{5(a,b,c)}$ трьох непарних гармонік у струмах $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ наступна. Одночасно здійснюється безперервний моніторинг:

- значень $I_{\text{ph}(a,b,c)}$ шляхом дискретизації залежностей $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ з частотою f_d втричі більшою за f_5 , 5-ї, найвищої з врахованих гармонік (рис. 11);
- значень $I_{\text{ph}3(a,b,c)}$ шляхом дискретизації залежностей $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ з частотою f_{d3} , що чітко дорівнює подвоєній f_3 , 3-ї гармоніки в $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$: $f_{d3} = 2f_3 = 300$ Гц (рис. 11);
- значень $I_{\text{ph}5(a,b,c)}$ шляхом дискретизації залежностей $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ з частотою f_{d5} , що чітко дорівнює подвоєній f_5 , 5-ї гармоніки в $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$: $f_{d5} = 2f_5 = 500$ Гц.

При ковзному моніторингу величин $I_{\text{ph}(a,b,c)}$, $I_{\text{ph}3(a,b,c)}$ та $I_{\text{ph}5(a,b,c)}$, з кроком ковзання Δt_{sl} , будуються залежності $I_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$, $I_{\text{ph}3(a,b,c)}(t)$ та $I_{\text{ph}5(a,b,c)}(t)$ (рис. 11).

При дискретизації залежностей $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ з частотою $f_d \geq 750$ Гц величина $I_{\text{ph}(a,b,c)}$ обчислюється з урахуванням усіх гармонік, тому залежність $I_{\text{ph}}(t)$, як показано на рис. 12, являтиме собою пряму лінію, паралельну осі часу t .

Покажемо, як розрахувати гармонійний спектр шляхом використання різних частот дискретизації f_d залежності $i_{\text{ph}}(t)$. Дослідимо характер зміни в часі залежності $I_{\text{ph}}(t)$ при її обчисленні за дискретними значеннями функції $i_{\text{ph}}(t)$, отриманими з частотами $f_{d5} = 2f_5 = 500$ Гц та $f_{d3} = 2f_3 = 300$ Гц. У моменти переходу через нуль 3-ї та 5-ї гармонійних складових у фазному струмі їх значень в миттєвих значеннях $i_j(t_j)$ не буде. Тому в середньоквадратичних значеннях $I_{\text{ph}3}$ та $I_{\text{ph}5}$ не будуть враховані струми 3-ї та 5-ї гармонік. Коли ж перетинання δ -функції з кривою $i_{\text{ph}}(t)$ буде відповідати проходженню струмів $i_3(t)$ та $i_5(t)$ через амплітудні значення, то в значеннях $I_{\text{ph}3}$ та $I_{\text{ph}5}$ струми 3-ї та 5-ї гармонік будуть враховані надмірно. Відтак величини $I_{\text{ph}3}$ та $I_{\text{ph}5}$ на кожному такті дискретизації з інтервалом $\Delta t_{sl} = \Delta t_d$ не будуть постійними, а залежності $I_{\text{ph}3}(t)$ й $I_{\text{ph}5}(t)$ змінюватимуться від максимального $I_{\text{ph}3\text{max}}$ або $I_{\text{ph}5\text{max}}$ до мінімального $I_{\text{ph}3\text{min}}$ або $I_{\text{ph}5\text{min}}$ значень з кожним кроком Δt_d (рис. 12). Відтак в значеннях $I_{\text{ph}3\text{min}}$ та $I_{\text{ph}5\text{min}}$ не будуть враховані значення $I_{3(a,b,c)}$ та $I_{5(a,b,c)}$ струмів 3-ї та 5-ї гармонік:

$$I_{\text{ph}5\text{min}} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2}; \quad (18)$$

$$I_{\text{ph}} = \sqrt{\frac{1}{T_{(1)}} \sum_{j=1}^{T_{(1)}/\Delta t_d} i_j^2 \Delta t_d} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} \cdot \quad (19)$$

$$I_5 = \sqrt{I_{\text{ph}}^2 - I_{\text{ph}5\text{min}}^2} \cdot \quad (20)$$

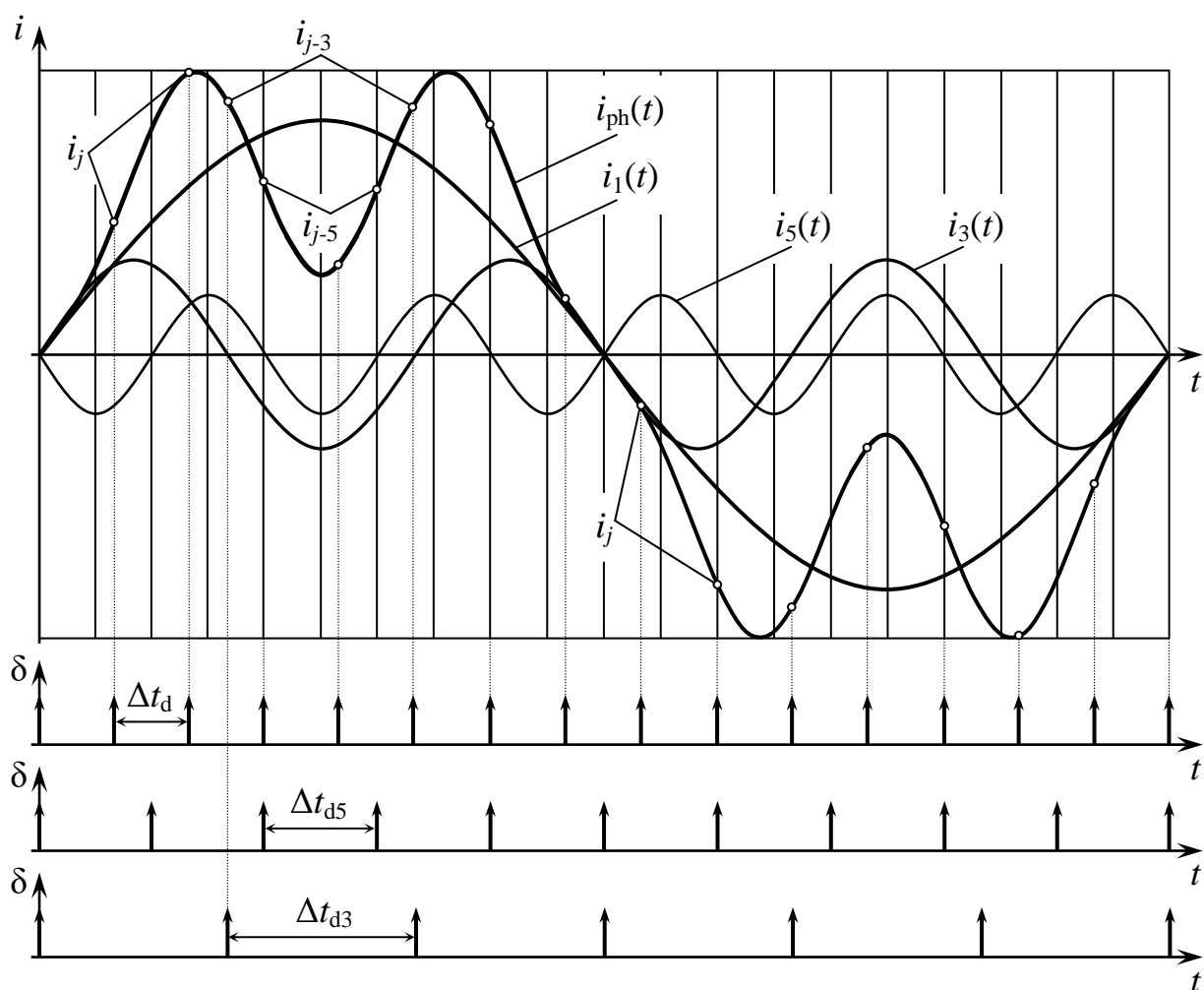


Рисунок 11 – Дискретизації аналогової залежності струму в часі

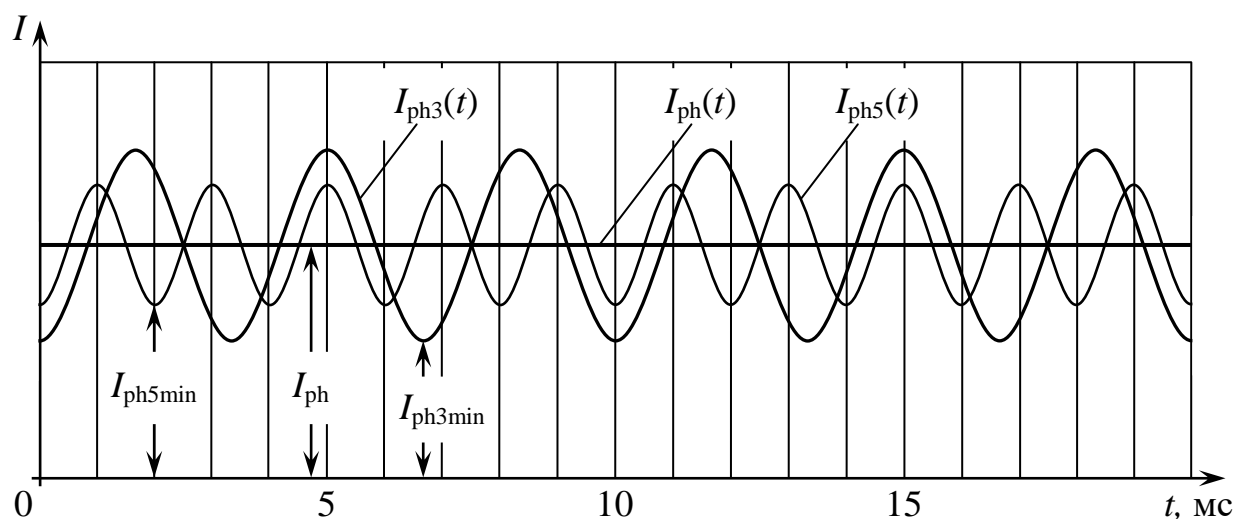


Рисунок 12 – Визначення середньоквадратичних значень фазного струму при різних інтервалах дискретизації аналогової залежності струму в часі

Величина I_{ph3min} містить струм 1-ї гармоніки без спотворень, та частину 5-ї гармоніки, відновлену за дискретними значеннями i_{j-3} струму $i_{ph}(t)$, що відповідають проходженню струму $i_3(t)$ через нуль. Було встановлено та теоретично доведено, що відновлена за значеннями i_{j-3} синусоїда $i_5(t)|_{fd3}$ змінюється з частотою 1-ї гармоніки,

і, як засвідчили розрахунки, середньоквадратичне значення $I_5|_{f_{d3}}$ синусоїди $i_5(t)|_{f_{d3}}$ дорівнює неспотвореному середньоквадратичному значенню I_5 синусоїди $i_5(t)$.

З урахуванням викладеного:

$$I_{\text{ph3min}} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2}. \quad (21)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{\text{ph3min}}^2 - I_5^2}. \quad (22)$$

$$I_3 = \sqrt{I_{\text{ph}}^2 - I_5^2 - I_1^2}. \quad (23)$$

Після того, як знайдені середньоквадратичні значення 1-ї, 3-ї та 5-ї гармонійних складових струмів $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ обчислюється величина I'_N (12) за умови непорушеної цілісності N -провідника.

Величина I_N може визначатись за дискретними значеннями i_{jN} струму в N -провіднику шляхом обчислення їх як суми дискретних значень фазних струмів:

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{T_{(1)}} \sum_{j=1}^p i_{jN}^2 \Delta t_d} = \sqrt{\frac{1}{T_{(1)}} \sum_{j=1}^p (i_{ja} + i_{jb} + i_{jc})^2 \Delta t_d}. \quad (24)$$

де $p = T_{(1)}/\Delta t_d$; $T_{(1)} = 0,02$ с – період зміни 1-ї основної гармоніки струму; $\Delta t_d = 1/f_d$.

Далі був розроблений метод діагностування обриву N -провідника з метою захисту однофазних споживачів від перенапруг внаслідок цього. За рахунок аналогічного (рис. 12) цілеспрямованого спотворення середньоквадратичних значень фазних струмів шляхом вибору відповідної частоти f_{d3} дискретизації залежностей $i_{\text{ph}(a,b,c)}(t)$ стало можливим виключити негативний вплив струмів 3-ї гармонійної складової на точність, а відповідно і ефективність функціонування захисту UN .

В розробленому раніше методі захист UN спрацьовує в усіх випадках, якщо зафіксований обрив N -провідника. Такий підхід з економічної точки зору постачальників електроенергії не є оптимальним. Небезпека пошкодження побутових електроприладів у однофазних споживачів електроенергії при обриві N -провідника виникне тільки у випадку, якщо несиметрія фазних струмів буде достатньою, щоб величина перенапруги в одній з фаз стала більшою за припустимі 10% від робочого значення фазної напруги. Так спрацьовування захисту не призведе до невиправданого зниження обсягу поставок електроенергії. По-друге, навіть якщо в аварійній частині РЕМ дійсно виникнуть небезпечні перенапруги, проте приєднана потужність аварійної ділянки виявиться незначною (обрив наприкінці ЛЕП), то витрати на можливий ремонт або навіть заміну пошкодженої електропобутової техніки за рахунок підприємства постачальника електроенергії можуть виявитися меншими втрат від недопоставки електроенергії та відшкодування споживачам збитків та вартості недовідпущеної електричної енергії у разі відключення всієї мережі електропостачання при обриві N -провідника в кінці магістральної ЛЕП. Тому було передбачене компромісне рішення, яке дозволило, за умови, що довжина аварійної ділянки незначна, не відключати всю мережу поки не визначено місце пошкодження. Так відключення мережі буде короточасним, на час відновлення цілісності N -провідника.

Для побудови захисту UN достатньо аналізу силової функції $S(t)$:

$$S(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t) = \left[\sqrt{2}I_{pha} \sin(\omega t - \varphi) \right]^2 + \left[\sqrt{2}I_{phb} \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 + \left[\sqrt{2}I_{phc} \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \right]^2. \quad (25)$$

На рис. 13 наведені залежності в часі функції $S'(t, \chi)$ віднесеної до \bar{I}_{ph}^2 , де \bar{I}_{ph} – середньоарифметичне значення для значень $I_{pha}, I_{phb}, I_{phc}$.

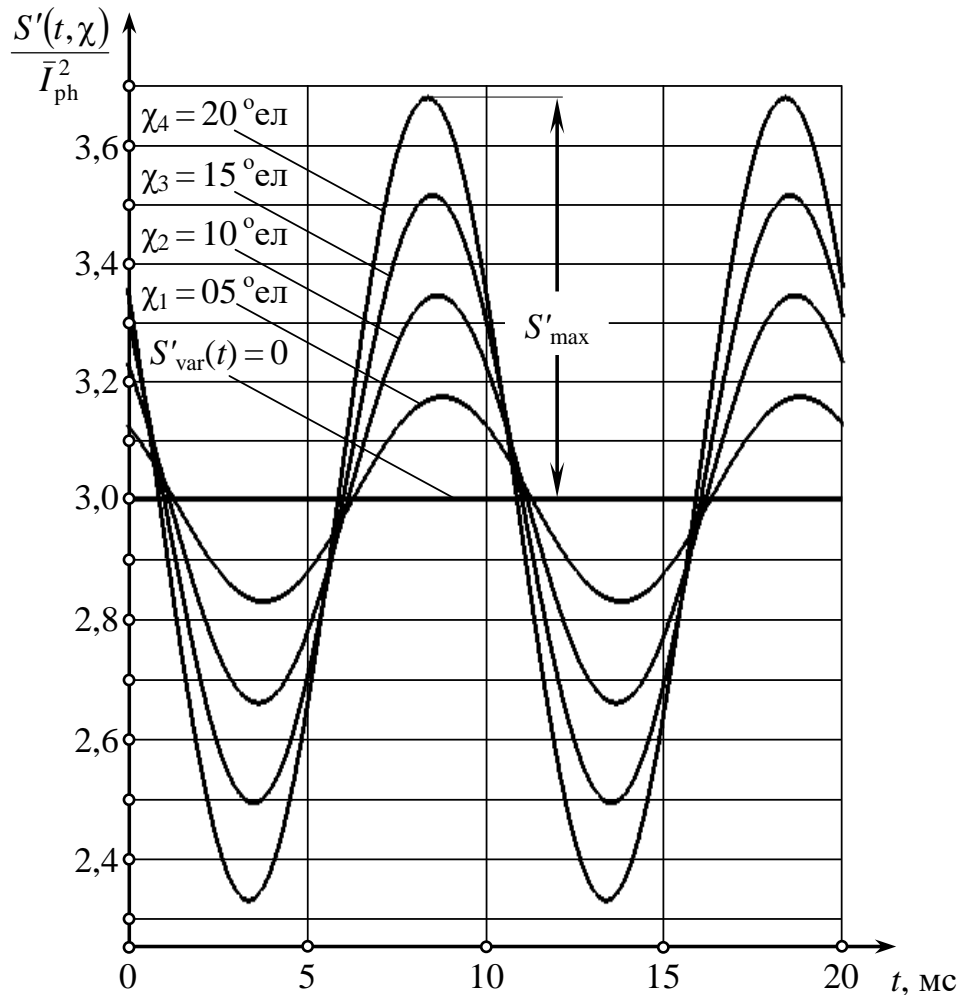


Рисунок 13 – Залежності в часі функції $S'(t)$ віднесеної до \bar{I}_{ph}^2

Коефіцієнт k_U характеризує перенапруги на ділянці ЛЕП, коли відключення мережі відбувається в економічно обґрунтованих випадках:

$$k_U = \frac{S'_{\max} - S'_{\min}}{3\bar{I}_{ph}^2(1 - k_N)}, \quad (26)$$

де k_N – коефіцієнт, що характеризує умовну частку приєднаної потужності ділянки магістральної ЛЕП розподільної мережі електропостачання.

Спрацьовування захисту відбувається коли виконується умова: $k_U > k_{U\max} = 0$.

Розроблений метод захисту UN однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, спричинених обривом N -провідника забезпечує спрощення алгоритму функціонування мікроконтролерного пристрою керування напівпровідниковим розчіплювачем автоматичного вимикача за рахунок аналізу дискретних значень тільки фазних струмів без залучення дискретних значень струму в N -провіднику, а швидке відключення всієї мережі електропостачання здійснюється тільки в економічно обґрунтованих випадках.

Далі був розроблений метод захисту N -провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних КЗ, який ґрунтується на положенні, що цілеспрямовано додані спотворення при обчисленні середньоквадратичного значення струму шляхом вибору частоти дискретизації вихідної залежності, дозволяють вибірково виключити вплив 3-ї гармоніки струму при побудові захисту G від однофазних КЗ і враховувати при захисті L_N від перевантажень N -провідника. Розроблений метод не вимагає спеціального математичного апарату визначення гармонійного складу струму і зводиться до традиційного для МСЗ визначення його середньоквадратичного значення, особливістю якого є вибір певної частоти дискретизації вихідної залежності $i_N(t)$ струму в N -провіднику. Моніторинг спотвореного середньоквадратичного значення $I_{N3}(t)$ при різних моментах початку розрахунку дозволяє визначити величини $I_{N3\max}$ й $I_{N3\min}$. $I_{N3\min}$ використовується при захисті G , а сукупність обох значень – при побудові захисту L_N (рис. 14).

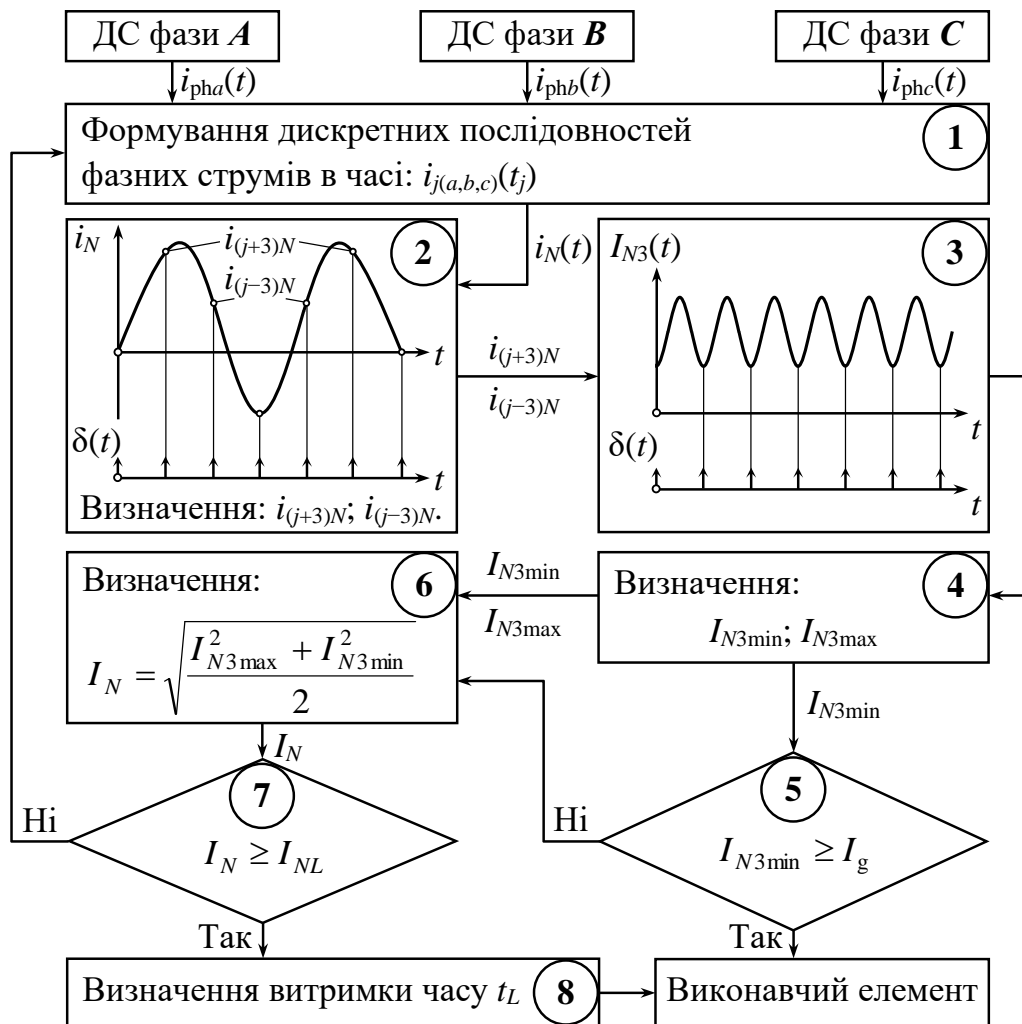


Рисунок 14 – Алгоритмічна схема функціонування пристрою захисту N -провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань

У четвертому розділі удосконалено методи теплового захисту АД.

Контроль над температурним режимом обмоток статора АД здійснюється при пуску АД за дискретними значеннями миттєвої потужності. Підгрунття такого контролю засноване на аналізі залежності (6). Залежності (рис. 5) ілюструють необхідні властивості функції $p_{\Sigma em}(t)$ при пуску АД, а саме, протягом перших 15 мс зміна функції $p_{\Sigma em}(t)$ відбувається з коливанням від значення p_{max} до значення p_{min} .

На рис. 15 подана залежність коефіцієнту K_p (7) при зміні постійної часу електричного кола τ . Постійна τ обмоток при пуску АД при температурі $T_{nc} = 25^\circ\text{C}$ дорівнює $\tau_{25} = 15,6$ мс.

Наприклад, припустима температура для ізоляції класу «В», дорівнює $T_B = 155^\circ\text{C}$.

Опір мідного дроту при його нагріванні на 130°C збільшується в 1,55 рази. Відповідно, постійна τ нагрітої до $T_B = 155^\circ\text{C}$ обмотки зменшиться в 1,55 рази: $\tau_{155} = 0,645\tau_{25} = 10,06$ мс.

Відтак, сама обмотка АД є датчиком її температури, якщо для формування критерію, що характеризує зміну її опору R_m при нагріванні, використовувати екстремальні значення p_{max} та p_{min} потужності $p_{\Sigma em}(t)$ (рис. 5).

Алгоритм теплового захисту АД з безпосереднім контролем над температурою обмотки статора наступний:

- при пуску АД визначається співвідношення екстремальних значень p_{max} та p_{min} миттєвої потужності $p_{\Sigma em}(t)$, яке характеризується коефіцієнтом K_p (7);
- за величиною коефіцієнта K_p (рис. 15) визначається величина постійної часу τ_Θ електричного кола, що відповідає збільшенню температури обмотки АД на величину Θ щодо температури навколишнього середовища T_{nc} ;
- здійснюється порівняння величини τ_Θ , що відповідає нагрітому до температури T_Θ стану АД ($T_\Theta = T_{nc} + \Theta$), із заданим $\tau_{T_{kn}}$, яке відповідає температурі T_{kn} , і визначається коефіцієнт зниження величини постійної часу при нагріванні:

$$K_\tau = (\tau_{T_{kn}} - \tau_\Theta) / \tau_\Theta, \quad (27)$$

- визначається таке, що відповідає (27), збільшення активного опору нагрітої обмотки та температуру самої обмотки T_Θ в момент чергового пуску:

$$T_\Theta = K_\tau / \alpha_{cu} + T_{kn}, \quad (28)$$

де α_{cu} – температурний коефіцієнт опору міді.

Наведений алгоритм дозволяє сформуванню удосконалену характеристику захисту АД, що працюють в повторно-короткочасному режимі роботи, від струмів перевантаження, оскільки передбачений безпосередній контроль над температурним режимом обмоток статора, не оснащених термісторами.

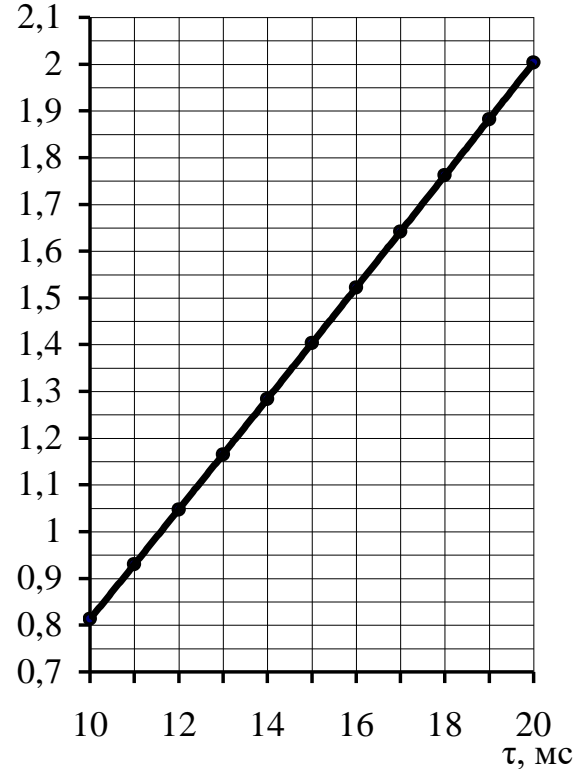


Рисунок 15 – Залежність коефіцієнту K_p від постійної часу τ

Прискорити контроль над температурою обмоток АД можливо за дискретними значеннями фазних струмів $i_{j(a,b,c)}$ й зміщених на чверть періоду відносно них фазних напруг $u_{j(a,b,c)}$, а саме:

$$q_{\Sigma em}(t) = q_a(t) + q_b(t) + q_c(t) = -3I_{ph}U_{ph} \left[\sin \varphi - \sin(\omega t + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (29)$$

де $q_a(t) = i_a(t) \cdot u_a(t - T/4)$;
 $q_b(t) = i_b(t) \cdot u_b(t - T/4)$;
 $q_c(t) = i_c(t) \cdot u_c(t - T/4)$ – часові залежності квазімиттєвих потужностей, що споживаються АД в фазах a, b, c , відповідно; $u_a(t - T/4)$; $u_b(t - T/4)$; $u_c(t - T/4)$ – миттєві значення напруг в фазах a, b, c , відповідно, зміщені на чверть періоду відносно миттєвих значень фазних струмів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ та відповідних їм напруг.

На рис. 16 подані залежності в часі $q_{\Sigma em}(t)$. Значення p_{max} (рис. 5) й q_{max} (рис. 16) відрізняються один від одного тим сильніше, чим менша постійна часу τ обмоток АД.

Коефіцієнтом K_W , що характеризує ступінь нерівномірності екстремальних значень p_{max} й q_{max} при зміні величини τ , є співвідношення:

$$K_W = \frac{W_Q - W_P}{W_P}, \quad (30)$$

де

$$W_P = \sum_0^{\frac{T_1}{2}} p_{\Sigma emj} \Delta t = \sum_0^{\frac{T_1}{2}} (u_{ja} i_{ja} + u_{jb} i_{jb} + u_{jc} i_{jc}) \cdot \Delta t; \quad (31)$$

$$W_Q = \sum_0^{\frac{T_1}{2}} q_{\Sigma emj} \Delta t = \sum_0^{\frac{T_1}{2}} (u_{ja-T/4} i_{ja} + u_{jb-T/4} i_{jb} + u_{jc-T/4} i_{jc}) \cdot \Delta t, \quad (32)$$

Δt – інтервал дискретизації аналогових залежностей $p_{\Sigma em}(t)$ й $q_{\Sigma em}(t)$; $j - T/4$ – номер дискретних значень напруг $u_{j(a,b,c)}$, зрушених на чверть періоду щодо відповідних дискретних значень струмів $i_{j(a,b,c)}$.

На рис. 17 подана залежність величини коефіцієнта K_W від постійної часу τ .

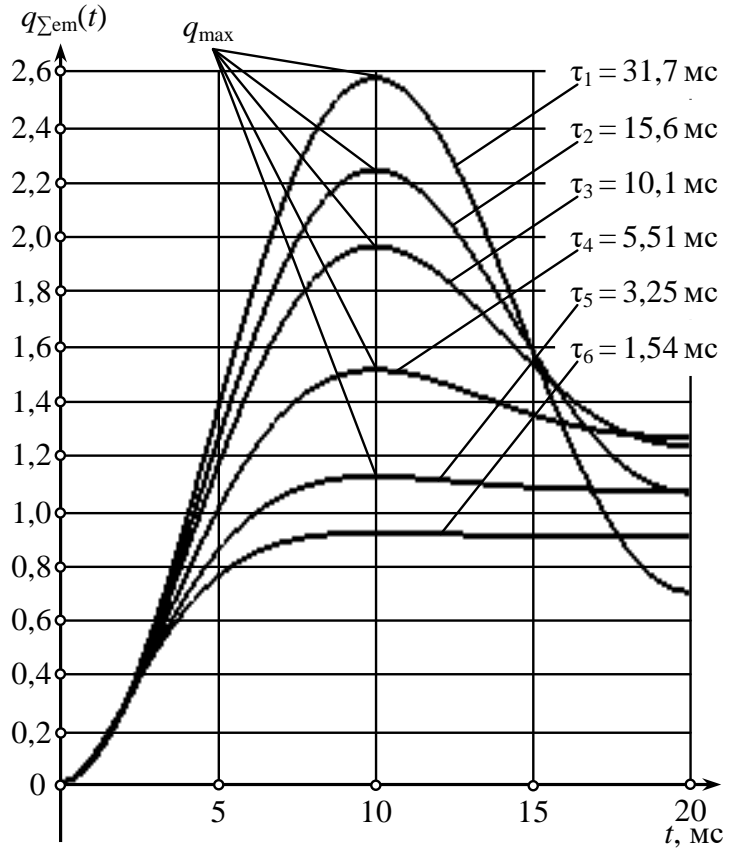


Рисунок 16 – Зміна в часі квазімиттєвої потужності при пуску АД

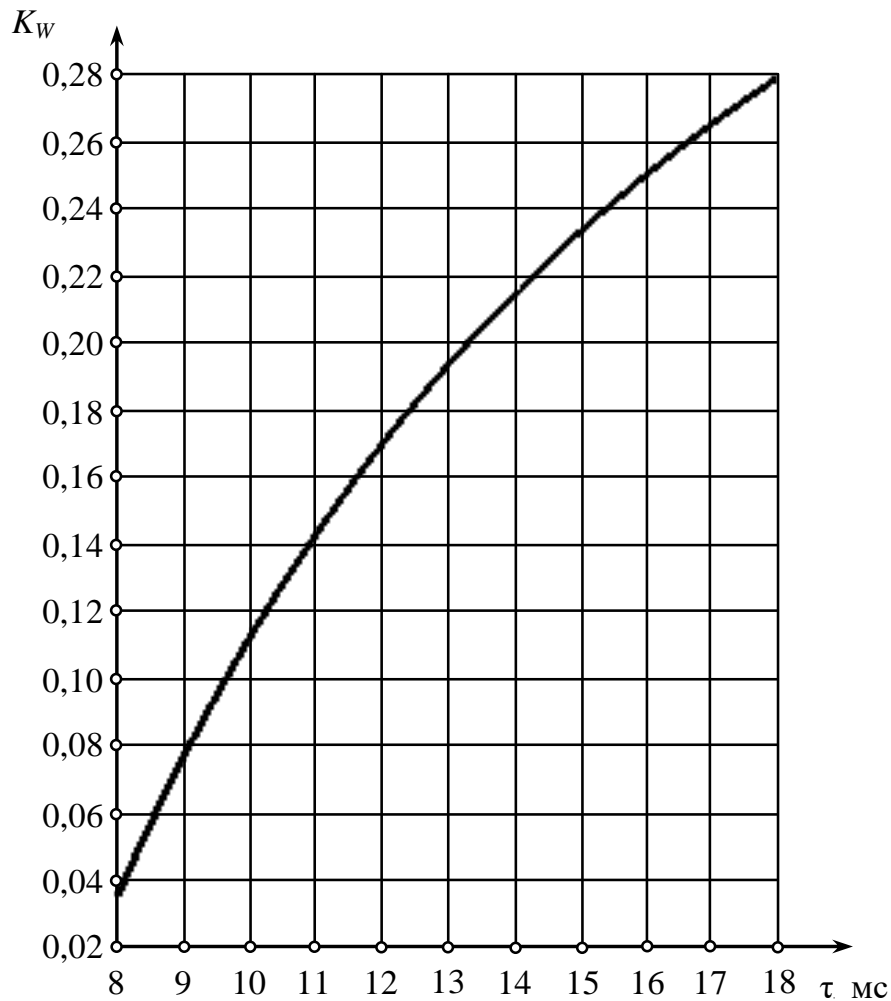


Рисунок 17 – Зміна коефіцієнта K_W при зміні постійної часу τ

Отже, здійснювати моніторинг активного опору R_m обмотки АД при її нагріванні та визначати її температуру з залежності $\tau(K_W)$ можливо при кожному пуску.

Алгоритм функціонування пристрою захисту АД з безпосереднім контролем над температурою обмотки статора полягає в наступному. При кожному пуску АД визначається співвідношення (30), яке характеризується коефіцієнтом K_W . За величиною K_W визначається постійна часу τ_Θ , яка відповідає нагріванню обмотки до температури T_Θ . Порівняння τ_Θ із заданим $\tau_{T_{kn}}$ при заданій температурі T_{kn} та визначення коефіцієнта (27) дозволяє легко визначити відповідне збільшення активного опору R_m обмотки при її нагріванні, а отже її температуру T_Θ (28) АД в момент пуску.

Нехтування впливом на нагрівання АД вищих гармонік струму знижує ефективність теплового захисту. Підвищення ефективності захисту АД здійснено шляхом врахування додаткового нагрівання обмоток від вищих гармонік струму. В трифазних мережах без N -провідника в фазних струмах відсутня 3-я гармоніка. Отже для вдосконалення захисту АД від теплової дії надструмів достатньо обмежитись визначенням середньоквадратичних значень лише 1-ї та 5-ї гармонік у фазних струмах.

Для врахування впливу п'ятої гармоніки струму на додаткове нагрівання АД необхідно здійснювати коригування захисної часо-струмової характеристики, яка відповідає тепловій дії синусоїдального струму і не враховує додаткового нагрівання АД від струмів вищих гармонік, зокрема, струму п'ятої гармоніки.

Формула для потужності сумарних втрат $\Delta P_{\Sigma k}$ від k вищих гармонік

$$\Delta P_{\Sigma k} = \Delta P_r k_{st}^2 \sum_{n=2}^k \left(\frac{U_n}{nU_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = \Delta P_r k_{st}^2 \sum_{n=2}^k k_{dn}, \quad (33)$$

де ΔP_r – номінальні втрати потужності в обмотках статора при фазному струмі синусоїдальної форми; k – порядок (номер) останньої з врахованих вищих гармонік; U_1 – напруга першої (основної) гармоніки; U_n – напруга n -ої гармоніки; k_{dn} – коефіцієнт, що враховує зростання втрат в обмотках АД від n -ої гармоніки

$$k_{dn} = \left(\frac{U_n}{nU_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2 \frac{\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}}{n^2}. \quad (34)$$

Для випадку що розглядається

$$\Delta P_5 = \Delta P_r k_{st}^2 k_{d5} = \Delta P_r k_{st}^2 (U_5/U_1)^2 \frac{\sqrt{5} + \sqrt{5+1}}{25} \approx 0,187 \cdot k_{st}^2 \Delta P_r (U_5/U_1)^2. \quad (35)$$

При побудові теплового захисту АД величини напруг використовувати майже неможливо через відсутність N -провідника. Тому рівняння (35) доцільно перетворити таким чином, щоб використовувалась залежність коефіцієнта k_{d5} від величини середньоквадратичного значення струму 5-ї гармоніки:

$$k_{d5} = f(I_5/I_1), \quad (36)$$

Рівняння (35) перетворимо у такий спосіб:

$$U_1 = I_1 \cdot Z_{m1} = I_1 \sqrt{R_m^2 + (\omega L_m)^2}; \quad (37)$$

$$U_5 = I_5 \cdot Z_{m5} = I_5 \sqrt{R_m^2 + (5\omega L_m)^2}; \quad (38)$$

$$k_{d5} = 0,2 \cdot (U_5/U_1)^2 = 0,2 \cdot I_5/I_1^2 \cdot \frac{R_m^2 + 25\omega^2 L_m^2}{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}; \quad (39)$$

$$\omega L = R \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad (40)$$

$$k_{d5} = 0,2 \cdot (I_5/I_1)^2 \cdot \frac{R_m^2 + 25R_m^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{R_m^2 + R_m^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} = 0,2 \cdot (I_5/I_1)^2 \cdot \frac{1 + 25 \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}, \quad (41)$$

де Z_{m1} – імпеданс обмотки статора АД на частоті 1-ої гармоніки струму; Z_{m5} – імпеданс обмотки статора АД на частоті 5-ої гармоніки струму.

Якщо знайдений коефіцієнт k_{d5} , то еквівалентний фазний струм I'_{ph} , що враховує додаткове нагрівання статора АД від впливу 5-ї гармоніки:

$$I'_{ph} = I_{ph} \sqrt{1 + k_{st}^2 k_{d5}}. \quad (42)$$

Середньоквадратичні значення $I_{ph(a,b,c)}$ фазних струмів:

$$I_{ph(a,b,c)} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \sum_{j=1}^p i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t_j}, \quad (43)$$

де $p = T_1/\Delta t_j$; $T_1 = 20$ мс – період зміни першої основної гармоніки струму для робочої частоти мережі живлення, що дорівнює 50 Гц; Δt_j – інтервал дискретизації вихідної аналогової залежності $i_{ph}(t)$ фазного струму i_{ph} в часі t .

Принцип визначення середньоквадратичних значень $I_{1(a,b,c)}$ та $I_{5(a,b,c)}$ у фазних струмах $i_{ph(a,b,c)}(t)$ пояснюється діаграмами, поданими на рис. 18.

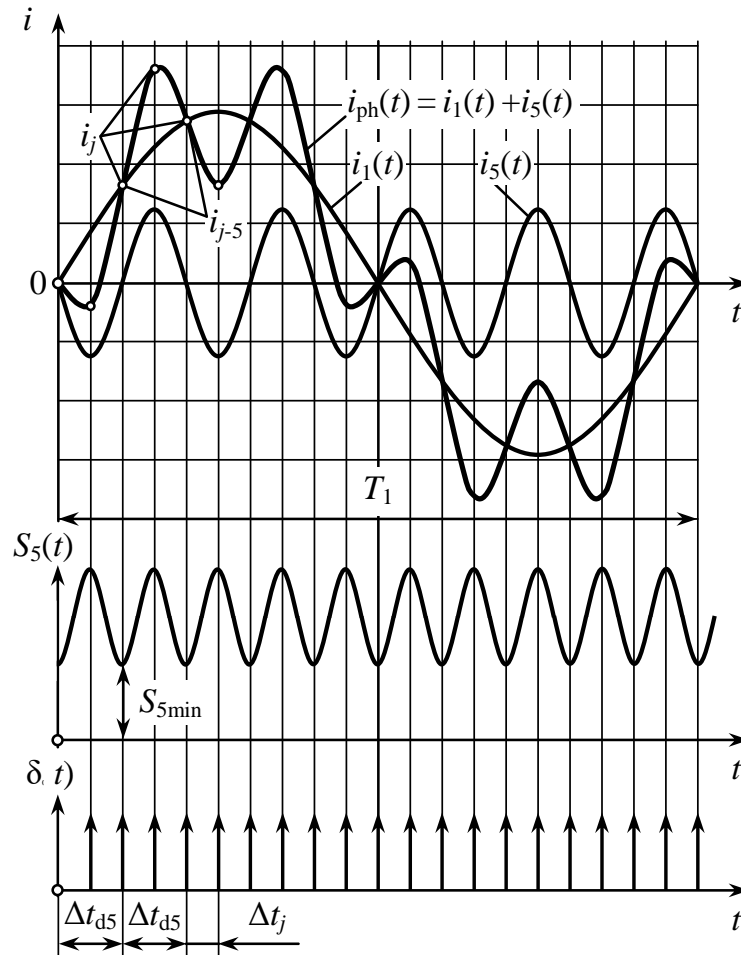


Рисунок 18 – Дискретизація фазного струму

У ковзному режимі дискретизації залежності $i_{ph}(t)$ з частотою $f_d = 1000$ Гц, через інтервал $\Delta t_j = 0,05T_{(1)}$, шляхом заміни використаного миттєвого значення i_j струму ліворуч вздовж осі t новим, розташованим праворуч вздовж осі t , здійснюється моніторинг суми S_5 квадратів дискретних значень i_{j-5} , що відповідають дискретизації залежності $i_{ph}(t)$ з частотою $f_{d5} = 2f_5$:

$$S_5 = \sum_{t=0}^{T_1} i_{j-5}^2 \quad (44)$$

Сума S_5 обчислюється за період $T_{(1)}$ зміни струму $i_1(t)$ першої гармоніки. З кожним кроком Δt_j струм $i_5(t)$ буде врахований по різному. Коли залежність $i_5(t)$ проходить через нуль, крива S_5 досягатиме значення S_{5min} (рис. 18), яке не містить дискретних значень i_{j5} 5-ї гармоніки. В середньоквадратичному значенні I_{ph-5} струму $i_{ph}(t)$, визначеному за величиною S_{5min} не буде струму $i_5(t)$.

Тоді, значення I_1 1-ї гармоніки струму:

$$I_1 = I_{ph-5} = \sqrt{S_{5min} \Delta t_j / T_1}, \quad (45)$$

$$I_5 = \sqrt{I_{ph}^2 - I_1^2}. \quad (46)$$

Для практичного застосування розробленого методу були розраховані значення коефіцієнта k_{d5} (36) в залежності від співвідношення I_5/I_1 .

Подані на рис. 19 залежності $k_{d5}(I_5/I_1)$ використовуються для коригування часу t_L спрацьовування пристроїв теплового захисту АД. Згідно залежності $t_L(I_{ph})$, що реалізується реле, за відсутності нелінійних спотворень деякому значенню I_{ph1} відповідає витримка часу спрацьовування захисту t_{L1} . Якщо фазний струм несинусоїдальний, то значення I_{ph1} необхідно помножити на коефіцієнт $\sqrt{1 + k_{st}^2 k_{d5}^2}$ (42). В результаті отримуємо еквівалентне значення струму I'_{ph1} , яке за своїм тепловим впливом на обмотки АД буде еквівалентним дії струму 1-ї гармоніки. Відтак витримка часу спрацьовування захисту зменшиться.

Розроблений метод враховує додаткове нагрівання обмоток, спричинене наявністю в фазних струмах $i_{ph(a,b,c)}(t)$ крім першої основної більш високої п'ятої гармонійної складової.

При цьому застосовується спрощений математичний апарат визначення середньоквадратичних значень струмів, який широко використовувався для побудови інших видів максимальних струмових захистів розглянутих раніше.

У додатках наведені акти впровадження результатів проведених досліджень, а також список публікацій здобувача за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

Результатом дисертаційної роботи є подальший розвиток теорії електромагнітних перехідних процесів в електротехнічних комплексах і системах низької напруги при несиметричних режимах роботи розподільних мереж електропостачання, а саме розробка системного комплексу наукових методів застосування цифрових технологій для вдосконалення захисних характеристик апаратів РЗ та ПА електричних мереж електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ.

Отримані наступні теоретичні та практичні положення:

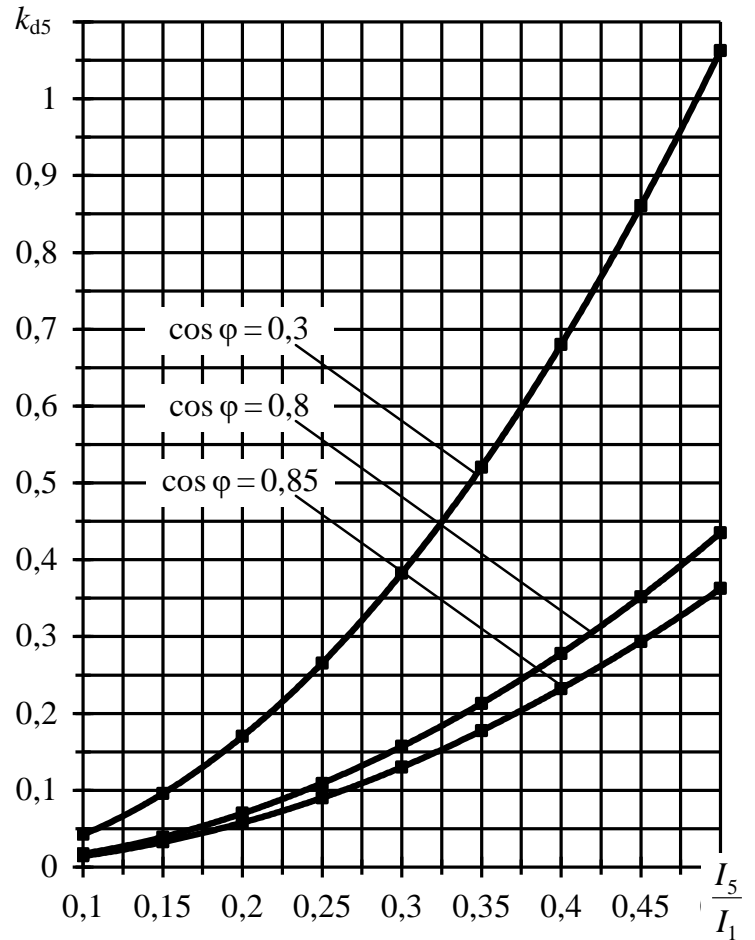


Рисунок 19 – Залежності коефіцієнту k_{d5} від співвідношення I_5/I_1

1. В результаті аналізу існуючих проблем, пов'язаних з координацією з надструму апаратів МСЗ розподільних мереж електропостачання електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ, а саме проблем, пов'язаних із забезпеченням віддаленого резервування (ВР) відмов власних апаратів релейного захисту віддалених приєднань, було з'ясовано, що:
 - знизити поріг чутливості апаратів МСЗ до струмів віддалених КЗ і забезпечити пов'язаний із цим режим ВР відмов власних захистів віддалених приєднань заважають пускові струми АД, підключених на початку ЛЕП;
 - існуючі методи та засоби відокремлення пускових струмів АД від струмів віддалених КЗ мають недоліки, пов'язані з недостатньою швидкістю визначення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ електричного кола в момент виникнення надструму та сталого середньоквадратичного значення цього надструму;
 - існуючий східчасто-часовий принцип селективного захисту багаторівневої мережі розподілу електроенергії призводить до надмірних термічних та динамічних впливів струмів КЗ на верхніх рівнях захисту в режимі ВР.
2. В результаті аналізу існуючих проблем, пов'язаних із захистом однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, спричинених обривом N -провідника в електричних мережах електротехнічних комплексів з розподіленням вздовж ЛЕП нелінійним навантаженням, було з'ясовано, що:
 - забезпечити ефективне діагностування обриву N -провідника в будь-якому місці розгалуженої РЕМ з розподіленням вздовж ЛЕП електричним навантаженням заважають нелінійні електричні навантаження, які призводять до нелінійних спотворень синусоїдальної форми фазних струмів і, як наслідок, к появі вищих гармонійних складових струму;
 - наявність вищих гармонійних складових у фазних струмах заважає забезпечити селективний захист РЕМ при однофазних КЗ на N -провідник та захист самого N -провідника від перевантаження третьою гармонією;
 - існуючі методи гармонійного аналізу з використанням дискретного перетворювання Фур'є потребують надмірного математичного ресурсу для реалізації їх в алгоритмах керування існуючими пристроями РЗ та ПА.
3. Аналіз існуючих проблем, пов'язаних з удосконаленням алгоритмів теплового захисту електромеханічних перетворювачів, довів, що:
 - існуючі алгоритми теплового захисту АД при перевантаженнях в повторно-короткочасному режимі роботи мають недоліки, пов'язані з недоотриманням достовірної інформації щодо температури обмоток статора не обладнаних тепловими датчиками термісторами, тому наявні пристрої теплового захисту АД не завжди ефективно обмежують надмірний тепловий вплив надструмів;
 - наявність вищих гармонійних складових у фазних струмах заважає забезпечити ефективний тепловий захист АД в тривалому режимі роботи, оскільки поява струмів p 'ятої гармоніки призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток статора.

4. Розроблений комплекс методів визначення коефіцієнта потужності електричного кола в перехідному режимі виникнення надструму для формування критерію ідентифікації виду надструму з метою захисту ЛЕП від струмів віддалених КЗ, а також для забезпечення ВР відмов власних апаратів МСЗ віддалених приєднань, а саме:
- теоретично обґрунтована доцільність застосування методів ЦОС отриманих від датчиків струму для формування комплексних критеріїв ідентифікації аварійних режимів роботи електричної мережі за ступенем спотворень середньоквадратичних значень фазних струмів в перехідному режимі, що дозволило знизити поріг чутливості апаратів МСЗ до рівня струмів віддалених КЗ, значення яких менші за пускові струми АД, підключених на початку ЛЕП;
 - синтезовані алгоритми ідентифікації виду надструму, зокрема пускових струмів АД, за час, що не перевищує одного періоду зміни фазної електрорушійної сили після виникнення збурення електричного кола, які дозволили забезпечити режим ВР відмов власних апаратів МСЗ віддалених приєднань.
5. Розроблений спрощений метод аналізу гармонійного складу фазних струмів за наявності нелінійних електричних навантажень і, як наслідок, зі спотворенням синусоїдальної форми фазних струмів, який дозволив розширити перелік діагностованих аварійних режимів РЕМ електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ, а саме метод розкладання сигналів, що являють собою складні коливання, на гармонійні складові, шляхом їх дискретизації множенням на ґратчасті дельта-функції з різними інтервалами дискретизації, зокрема з частотою меншою за подвоєну частоту Найквіста, що дозволило прискорити аналіз гармонійного спектру фазних струмів і струму в N -провіднику;
6. Розроблений метод аналізу середньоквадратичних значень фазних струмів несинусоїдальної форми, який дозволив без залучення аналізу їх гармонійного складу сформувавши критерій швидкої ідентифікації аварійних режимів N -провідника РЕМ електротехнічних комплексів напругою 0,4 кВ з метою захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг спричинених обривом N -провідника, а саме:
- метод ковзного моніторингу величини середньоквадратичного значення струму обчисленого шляхом інтегрування квадратів його дискретних значень, який дозволив діагностувати обрив N -провідника в будь-якому місці розгалуженої мережі електропостачання з розподіленням вздовж ЛЕП як лінійним, так і нелінійним навантаженням без залучення гармонійного аналізу спектру фазних струмів та сформувавши критерії спрацювання пристроїв захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг спричинених обривом N -провідника, а також вдосконалити алгоритм захисту N -провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних КЗ за рахунок врахування гармонійного спектру струму в N -провідника шляхом вибіркового врахування третьої гармонійної складової струму вибором відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності;

- синтезовані алгоритми функціонування мікроконтролерних розчіплювачів автоматичних вимикачів при обриві N -провідника в будь-якому місці розгалуженої мережі з розподіленим вздовж лінії електропередачі навантаженням, в яких за наявності нелінійних навантажень формування критерію спрацьовування захисту здійснюється за рахунок широко використовуваного в пристроях РЗ та ПА математичного апарату інтегрування квадратів миттєвих значень фазних струмів без залучення аналізу їх гармонійного складу;
 - синтезований алгоритм функціонування мікроконтролерних розчіплювачів автоматичних вимикачів при захисті N -провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань, який базується на ковзному моніторингу середньоквадратичного значення струму в N -провідника в режимі, коли цілеспрямовано вносяться спотворення в обчислення його середньоквадратичного значення шляхом вибору відповідної частоти дискретизації вихідної аналогової залежності, що дозволило не враховувати величину струму третьої гармоніки при побудові захисту від однофазних коротких замикань і враховувати при реалізації захисту від перевантажень і забезпечити повну селективність захистів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ з глухим заземленням нейтралі як з лінійними, так і з нелійними навантаженнями без залучення гармонійного аналізу спектра струму в нейтральному провіднику.
7. Розроблені методи діагностування теплового стану АД шляхом безпосереднього контролю над температурою обмоток статора в момент пуску, а саме:
- методи діагностування теплового стану АД, що працюють в повторно-короткочасному режимі роботи, засновані на аналізі впливу зміни активного опору обмоток статора при зміні їх температури на нерівномірність екстремальних значень миттєвої та квазімиттєвої потужностей, що споживає електродвигун при пуску;
 - синтезовані алгоритми діагностування теплового стану асинхронних електродвигунів в перехідному режимі пуску шляхом безпосереднього контролю над температурою обмотки статора за зміною її активного опору при нагріванні, суть якого полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої та квазімиттєвої потужностей, що споживаються в режимі виникнення пускового струму.
8. Розроблений метод теплового захисту АД в умовах нелінійних спотворень синусоїдальної форми фазних струмів, який забезпечує зниження порогу чутливості теплового захисту електродвигунів при струмах перевантаження за рахунок врахування впливу вищих гармонійних складових у фазних струмах, а саме струму п'ятої гармоніки, яка призводить до додаткових втрат і нагріванню обмоток статора.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Быстродействующая система защиты мощных тиристорных преобразователей на основе токоограничивающих автоматических выключателей / А. Ю. Бару, В. П. Богатырев, Ю. Л. Шинднес, А. Г. Серeda. *Електротехніка і електромеханіка*. 2002. № 2. С. 15-17. *Здобувачем розроблена конструкція розчіплювача автоматичного вимикача та виготовлений макет для експериментальних досліджень, а також встановлена залежність рівня струмів коротких замикань від кута керування тиристорним перетворювачем частоти.*

2. Серeda А. Г. Эффективное использование независимых расцепителей токоограничивающих автоматических выключателей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 3. С. 56-60.

3. Способность металлокерамических контактов токоограничивающих автоматических выключателей коммутировать предельные токи короткого замыкания / А. Г. Серeda. *Електротехніка і електромеханіка*. 2005. № 3. С. 45-47.

4. Повышение электрической изоляции межконтактного промежутка в быстродействующем автоматическом выключателе постоянного тока / В. В. Литвиненко, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2006. № 36. С. 65-68. *Здобувачем розроблена конструкція дугогасної системи автоматичного вимикача та виготовлений макет для експериментальних досліджень.*

5. Расчет поляризованной магнитной цепи выходного реле для полупроводникового расцепителя автоматического выключателя / А. Г. Серeda, Е. В. Фетюхина. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 3. С. 35-38. *Здобувачем розроблена математична модель.*

6. Усовершенствованная математическая модель индукционно-динамического привода автоматического выключателя / В. В. Литвиненко, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2008. № 40. С. 66-83. *Здобувачем розроблена математична модель індукційно-динамічного привоу з магнітною системою.*

7. Быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока высокого напряжения / В. С. Лупиков, А. Г. Серeda, В. В. Литвиненко. *Електротехніка і електромеханіка*. 2008. № 1. С. 25-29. *Здобувачем розроблена конструкція дугогасної системи автоматичного вимикача та виготовлений макет для експериментальних досліджень.*

8. Эффективное использование электродинамических усилий в контактных системах автоматических выключателей / Д. К. Монахов, О. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2009. № 44. С. 87-94. *Здобувачем розроблена математична модель електродинамічних зусиль в контактних системах автоматичних вимикачів.*

9. Швидкодіючий автоматичний вимикач постійного струму високої напруги : пат. 88512 Україна : МПК (2009) H01H 71/12. № а 2007 10518 ; заявл. 24.09.2007 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 31. *Здобувачем розроблена конструкція дугогасної системи автоматичного вимикача та виготовлений макет для експериментальних досліджень.*

10. Качественный анализ влияния ферромагнитного сердечника на величину силы индукционно-динамического привода / В. В. Литвиненко, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2010. № 29. С. 57-64. *Здобувачем розроблена конструкція, виготовлений макет та здійснені експериментальні дослідження.*

11. Экспериментальные исследования блока компенсации переменного магнитного поля для автоматического выключателя / Е. Г. Король, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda, Ю. Д. Рудас. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2011. № 4. С. 20-28. *Здобувачем розроблена конструкція та виготовлений макет для експериментальних досліджень.*

12. Компенсация вектора переменного магнитного момента электрооборудования с помощью электромагнита с составным ферромагнитным сердечником / Е. Г. Король, В. С. Лупиков, А. Г. Серeda, Ю. Д. Рудас. *Технічна електродинаміка.* 2011. № 4. С. 20-25. *Здобувачем розроблена конструкція та виготовлений макет для експериментальних досліджень.*

13. Тепловий розрахунок струмоведучої частини автоматичного вимикача / В. В. Литвиненко, А. Г. Серeda, Л. С. Козар, В. В. Моргун. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2012. № 28. С. 27-43. *Здобувачем розроблена математична модель процесу теплопередачі між струмопроводом автоматичного вимикача та навколишнім середовищем.*

14. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ / А. С. Кобозев, А. Г. Серeda, Л. Б. Жорняк, В. В. Моргун. *Електротехніка та електроенергетика.* 2012. № 2. С. 66-72. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

15. Повышение надежности защиты электрических сетей ОБЛЭНЕРГО 0,4 кВ за счет использования комплексных критериев срабатывания / А. С. Кобозев, А. Г. Серeda. *Світлотехніка та електроенергетика.* 2012. № 2 (30). С. 42-54. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

16. Визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік за дискретними значеннями безперервної залежності струму у часі / О. С. Кобозєв, О. Г. Серєда, В. В. Моргун. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 5. С. 21-26. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору частот дискретизації вихідної аналогової залежності в часі періодичного несинусоїдального струму.*

17. Повышение пожарной безопасности электроустановок собственных нужд напряжением 0,4 кВ атомных электростанций / А. Г. Серєда, Н. Г. Фонта, В. В. Моргун, С. А. Березанский. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2012. № 61 (967). С. 8-23. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

18. Технічний аналіз сучасних методів покращення захисних властивостей автоматичних вимикачів / О. Г. Серєда, І. С. Варшамова, В. В. Литвиненко, В. В. Моргун. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2013. № 15 (988). С. 61-92. *Здобувачем досліджені та проаналізовані сучасні методи максимального струмового захисту розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ та зроблені висновки щодо необхідності удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

19. Технічний огляд сучасних автоматичних вимикачів низької напруги на номінальний струм 250А / О. Г. Серєда, В. В. Литвиненко, І. С. Варшамова, В. В. Моргун. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2013. № 35 (1008). С. 3-23. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

20. Повышение уровня пожарной безопасности корабельных систем электроснабжения / А. Г. Серєда, И. С. Варшамова, В. В. Литвиненко. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2013. № 65 (1038). С. 37-52. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

21. Диагностирование аварийных режимов в разветвленной сети электроснабжения на основе анализа среднеквадратичного значения тока / А. Г. Серєда. *Научні известия на НТСМ*. 2013. № 2 (139). С. 414-419.

22. Расширение функциональных возможностей аппаратов релейной защиты на основе анализа действующего значения тока / А. Г. Серєда. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. № 3 (23). С. 75-82.

23. Серета А. Г. Дальнее резервирование отказов защит разветвленной сети электроснабжения с учетом пусковых токов асинхронных электродвигателей. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. № 5 (82). С. 16-21.

24. Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань : пат. 101084 Україна : МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. № а 2011 09057 ; заявл. 19.07.2011 ; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування. Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.*

25. Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених коротких замикань / О. Г. Серета, О. С. Кобозев. *Електротехнические и компьютерные системы*. 2013. № 09 (85). С. 57-64. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.*

26. Спосіб визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік шляхом множення залежностей струму від часу на гратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації : пат. 102741 Україна : МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. № а 2011 13048 ; заявл. 07.11.2011 ; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору частот дискретизації вихідної аналогової залежності в часі періодичного несинусоїдального струму.*

27. Покращення захисних властивостей протиаварійної автоматики суднових систем електропостачання / О. Г. Серета, І. С. Варшамова, Н. Г. Фонта. *Вісник НУК імені адмірала Макарова*. 2014. № 1 : веб-сайт. URL: <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/39874>. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

28. Sereda Oleksandr G. Identification of starting currents of induction motors in a branched power network and its protection from remote short circuit. *Acta Technica*. 2014. Vol. 59, № 2. С. 135-147. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.*

29. Серета О. Г. Захист розгалуженої мережі електропостачання з розподіленням навантаження від обриву нейтрального провідника. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2014. № 785. С. 66-73. URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPEEC_2014_785_13.pdf. (дата звернення 01.01.2021). *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору частот дискретизації вихідної аналогової залежності в часі періодичного несинусоїдального струму. Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів нейтрального провідника.*

30. Спосіб захисту від обриву нейтрального провідника в будь-якому місці електричної мережі з розподіленим вздовж лінії навантаженням : пат. 105560 Україна : МПК (2014.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. № а 2012 10691 ; заявл. 12.09.2012 ; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору частот дискретизації вихідної аналогової залежності в часі періодичного несинусоїдального струму. Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів нейтрального провідника.*

31. Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки : пат. 105141 Україна : МПК H02H 5/04 (2006.01), H02H 7/085 (2006.01). № а 201308219 ; заявл. 01.07.2013 ; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. *Здобувачем розроблена математична модель.*

32. Серeda O. Г. Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску. *Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету*. 2014. Вип. 2 (43). С. 100-110.

33. Спосіб захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску : пат. 105150 Україна : МПК H02H 5/04 (2006.01), H02H 7/085 (2006.01). № а 2013 10027 ; заявл. 12.08.2013 ; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. *Здобувачем розроблена математична модель.*

34. Спосіб захисту електродвигунів від струмів перевантаження : пат. 106030 Україна : МПК (2014.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/085 (2006.01), H01H 73/00. № а 2013 112986 ; заявл. 08.11.2013 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13. *Здобувачем розроблена математична модель.*

35. Підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок використання комплексних критеріїв спрацьовування захисних апаратів / І. С. Варшамова, О. Г. Серeda, Н. Г. Фонта. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2015. № 13 (1122). С. 3-19. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.*

36. Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску / О. Г. Серeda, А. О. Прохоренко. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 5. С. 69-76. *Здобувачем розроблена математична модель.*

37. Построение новых защит на основе анализа характера изменения суммарной мгновенной мощности при возмущении электрической цепи / В. Е. Райнин, А. С. Кобозев, А. Г. Серeda. *Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал*. 2015. № 4. С. 2-4. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.*

38. Середя О. Г. Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 2. С. 90-96.

39. Захист асинхронних електродвигунів побутових приладів від струмів перевантаження з урахуванням нелінійних спотворень фазного струму / О. Г. Середя, І. С. Варшамова. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 3. С. 14-19. *Здобувачем розроблена математична модель.*

40. Спосіб максимального струмового захисту з вибірковою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань та пускових струмів асинхронних електродвигунів : пат. 114380 Україна : МПК (2017.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/02 (2006.01). № а 2016 05401 ; заявл. 18.05.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. *Здобувачем запропоновані шляхи удосконалення захисних характеристик пристроїв релейного захисту в частині забезпечення віддаленого резервування відмов апаратів протиаварійного керування.*

41. Спосіб захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань в електричних мережах з нелінійними видами навантажень : пат. 113596 Україна : МПК (2016.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, H02H 7/10 (2006.01), H02H 3/16 (2006.01), H02M 1/32 (2007.01), G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 00564 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору частот дискретизації вихідної аналогової залежності в часі періодичного несинусоїдального струму. Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів нейтрального провідника.*

42. Monitoring thermal state of induction motors through the winding direct temperature control during the start / Oleksandr G. Sereda, Victoriia Lytvynenko, Iryna Varshamova. *Acta Technica*. 2018. Vol. 63, iss. 3. P. 433-446. *Здобувачем розроблена математична модель.*

43. Спосіб захисту електричної мережі з розподіленим навантаженням від обриву нейтрального провідника з урахуванням нелінійних спотворень фазних струмів : пат. 119874 Україна : МПК (2019.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 3/13 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, G01R 31/02 (2006.01). № а 2016 13655 ; заявл. 30.12.2016 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. *Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору частот дискретизації вихідної аналогової залежності в часі періодичного несинусоїдального струму. Здобувачу належить теоретичне обґрунтування вибору складових комплексних критеріїв діагностування аварійних режимів нейтрального провідника.*

44. Спосіб захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника : пат. 122365 Україна : МПК (2020.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, H02H 7/26 (2006.01). № а 2018 12180 ; заявл. 10.12.2018 ; опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20. *Здобувачем розроблена математична модель.*

АНОТАЦІЇ

Серета О. Г. Теоретичні основи розвитку цифрових технологій в системах автоматизації, діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів.
На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертація присвячена розвитку теорії електромагнітних перехідних процесів в електротехнічних комплексах і системах низької напруги при несиметричних режимах роботи розподільних мереж електропостачання, а саме розробці теоретично обґрунтованого системного комплексу наукових методів застосування цифрових технологій для вдосконалення захисних характеристик апаратів релейного захисту та протиаварійної автоматики електричних мереж напругою 0,4 кВ.

Теоретично обґрунтована та доведена доцільність розкладання сигналів, що являють собою складні коливання, на гармонійні складові, шляхом їх дискретизації множенням на гратчасту дельта-функцію з частотою меншою за подвоєну частоту Найквіста, що дало можливість розширити перелік діагностованих аварійних режимів роботи розподільних мереж електропостачання напругою 0,4 кВ.

Здобули подальший розвиток методи цифрової обробки аналогових сигналів шляхом їх множення на гратчасті дельта-функції з різними інтервалами дискретизації, що дозволило прискорити аналіз гармонійного спектру фазних струмів і струму в нейтральному провіднику за наявності нелінійних спотворень їх синусоїдальної форми внаслідок присутності нелінійних навантажень.

Теоретично обґрунтована доцільність застосування методів цифрової обробки сигналів отриманих від датчиків струму для формування комплексних критеріїв спрацьовування апаратів максимальних струмових захистів при міжфазних коротких замиканнях з метою ідентифікації аварійних режимів роботи електричної мережі за ступенем спотворень середньоквадратичних значень фазних струмів.

Встановлені процедури цифрової обробки отриманих від датчиків струму сигналів з метою вилучення інформації про такі параметри електричного кола, як коефіцієнт потужності й гармонійний спектр фазних струмів, виходячи з аналізу спотворених під впливом нелінійних навантажень й аперіодичної складової їх середньоквадратичних значень, обчислених в перехідному режимі зміни струму.

Науково обґрунтована та доведена доцільність формування критерію спрацьовування захисту нейтрального провідника від струмів перевантаження та струмів однофазних коротких замикань без залучення гармонійного аналізу спектру несинусоїдального струму.

Ключові слова: розподільна мережа електропостачання, релейний захист, максимальний струмовий захист, цифрова обробка сигналів, коефіцієнт потужності, віддалене коротке замикання, віддалене резервування відмов захистів, нелінійні спотворення, гармонійний спектр несинусоїдального сигналу, асинхронний електродвигун, середньоквадратичне значення струму, дискретизація аналогового сигналу, частота дискретизації, інтервал квантування, мікроконтролерний блок керування, автоматичний вимикач, напівпровідниковий розчіплювач.

Серда А. Г. Теоретические основы развития цифровых технологий в системах автоматизации, диагностики, контроля и защиты электротехнических комплексов. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

Диссертация посвящена развитию теории электромагнитных переходных процессов в электротехнических комплексах и системах низкого напряжения при несимметричных режимах работы распределительных сетей электроснабжения, а именно разработке теоретически обоснованного системного комплекса научных методов применения цифровых технологий для совершенствования защитных характеристик аппаратов релейной защиты и противоаварийной автоматики электрических сетей напряжением 0,4 кВ.

Теоретически обоснована и доказана целесообразность разложения сигналов, представляющих собой сложные колебания, на гармонические составляющие, путем их дискретизации умножением на решетчатую дельта-функцию с частотой меньшей удвоенной частоты Найквиста, что позволило расширить перечень диагностируемых аварийных режимов работы сетей электроснабжения напряжением 0,4 кВ.

Получили дальнейшее развитие методы цифровой обработки аналоговых сигналов путем их умножения на решетчатые дельта-функции с разными интервалами дискретизации, что позволило ускорить анализ гармоничного спектра фазных токов и тока в нейтральном проводнике при наличии нелинейных искажений их синусоидальной формы вследствие присутствия нелинейных нагрузок.

Теоретически обоснована целесообразность применения методов цифровой обработки сигналов полученных от датчиков тока для формирования комплексных критериев срабатывания аппаратов максимальных токовых защит при междофазных коротких замыканиях с целью идентификации аварийных режимов работы электрической сети по степени искажений среднеквадратических значений фазных токов.

Установлены процедуры цифровой обработки полученных от датчиков тока сигналов с целью извлечения информации о таких параметрах электрической цепи, как коэффициент мощности и гармоничный спектр фазных токов, исходя из анализа искаженных под влиянием нелинейных нагрузок и апериодической составляющей их среднеквадратических значений, рассчитанных в переходном режиме изменения тока.

Научно доказана целесообразность формирования критерия срабатывания защиты нейтрального проводника от токов перегрузки и токов однофазных коротких замыканий без привлечения гармонического анализа спектра несинусоидального тока.

Ключевые слова: распределительная сеть электроснабжения, релейная защита, максимальная токовая защита, цифровая обработка сигналов, коэффициент мощности, удаленное короткое замыкание, дальнейшее резервирование отказов защит, нелинейные искажения, гармонический спектр несинусоидального сигнала, асинхронный электродвигатель, среднеквадратичного значение тока, дискретизация аналогового сигнала, частота дискретизации, интервал квантования, микроконтроллерной блок управления, автоматический выключатель, полупроводниковый расцепитель.

Sereda O. H. Theoretical bases of development of digital technologies in systems of automation, diagnostics, control and protection of electrotechnical complexes.
On the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of the scientific degree of the Doctor of Technical Sciences on specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2021.

The Dissertation is devoted to the development of the theory of electromagnetic transients in electrotechnical complexes and low voltage systems with asymmetric modes of operation of power distribution networks, namely the development of a theoretically sound system of scientific methods and research approaches to digital technologies application to improve the protective characteristics of relay protection devices and emergency automation of electrical networks with voltage of 0.4 kV.

Expediency of decomposition of signals representing complex oscillations into harmonic components by their discretization by multiplication by a lattice delta function with frequency less than twice the Nyquist frequency is theoretically substantiated and proved, which made it possible to expand the list of diagnosed emergency modes of distribution networks with voltage of 0.4 kV of trunk configuration.

The theory of digital processing of analog signals by multiplying them by lattice delta functions with different discretization intervals is further developed, which allowed to accelerate the analysis of the harmonic spectrum of phase currents and currents in a neutral conductor in the presence of nonlinear distortions of their sinusoidal shape due to different load characteristics.

The expediency of application of methods of digital processing of signals received from current sensors for formation of complex criteria of operation of the maximum current protections at interphase short circuits for the purpose of identification of emergency modes of operation of an electric network on degree of distortions of average square phase current values during transient mode is theoretically substantiated which allowed to reduce the sensitivity threshold of the maximum current protection to the level of currents of short circuits, the values of which are less than the starting currents of induction motors connected at the beginning of the power line.

Procedures for digital processing of signals received from current sensors are established in order to extract information about such parameters of electric circuit as power factor and harmonic spectrum of phase currents, based on analysis of distorted under the influence of nonlinear loads and aperiodic component of rms values calculated in transient mode which does not exceed one period of change of phase electromotive force.

Expediency of formation of criterion of operation of protection of neutral conductor against overload currents and currents of single-phase short circuits without involvement of harmonic analysis of spectrum of non-sinusoidal current, when purposeful distortion of rms value by selecting the appropriate discretization frequency of the output analog dependence allows not to take into account the value of the current of the third harmonic when constructing protection against single-phase short circuits and to take into account when constructing overcurrent protection. Is scientifically substantiated and proved

Taking into account the development of the existing methodology in the field of digital signal processing theory, a set of scientific methods and research approaches to solving the topical scientific and applied problem of improving the protective characteristics of maximum current protection devices is developed, namely:

- methods for determining the power factor of an electric circuit in the transient mode of overcurrent occurrence for the formation of a complex criterion for identifying the type of perturbation: remote short-circuit current or starting current of an induction motor;
- a method of analysis of the harmonic composition of phase currents of non-sinusoidal shape for rapid identification of emergency modes of operation of power distribution networks in the presence of nonlinear loads;
- a method of sliding monitoring of the rms value of current by applying a mathematical apparatus for integrating the squares of its instantaneous values obtained with determined discretization frequency of the output analog current dependence in time, which allowed: to diagnose the violation of integrity of the neutral conductor at any place of the branch power transmission network with both linear and nonlinear loads without involving harmonic analysis of the phase current spectrum and to form criteria for operation of devices for protection of single-phase electricity consumers from overvoltages caused by a break in a neutral conductor; to improve the algorithm of protection of neutral conductor from overload currents and currents of single-phase short circuits by taking into account the harmonic current spectrum in the neutral conductor, which allowed in power supply networks with different load characteristics to take into account the third harmonic component of current selectively by selecting the appropriate discretization frequency of the input analog time dependence;
- methods for diagnosing the thermal state of induction motors operating in repeated short-term operation mode by direct control of the temperature of the stator windings at start-up, based on the analysis of the effect of changes in active resistance of the stator winding when changing its temperature on the non-uniform extreme values of instantaneous power consumption of the electric motor at start-up;
- a method of thermal protection of induction motors at nonlinear distortions of sinusoidal shape of phase currents, which reduces the reduction of the sensitivity threshold of thermal protection of induction motors at overload currents by taking into account the influence of higher harmonic components in phase currents, namely the current of the fifth harmonic leading to additional losses and heating of the stator windings.

Algorithms for digital processing of analog signals received from current sensors to ensure the operation of microcontroller control units for relay protection devices and emergency automation are developed, namely:

- algorithms for rapid identification of the type of overcurrent, in particular starting currents of induction motors, for a time not exceeding one period of change of phase electromotive force after arising of perturbation of the electric circuit, which reduced the sensitivity threshold of maximum current protection devices to the level of currents of remote short-circuits and to provide the mode of remote redundancy of failures of protections;

- algorithms of circuit breakers microcontroller releases operation in case of neutral conductor break in any place of branched network with load distributed along the power line, in which in the presence of nonlinear loads the formation of protection criterion is carried out due to widely used in relay protection and emergency automation devices mathematical operations of integration of squares of instantaneous values of phase currents without involvement of the analysis of their harmonic structure;
- an algorithm of circuit breakers microcontroller releases operation in protection of neutral conductor from overload currents and single-phase short-circuit currents, which is based on sliding monitoring of rms value of current in neutral conductor in mode when purposefully distortions are introduced in calculating the rms value of the current by selecting the appropriate discretization frequency of the input analog dependence which allowed not to take into account the value of the current of the third harmonic in the construction of protection against single-phase short circuits and to take into account at the implementation of overload protection to ensure full selectivity of protection of distribution networks of 0.4 kV with deaf neutral grounding with both linear and nonlinear loads without the involvement of harmonic analysis of the current spectrum in a neutral conductor;
- algorithms for diagnosing the thermal state of induction electric motors in the transient start-up mode by directly controlling the temperature of the stator winding by changing its active resistance when heated, the essence of which is to analyze the non-uniformity of extreme values of instantaneous and quasi-instantaneous power consumption in the mode of occurrence of starting current;
- an algorithm of operation of the relay of thermal protection of induction motors taking into account the higher harmonic components in phase currents, namely the current of the fifth harmonic, which leads to additional losses and heating of the stator windings.

Key words: power supply distribution network, relay protection, maximum current protection, digital signal processing, power factor, remote short circuit, remote redundancy of protection failures, nonlinear distortions, harmonic spectrum of non-sinusoidal signal, induction electric motor, rms current value, analog signal discretization, discretization frequency, quantization interval, microcontroller control unit, circuit breaker, semiconductor release.



Підписано до друку 24.03.2021.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 2,7.
Наклад 100 прим. Замовлення №

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18
Тел.: (057) 756-53-25
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua