

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ГАПОН ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.316.726

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
АВТОМАТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ
ЕНЕРГОСИСТЕМИ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ**

Спеціальність 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Качанов Петро Олексійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматики та управління в
технічних системах

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Борисенко Анатолій Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри теоретичних основ електротехніки

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
Цеховський Максим Володимирович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
доцент кафедри авіаційних приладів та вимірювань

Захист відбудеться 22 листопада 2012 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.14 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «_____» жовтня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к.т.н. доц.



Ліберг І.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Частотні аварії в енергосистемах за складністю ліквідації та величиною економічного збитку є одними з найбільш серйозних. Одним з основних видів автоматики, призначених для ліквідації аварій, є автоматичне частотне розвантаження. Питання обсягів потужностей, що відключаються, і вибору уставок черг частотного розвантаження можуть вирішуватися тільки на рівні всієї енергосистеми або значної її частини, в той час як швидкодія визначається, в першу чергу, конкретними математичними і апаратними комп'ютерними засобами, що реалізують алгоритм автоматичного відключення.

На даному етапі основна проблема для подальшого підвищення швидкодії пристроїв автоматичного частотного розвантаження полягає не стільки в швидких цифрових методах вимірювання частоти, скільки в надійному алгоритмі виключення помилкових спрацьовувань, які можуть виникати внаслідок різних спотворень електричних сигналів, по яких проводиться вимірювання параметрів енергосистеми. Також можливі ситуації, що супроводжуються частотними перехідними процесами, але не потребують роботи частотного розвантаження.

В існуючих пристроях завдання виключення помилкових спрацьовувань вирішується за рахунок значної витримки часу, що не дозволяє в повній мірі виконати розвантаження при виникненні короточасних провалів вимірної частоти, які можуть бути викликані як помилкою виміру, так і дійсним зниженням частоти основної гармоніки напруги. Існуючі цифрові методи вимірювання частоти здатні коректно працювати тільки при наявності частини із можливих видів спотворень або розраховані на глибоку попередню фільтрацію вхідного сигналу, що призводить до зниження швидкодії та неправильної роботи в деяких випадках. Витримка часу дозволяє значно знизити вірогідність помилкових спрацьовувань, проте призводить до зниження швидкодії, що, найчастіше, і виявляється фатальним фактором при швидкоплинних аваріях з великим дефіцитом потужності. Таким чином, розробка перспективних алгоритмів виконання частотного розвантаження, які використовують переваги сучасної комп'ютерної техніки, і методів виділення аварійних ситуацій, заснованих на більш ефективних цифрових методах вимірювання частоти і інших параметрів вхідних сигналів, є актуальним завданням, яке визначило напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота була виконана на кафедрі автоматизації енергосистем НТУ «ХПІ» у рамках завдань держбюджетних НДР МОН України «Розробка принципів виконання та впровадження в промисловість мікропроцесорного пристрою автоматичного частотного розвантаження» (ДР № 0100U001699) та «Дослідження, розробка і впровадження в промисловість мікропроцесорного реле активної потужності» (ДР № 0102V000970) в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* - розробка методів і комп'ютерних апаратних засобів автоматичного частотного розвантаження здатного швидко реагувати і надійно функціонувати за наявності спотворень вхідного сигналу, характерних для різних об'єктів енергетичних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих технічних рішень, визначити сучасні тенденції розвитку системи і пристроїв автоматичного частотного розвантаження та шляхи підвищення швидкодії системи частотного розвантаження в аварійних режимах, розробити функцію керування, яка дозволяє досягти максимальної швидкодії системи частотного розвантаження при мінімумі споживачів що відключаються;

- визначити шляхи підвищення швидкодії пристроїв автоматичного частотного розвантаження під час ліквідації частотних аварій;

- визначити основні види процесів і факторів, що викликають відхилення форми струму і напруги від синусоїдальної, визначити характерні види спотворень форми струму і напруги та дослідити реакцію різних методів вимірювання частоти на вхідний сигнал, у складі якого присутні спотворення;

- розробити цифровий алгоритм вимірювання частоти і швидкості її зміни, що задовольняє вимогам високої точності, швидкодії і стійкості до перешкод;

- визначити тривалість спостереження при вимірюванні частоти оптимальну з точки зору швидкодії, завадостійкості та точності вимірювання частоти;

- розробити методи, що дозволяють виключити можливість хибної роботи пристрою при наявності спотворень, які перевищують максимально допустимі значення.

Об'єкт дослідження - процес виконання автоматичного частотного розвантаження енергосистеми при виникненні аварійних ситуацій, які супроводжуються перехідними процесами по частоті.

Предмет дослідження - методи і засоби підвищення якості функціонування автоматичного частотного розвантаження.

Методи дослідження. При проведенні досліджень застосовувалися методи теорії цифрової обробки сигналів, теорії вимірювання, математичної статистики і алгебри логіки. Функцію спрацьовування розвантаження розроблено за допомогою методів оптимального керування, та за допомогою генетичних алгоритмів. Під час досліджень швидкодії та перешкодозахищеності методів вимірювання частоти застосовані методи спектрального аналізу за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Розроблені методи вимірювання частоти використовують методи найменших квадратів, Зейделя, Ньютона-Рафсона та розкладання в ряд Тейлора. Теорію вимірювання та методи статистичної обробки результатів вимірювань застосовано при обґрунтуванні оптимального числа рівнів за якими виконується вимірювання частоти, методи синтезу цифрових фільтрів - при проведенні досліджень ефективності попередньої фільтрації. Для перевірки працездатності запропонованих алгоритмів та рішень застосовувалися методи математичного моделювання процесів розвантаження енергосистеми та експериментальні дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано метод виконання уставок пристроїв автоматичного частотного розвантаження у вигляді лінійної комбінації частоти та її похідної для отримання оптимального результату за швидкодією та об'ємом споживачів, що відключаються;
- вперше запропоновано алгоритм функціонування автоматичного частотного розвантаження, що враховує сукупність значень частоти, швидкості її зміни та рівню спотворень вхідного сигналу, що дозволяє виключити помилкові спрацьовування пристрою у аварійних ситуаціях без застосування витримки часу;
- вперше запропоновано цифровий метод вимірювання частоти, заснований на вимірюванні періодів по множині перетинів заданих рівнів вхідним сигналом з подальшою лінійною апроксимацією зміни частоти за часом методом найменших квадратів, що дозволяє вимірювати значення частоти, швидкість її зміни, а також розрахувати оцінку рівня спотворень вхідного сигналу;
- обґрунтований вибір кількості рівнів для методу вимірювання частоти по множинним перетинам заданих рівнів для отримання максимальної точності вимірювання;
- отримав подальший розвиток цифровий метод вимірювання частоти, на базі методу найменших квадратів, що дозволяє вимірювати значення частоти, швидкість її зміни і рівень спотворень вхідного сигналу, на основі якого може бути знайдена інтервальна оцінка для отриманих значень;
- запропоновано методу побудови інтервальних оцінок частоти та швидкості її зміни в залежності від рівню спотворень вхідного сигналу;
- розраховано оптимальний за швидкодією цифровий фільтр що дозволяє підвищити точність вимірювання частоти та швидкості її зміни.

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетики полягає в розробці системи конструктивних рішень, що можуть бути використані при модернізації існуючих систем автоматичного розвантаження та створенні перспективних пристроїв протиаварійної автоматики. Запропоновані наступні удосконалення:

- функція спрацьовування пристрою частотного розвантаження, яка дозволяє отримати оптимальний за часом та об'ємом споживачів, що відключаються, перехідний процес ліквідації частотної аварії;
- алгоритми зміни часу спостереження під час виконання вимірювань частоти та інших параметрів сигналу, які дозволяють отримати оптимальне співвідношення точності та швидкодії;
- методи вимірювання частоти, швидкості її зміни і рівня спотворень вхідного сигналу, які мають покращене співвідношення швидкодії, точності та перешкодозахищеності;
- способи виключення помилкових спрацьовувань частотного розвантаження при виникненні перехідних процесів в енергосистемі, які не пов'язані зі зміною частоти.

Запропоновані в роботі алгоритми використані при розробці пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматики. Наукові результати, отримані під час виконання дисертаційної роботи використані при модернізації системи визначення якості електричної енергії на шинах підстанції 330 кВ «Котовська» ДП НЕК «Укренерго» (Київ), а також були впроваджені в навчальний процес на кафедрі автоматизації енергосистем НТУ «ХП» при підготовці лабораторного практикуму для студентів за спеціальністю 7.05070106 «Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові і практичні результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: дослідження сучасних методів та алгоритмів автоматичного частотного розвантаження, дослідження сучасних методів вимірювання промислової частоти, розробка нових методів та алгоритмів, обґрунтування планів і програм експериментів, виконання досліджень, обробка та узагальнення результатів, участь у впровадженні. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень були представлені та обговорені на: I обласній конференції молодих вчених «Тобі Харківщино - пошук молодих» (Харків 2002); X, XI, XII, XIII, XIV та XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2012).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 9 наукових публікаціях, з них: 7 статей у наукових фахових виданнях України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 192 сторінок; з них 31 рисунок по тексту; 36 рисунків на 20 окремих сторінках; 9 таблиць по тексту; 1 таблиця на 1 сторінці; списку використаних джерел з 96 найменувань на 11 сторінках, 4 додатків на 34 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної інформації щодо сучасного стану автоматики частотного розвантаження в енергосистемах. Проаналізовано стан енергосистеми під час аварій, які супроводжуються значним небалансом активної потужності. Відповідно до даної моделі закон зміни частоти в часі, при виникненні перехідного процесу, найбільш близький до експоненціального, причому стала часу для більшості енергосистем лежить в

діапазоні 5-8 с. Початкова швидкість зміни частоти залежить від величини дефіциту та складає приблизно 0,4 Гц/с на кожні 10% значення небалансу.

Проаналізовано принципи побудови системи автоматичного частотного розвантаження та виявлено головні проблеми, які потребують рішення. Серед них найбільш важливою є недостатня швидкодія, що не дозволяє автоматично ефективно ліквідувати найбільш тяжкі аварії.

Сучасна автоматика енергосистем в переважній більшості будується на базі мікропроцесорних пристроїв завдяки чому можливе використання складного математичного апарату. Це обумовлює велику кількість розробок цифрових методів вимірювання частоти за останні роки. Кожний з них має певні переваги та недоліки, але жоден не відповідає висунутим вимогам у повному обсязі.

Для зменшення витримки часу перспективно розробити критерії, які б дозволили надійно відрізнити частотний перехідний процес від інших можливих подій, котрі впливають на форму сигналу напруги промислової мережі. Скорочення часу спостереження за умови збереження високої точності вимірювання частоти потребує розробки більш точних методів вимірювання частоти.

У **другому розділі** здійснюється вибір напрямів вдосконалення системи і мікропроцесорних пристроїв автоматичного частотного розвантаження. Розроблена модель багатомашинної енергосистеми, яка показує, що при наявності коливань навантаження частота обертання роторів генераторів не буде однаковою. В залежності від величин сталих часу і параметрів електричного зв'язку між елементами енергосистеми в системі будуть присутні безперервні невеликі коливання частоти. В цьому випадку напруги і струми в кожній точці енергосистеми будуть визначатися електричної близькістю цієї точки до генеруючих потужностей, і, в загальному випадку, напруга може складатися з декількох складових, які мають малі відхилення по частоті. Виміряти частоти всіх генераторів, що впливають на значення напруги в будь-якій досить віддаленій від них точці, не представляється можливим. У той же час різниця частот між генераторами на практиці не перевищує часток герц. Характер перехідного процесу, отриманого за допомогою моделі, говорить про те, що метод вимірювання промислової частоти, застосований в пристроях частотного розвантаження, повинен враховувати той факт, що сигнал напруги під час перехідного процесу не є стаціонарним, а також може містити вищі гармоніки і аперіодичну складову.

Для визначення шляхів підвищення швидкодії частотного розвантаження розглянуто процес спрацювання пристрою АЧР при аварійному зниженні частоти (рис. 1).

Повний час, який проходить між моментом, коли частота в системі набуває значення, що дорівнює частоті уставки $f_{уст}$ і моментом відключення вимикача, коли частота має значення $f_{вим}$, можна розділити на наступні проміжки:

1) $t_{спост}$ - час спостереження, протягом якого відліки вхідного сигналу збираються в буфер, як правило, лежить в діапазоні від 20 до 400 мілісекунд;

- 2) t_p - час розрахунків, необхідний для обчислення значення частоти;
- 3) t_e - витримка часу, необхідна для виключення помилкових спрацьовувань пристрою, рекомендована тривалість дорівнює $0,1 \div 0,5$ с;
- 4) $t_{вл}$ - власний час відключення вимикача, приблизно відповідає $0,1$ с.

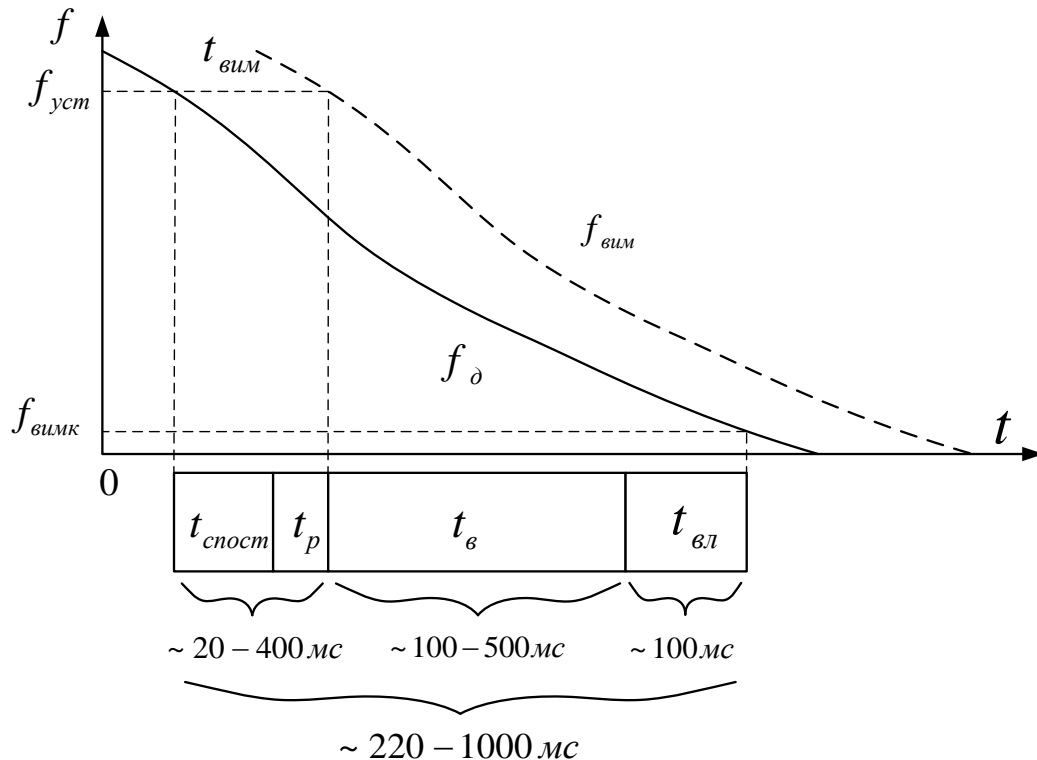


Рис. 1. Процес аварійного відключення

Перші дві складові в сумі визначають час, необхідний для виконання вимірювання $t_{вим}$. Час відключення вимикача визначається його конструктивними особливостями і не може бути скорочений. Для підвищення швидкодії пристроїв автоматичного частотного розвантаження пропонується застосування швидкодіючих методів вимірювання частоти, що виключають можливість помилкових спрацьовувань. Крім того, необхідна більш довершена функція спрацювання пристрою.

Для коректної реалізації функції керування слід враховувати елемент запізнювання, який вносять витримка часу і час відключення вимикача (рис.1). Наявність в об'єкті запізнювання істотним чином спотворює характер протікання перехідних процесів. Отже, необхідна компенсація запізнювання шляхом відповідного вибору функції керування.

Для цього використовується підхід, запропонований Р. Бессі. Сутність його полягає в тому, що для компенсації запізнювання в оптимальних системах при побудові функції аргументу керування вноситься випередження з тим, щоб поведінки системи із запізнюванням і тієї ж системи без запізнювання збігалися. У математичній інтерпретації поверхня керування в фазовому просторі, яка випереджує по часу на величину запізнювання поверхню

перемикання, будується по заданій поверхні перемикання тієї ж системи без запізнення.

За допомогою класичних методів отримана оптимальна за швидкодією функція керування, без урахування запізнювання, якій притаманні наступні недоліки:

- необхідне короткочасне відключення всіх споживачів в енергосистемі;
- перехідний процес пов'язаний зі значними перевантаженнями для енергоагрегату;
- необхідне миттєве точне визначення значень вироблюваної і споживаної в енергосистемі потужностей.

Зазначених недоліків позбавлене керування по квадратичному інтегральному критерію оптимальності, що дозволяє отримати плавний і досить швидкий перехідний процес.

Компенсаційний регулятор по відхиленню частоти є оптимальним для наведеної найпростішої моделі енергосистеми при відсутності запізнювання

$$u_{opt} = \frac{P_{H0} - P_{T0}}{P_{H0}} + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \Delta\omega, \quad (1)$$

де P_{T0} - потужність турбіни, P_{H0} - номінальна потужність навантаження, α і β - вагові коефіцієнти необхідної швидкодії та обсягу навантаження, що відключається, $\Delta\omega$ - відхилення частоти.

Для реалізації функції попередження пропонується використовувати швидкість зміни частоти, що дозволяє отримати оптимальне управління в системі з запізненням.

Характеристика спрацьовування реле частоти описується в системі координат ω , $\frac{d\omega}{dt}$ у вигляді областей відключення. У найпростішому випадку ці області являють собою півплощини, розділені прямий

$$\omega_c = k_{\omega} \omega_n + k_{d\omega} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

де ω_c - частота спрацьовування, ω_n - частота промислової мережі, k_{ω} - уставка за частотою, $k_{d\omega}$ - уставка по похідній.

Аналіз результатів застосування генетичних алгоритмів до конкретних енергетичних систем показує, що алгоритм дозволяє знаходити оптимальне або досить близьке до нього рішення в дуже стислі терміни. Однак практичне застосування таких алгоритмів можливо тільки в централізованій системі з єдиним вирішальним пристроєм.

При розгляді швидкодії методів вимірювання частоти була змодельована їх робота в динамічному режимі, коли частота змінюється за лінійним законом. У цьому випадку миттєве значення напруги визначається як

$$u(t) = U_m \sin\left(\int_0^t \omega(t) dt + \varphi_0\right), \quad (3)$$

де $\omega(t) = \omega_0 + d\omega \cdot t$, ω_0 - значення кругової частоти в момент часу $t = 0$, а $d\omega = const$ - швидкість її зміни.

Для аналізу швидкодії автоматичного частотного розвантаження слід розглядати величину запізнювання між реальним і вимірним значеннями, визначену як динамічну затримку вимірювання $t_{\text{д.з.в.}}$. При використанні моментів переходу через нуль максимальна затримка складає

$$t_{\text{д.з.в.макс}}(f) = \frac{t_{\text{вим}}(f)}{2} + T_{\text{вим}}(f), \quad (4)$$

де $t_{\text{вим}}(f)$ - час спостереження, $T_{\text{вим}}(f)$ - інтервал часу між вимірами. Останній є величиною, кратною півперіоду, і не може бути менше одного напівперіоду вимірюваної частоти. Таким чином, при вимірюванні частоти менше 50 Гц за один період, і постійної швидкості її зміни максимальна затримка вимірювання перевищує 0,02 сек.

Мінімальний інтервал між вимірами для методів на основі частотної вибірки з незмінною частотою дискретизації становить одну дискрету часу $\Delta t_{\text{д}}$. При цьому максимальна затримка складає

$$t_{\text{д.з.в.макс}} = \frac{t_{\text{вим}}}{2} + \Delta t_{\text{д}} \quad (5)$$

і не залежить від вимірюваної частоти.

Таким чином, мінімально досяжна динамічна затримка методів вимірювання по переходах через нуль перевищує аналогічну затримку в порівнянні з цифровими методами, заснованими на обробці частотної вибірки. Ця затримка збільшується в міру зниження частоти. Динамічна затримка методів вимірювання на основі частотної вибірки наближено дорівнює половині періоду виміру. Величина динамічної помилки виміру наближено визначається як добуток швидкості зміни частоти на величину затримки $\delta_{fd} \approx d\omega \cdot t_{\text{д.з.в.макс}}$. Дана залежність справедлива для всіх поширених методів вимірювання частоти і показує, що збільшення інтервалу спостереження негативно позначається на динамічних характеристиках вимірювача і пристрою в цілому. Якщо закон зміни частоти відрізняється від лінійного, то результат вимірювання буде відповідати деякому середньозваженому значенню частоти, тобто знаходитися в діапазоні між миттєвими значеннями частоти в момент початку вимірювання і значенням частоти в момент закінчення виміру. Значення затримки можна скоротити тільки за рахунок зменшення часу спостереження, що неминуче призведе до втрати точності вимірювання і перешкодозахищеності.

Оптимальне поєднання швидкодії і точності досягається застосуванням методів, що дозволяють змінювати тривалість інтервалу спостереження у процесі функціонування, в залежності від швидкості зміни частоти і рівня перешкод.

Для визначення завадостійкості цифрових методів вимірювання частоти досліджена їх реакція на найбільш характерні спотворення форми напруги промислової мережі. Показано, що найбільш часто застосовувані методи здатні

коректно працювати при наявності вищих гармонік, проте всі розглянуті методи мають значну похибку, якщо у вхідному сигналі присутня аперіодична складова. Найбільш ефективним методом боротьби є застосування смугового фільтра, використання якого призводить до зниження швидкодії пристрою і не вирішує проблему повністю. Використання блокування також не дозволяє виключити можливість помилкового спрацювання. Єдиним надійним способом недопущення спрацювання є застосування витримки часу, що перевищує час загасання перехідного процесу.

У **третьому розділі** виконана розробка швидкодіючих цифрових методів вимірювання частоти і способів виключення неправильної роботи мікропроцесорних пристроїв автоматичного розвантаження.

Запропонований подальший розвиток методу вимірювання частоти на основі методу найменших квадратів. Для отримання якомога більш повного опису сигналу пропонується виконання апроксимації залежністю виду:

$$g(t) = r_0 + r_1(t - t_c) + (1 + k_1(t - t_c)) \times \left[c_{1s} \sin(\psi(t)) + c_{1c} \cos(\psi(t)) + \sum_j (c_{j,s} \sin(j\psi(t)) + c_{j,c} \cos(j\psi(t))) \right], \quad (6)$$

де t_c - час, який відповідає моменту середини інтервалу апроксимації; c_{1s} та c_{1c} - коефіцієнти синусоїдальної і косинусоїдальної складових основної гармоніки; $j = 2, 3, 4, \dots$ - номер вищої гармоніки; $c_{j,s}$, $c_{j,c}$ коефіцієнти синусоїдальної і косинусоїдальної складових j гармоніки; k_1 - коефіцієнт залежить від швидкості зміни амплітуди; r_0 - постійна складова сигналу; r_1 - лінійна складова; $\psi(t) = (\omega - v_\omega t_c)t + \frac{v_\omega t^2}{2}$ - фаза, ω - значення частоти в момент часу t_c ; v_ω - швидкість зміни частоти. Такий опис (6), окрім наявності вищих гармонік, дозволяє враховувати що частота лінійно змінюється зі швидкістю v_ω , амплітуда лінійно змінюється зі швидкістю k_1 та наявність постійної і аперіодичної складових, що апроксимуються лінійною функцією $r_0 + r_1(t - t_c)$.

Для визначення коефіцієнтів (6) методом найменших квадратів складається система трансцендентних рівнянь. Для вирішення системи застосовується метод Зейделя, в поєднанні з методом Ньютона-Рафсона. Система має високу швидкість збіжності, якщо відхилення частоти основної гармоніки вхідного сигналу не виходить за межі $\pm 10\%$. В якості початкових наближень використовуються результати попереднього обчислення з корекцією на час, який минув з моменту закінчення останнього.

Після знаходження рішення визначається інтегральна помилка апроксимації

$$\delta = \frac{1}{(c_{1s}^2 + c_{1c}^2)} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - g(x_i))^2], \quad (7)$$

яка використовується в якості оцінки рівня спотворення вхідного сигналу. Приклад апроксимації показаний на рис. 2. У нормальному режимі роботи величина δ буде прагнути до нуля, і визначатися, в першу чергу, похибкою квантування. У випадку ж, коли вихідний сигнал містить складові які не входять в апроксимуючий поліном, величина δ різко зростає, що дозволяє відзначити те, що результати вимірів можуть значно відрізнитися від дійсних значень частоти та інших параметрів. Недоліком методу є значний обсяг обчислень і, як наслідок, високі вимоги до апаратної частини.

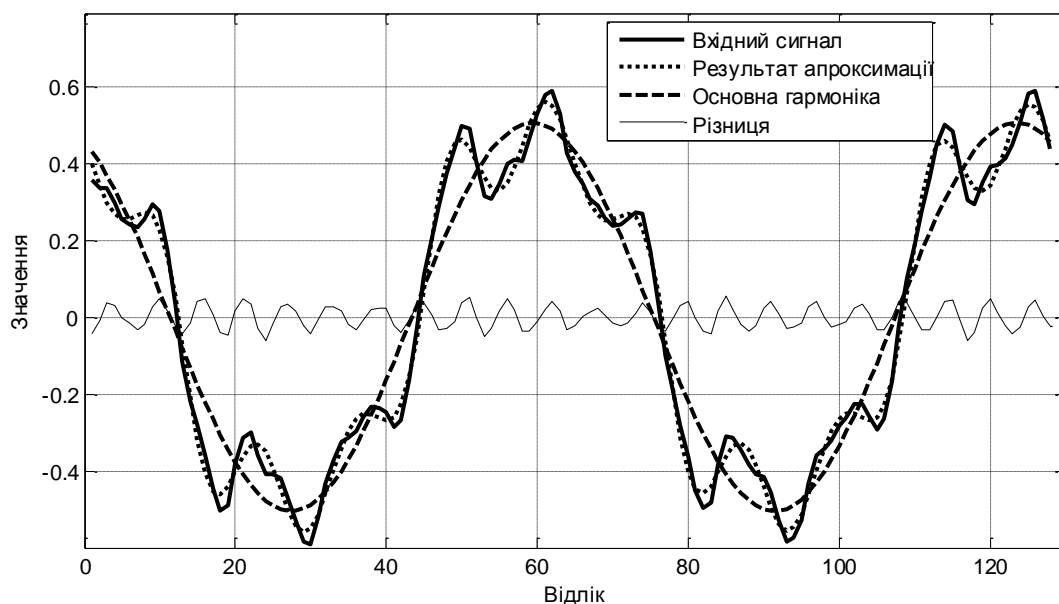


Рис. 2. Приклад апроксимації

Зазначеного недоліку позбавлений запропонований метод, який використовує моменти переходів відразу через кілька рівнів, а також ту властивість безперервних періодичних сигналів, що протягом двох періодів, при незмінних параметрах сигналу, будь-який рівень, крім амплітудного, буде пересічене число раз кратне чотирьом (рис. 3) .

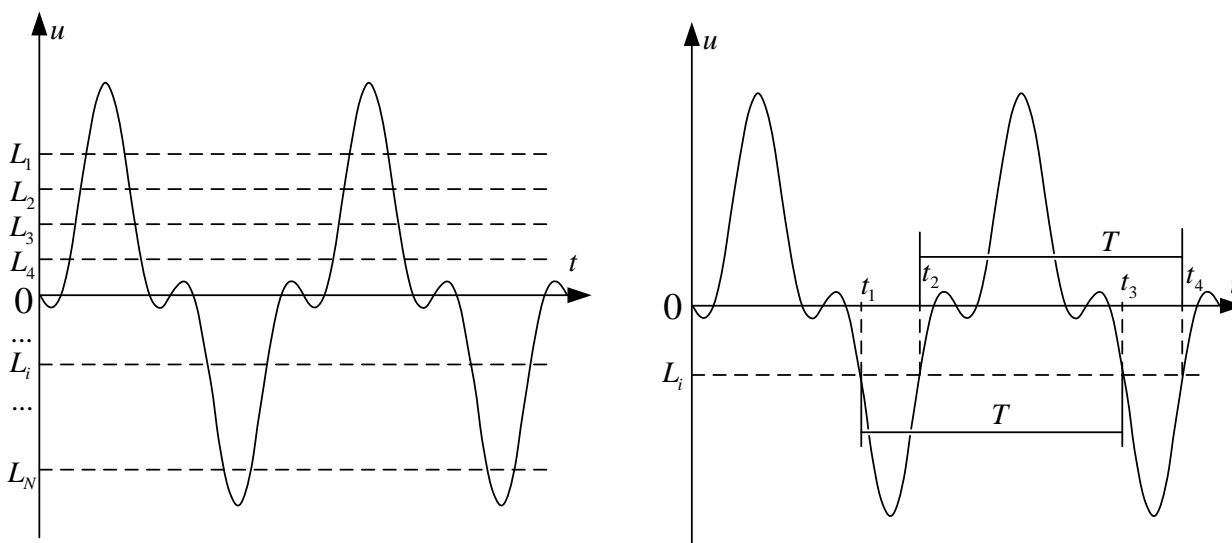


Рис. 3. Перетини з декількома значеннями рівнів

Останнє дозволяє значно усунути вплив вищих гармонік на результат вимірювання. Якщо деякий періодичний сигнал перетинає деякий рівень L_i число раз рівне k в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_k , то інтервал між моментами t_i і $t_{i+k/2}$ для $i \in [1, k/2 - 1]$ дорівнює періоду сигналу.

Моменти перетину заданого рівня знаходяться за допомогою лінійної або квадратичної інтерполяції по відомим значенням функції в ключових точках за допомогою лінійної або квадратичної інтерполяції. За отриманими значеннями K періодів T_m , $m=1..K$, і моментів часу які відповідають їх початкам t_m знаходиться рівняння, що описує значення періоду в динаміці у вигляді $\tau(t) = \nu t + \tau_0$, де τ_0 - початкове значення періоду а ν - швидкість зміни. Рішення шукається шляхом побудови кривої регресії методом найменших квадратів.

Оцінка «якості» вхідного сигналу обчислюється по відхиленнях значень періодів від отриманого закону

$$\delta = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Delta_i^2, \quad (8)$$

де $\Delta_i = T_i - \tau_0 - \nu t_i$.

Статистичний аналіз розглянутого методу при числі рівнів $N = 39$, частоті дискретизації 2048 Гц і 12 розрядному АЦП показав, що щільності розподілу випадкових похибок не відповідають моделі нормального закону, а аналіз автокореляції послідовності оцінок частоти дозволив визначити оптимальне число рівнів, яке дорівнює 13. Розрахунок ширини довірчого інтервалу для довірчої ймовірності $\rho = 0,9$ дав значення ширини Δf довірчого інтервалу $2,49 \cdot 10^{-4}$ (Гц).

Для скорочення, аж до повного виключення, витримки часу пропонується використовувати інтервальні оцінки значення частоти $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$ і швидкості зміни частоти $\nu \in [\nu_{\min}, \nu_{\max}]$, отримані на основі оцінок ступеня спотворення вхідного сигналу δ . Тоді: $f_{\min} = f_{uzm} - \Delta_f$, $f_{\max} = f_{uzm} + \Delta_f$, $\nu_{\min} = \nu_f - \Delta_\nu$, $\nu_{\max} = \nu_f + \Delta_\nu$, де f_{uzm} і ν_f - значення частоти і швидкості її зміни, отримані в результаті вимірювання, $\Delta_f = F_f(\delta)$, $\Delta_\nu = F_\nu(\delta)$ - функції від значення рівня спотворення сигналу напруги, що будуються в табличній формі. Для цього реалізується достатньо велике число M вимірювань сигналу виду $u_i = \sin(2\pi f_0 t_i) + rand_i(e)$, де f_0 - задана частота, $rand_i(e)$ - випадкове число в

діапазоні $[-e, e]$. Коефіцієнти $k_{f,m} = \frac{|f_{uzm,m} - f_0|}{\delta_m}$, і $k_{\nu,m} = \frac{|\nu_{f,m}|}{\delta_m}$, розраховуються з

множини значень $f_{uzm,m}$, $\nu_{f,m}$ і δ_m , $m=1..M$, після чого отримані набори упорядковуються за зростанням, і з отриманих послідовностей вибирається значення з заданим рівнем ймовірності ε : $k_f^\varepsilon = k_f^{sorted}[\text{round}(\varepsilon M)]$, $k_\nu^\varepsilon = k_\nu^{sorted}[\text{round}(\varepsilon M)]$, де $\text{round}(\varepsilon M)$ - округлене значення індексу елемента

відсортованого масиву k_f^{sorted} який відповідає вибраному значенню ймовірності. Це дозволяє виключити випадки, коли сигнал за рахунок випадкових складових набуває вигляду неспотвореного гармонійного сигналу частоти відмінною від f_0 , тобто при $\delta_m \rightarrow 0$ величина $|f_{уз.м,m} - f_0|$ буде відмінною від 0, а отже $k_{f,m} \rightarrow \infty$. Залежності $k_f^e(\delta)$ і $k_v^e(\delta)$ дозволяють будувати інтервальні оцінки частоти і швидкості її зміни незалежно для кожного окремого вимірювання.

Використання верхніх оцінок значень частоти f_{max} і швидкості її зміни v_{max} замість вимірних значень дозволяє з високою вірогідністю виключити можливість неправильної роботи пристрою АЧР при виникненні будь-яких збурень і перехідних процесів в енергосистемі. При реалізації ЧАПВ необхідно використовувати нижні оцінки f_{min} і v_{min} .

Для усунення впливу випадкової шумової складової на результати вимірювання запропонований цифровий фільтр. Фазова складова та наявність пульсацій частотної характеристики не надають значимого впливу на результати вимірювання, а вирішальну роль має величина групової затримки, отже використовується еліптичний фільтр четвертого порядку з каскадною реалізацією.

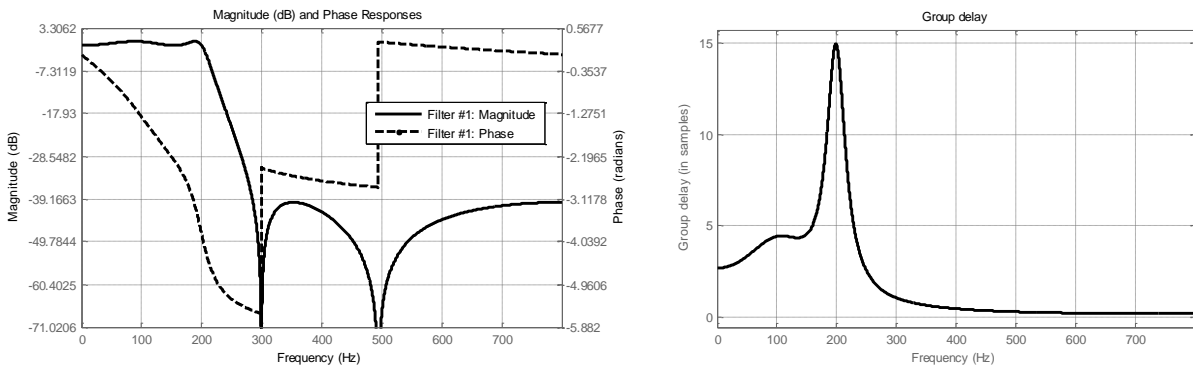


Рис. 4. АЧХ і ФЧХ і величина групової затримки еліптичного фільтра 4 порядку $f_{cp} = 200$ Гц

Такий цифровий фільтр має достатню крутизну спаду АЧХ (рис.4) і дозволяє виключити з сигналу гармоніки вище 5-ї. При цьому величина групової затримки на частоті основної гармоніки не перевищує шостої частини періоду.

У **четвертому розділі** розроблена функціональна схема експериментальної мікропроцесорної установки пристрою розвантаження (рис. 5). Аналого-цифрове перетворення, обчислення параметрів сигналу, порівняння з уставкою і витримка часу реалізуються на єдиному мікроконтролері STM32. Для введення і виведення сигналів використовуються проміжні погоджуючі елементи. Управління пристроєм здійснюється з ПК через інтерфейси USB і RS-232. Запис протоколів функціонування та тимчасових даних здійснюється на зовнішній Flash-накопичувач. Для відображення поточної інформації та режиму роботи пристрою призначений рідкокристалічний індикатор (РКІ).

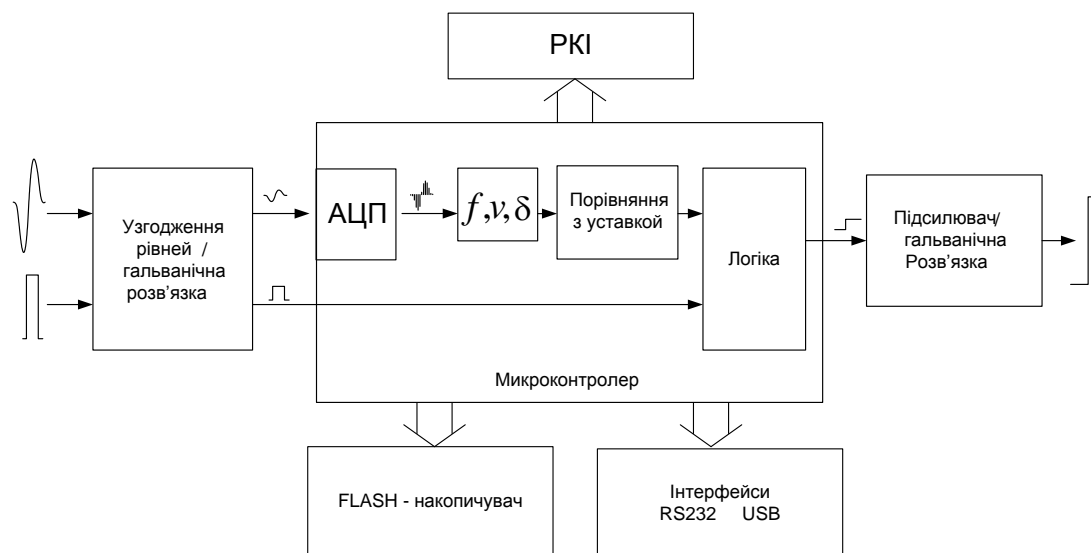


Рис. 5. Експериментальна установка, схема функціональна

При проведенні експерименту використовувалися такі алгоритми:

- алгоритм вимірювання по множині пересічень заданих рівнів (ПУ), час спостереження якого відповідає двом періодам основної гармоніки;
- алгоритм заснований на методі найменших квадратів з тривалістю вибірки, яка відповідає одному періоду основної гармоніки номінальної частоти (НК1);
- алгоритм заснований на методі найменших квадратів з тривалістю вибірки, яка відповідає двом періодам основної гармоніки номінальної частоти (НК2).

Зазначені методи мають високу точність вимірювань (рис.6а) якщо вхідний сигнал є неспотвореною синусоїдою.

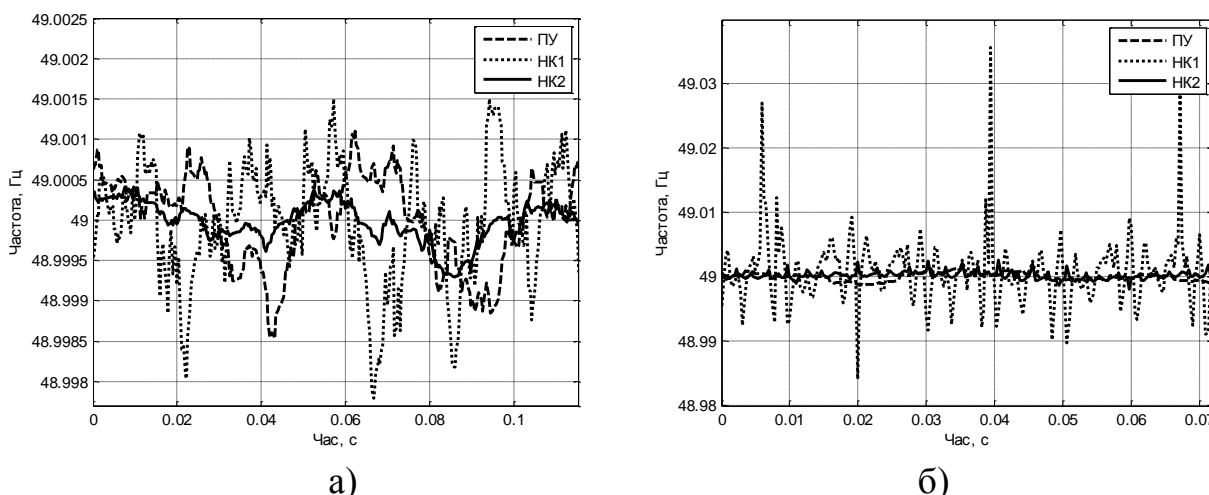


Рис. 6. Результати вимірювання неспотвореного сигналу і сигналу, в якому присутні вищі гармоніки

В разі наявності вищих гармонік (рис.6б) спостереження на протязі одного періоду основної гармоніки не дозволяє отримати високу точність, але дозволяє отримати максимальну швидкодію в динамічному режимі, коли частота знижується з великою швидкістю 5 Гц/с (рис.7а). Випробування на сигналі,

отриманому на лінії, що відходить 110кВ підстанції «Лосево» (рис.7б) також довели працездатність розроблених методів. На рис.8 показані результати побудови інтервальної оцінки частоти сигналу, що містить скачок амплітуди в момент 0,06 с (а) за методами НК1 (б), НК2 (в) і ПУ (г).

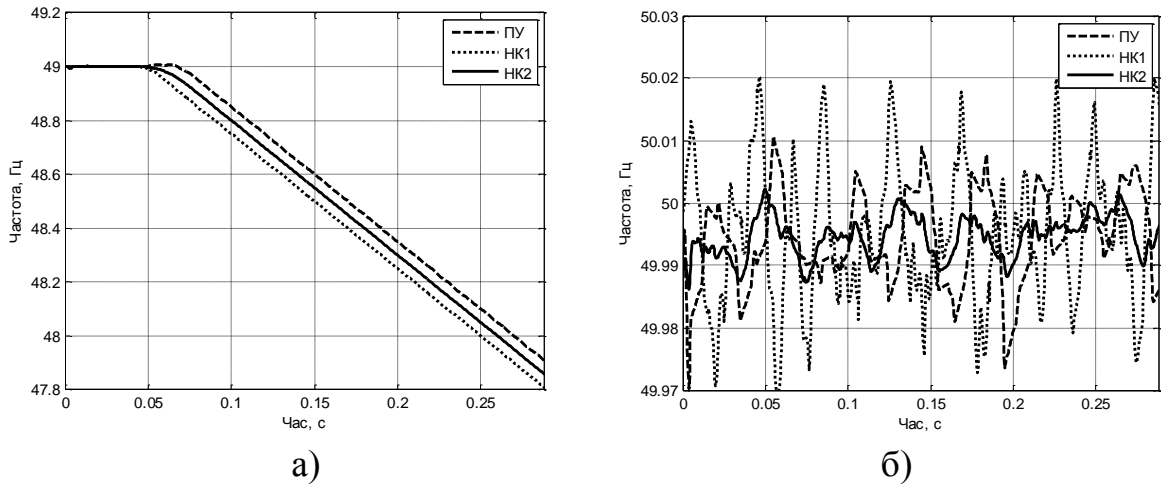


Рис. 7. Результати вимірювання сигналу змінної частоти і сигналу отриманого в реальній енергосистемі

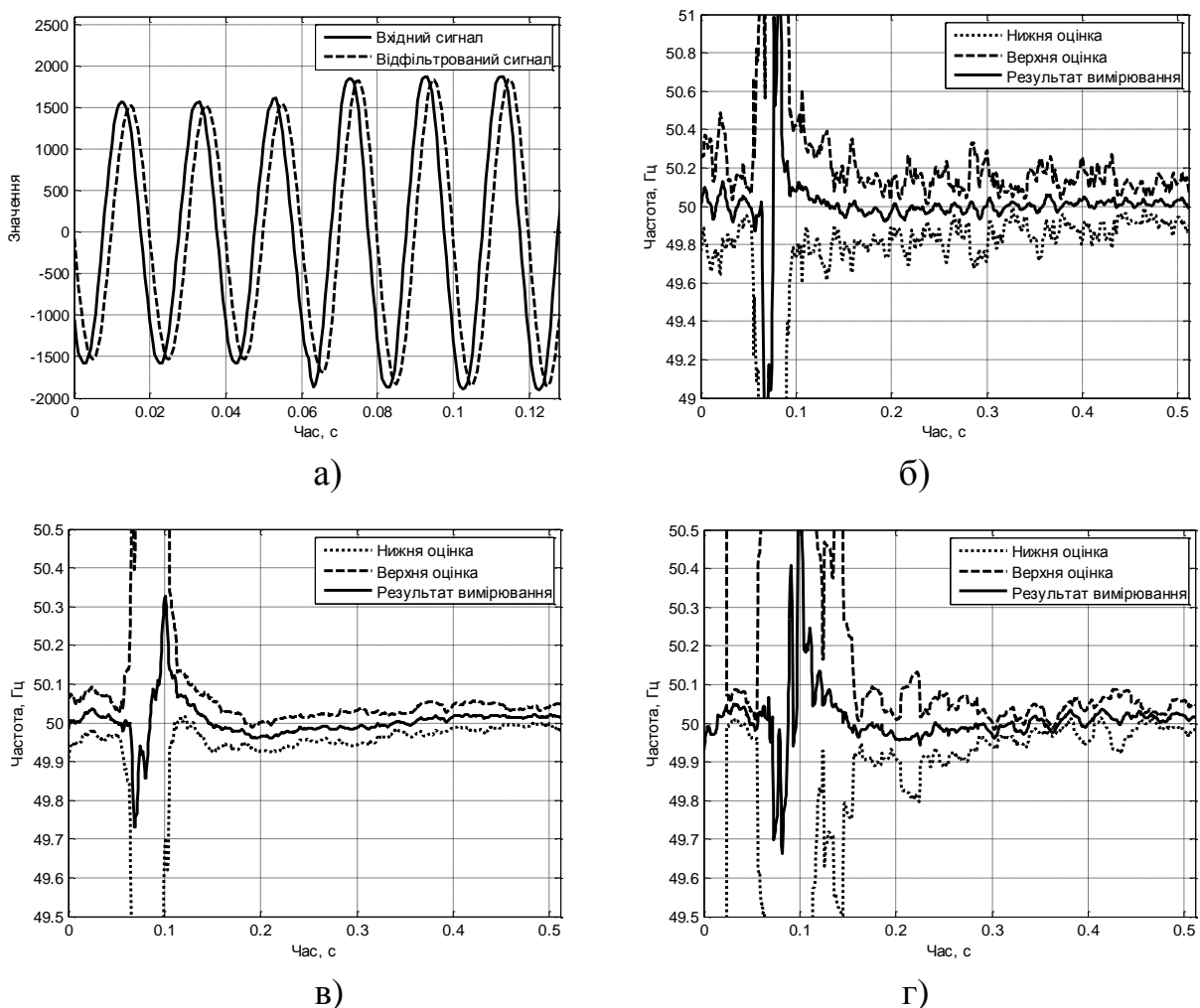


Рис. 8. Інтервальна оцінка частоти сигналу, що містить скачок амплітуди в момент 0,06 с (а) за методами НК1 (б), НК2 (в) і ПУ (г)

Результати вимірювань мають провали на $\sim 0,3$ Гц, які при більших амплітудах спотворень можуть призводити до хибних спрацювань, що виключено при використанні верхньої оцінки частоти.

Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність розроблених цифрових методів вимірювання частоти і швидкості її зміни. Застосування інтервальної оцінки дозволяє виключити помилкові спрацьовування без витримки часу. Оптимальна тривалість інтервалу спостереження залежить від рівню спотворень вхідного сигналу та лежить в межах від одного до трьох періодів основної гармоніки.

У **додатках** наведено результати статистичного аналізу розподілу похибки вимірювання періоду сигналу методом по множині перетинів зазначених рівнів, тексти комп'ютерних програм, що реалізують вимірювання, на мові С та акти впровадження в ДП НЕК «Укренерго» та в навчальний процес кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХП».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено вирішення науково-технічної задачі забезпечення безаварійного функціонування енергосистем, яке полягає в розробці методів і засобів підвищення ефективності систем і пристроїв автоматичного частотного розвантаження, необхідних для мінімізації збитку при виникненні аварійних процесів, що характеризуються значним дефіцитом активної потужності.

При цьому отримані наступні результати:

1. Запропоновано функцію керування розвантаження, отриману як оптимальну по інтегральному квадратичному критерію для системи з запізнюванням по керуванню. Для її реалізації уставки мікропроцесорних пристроїв розвантаження виконуються у вигляді лінійної комбінації частоти та її похідної, що дозволяє отримати оптимальний результат з точки зору максимальної швидкодії та мінімуму обсягу споживачів що відключаються. Використання такої функції дозволяє скоротити час спрацьовування автоматичного розвантаження та зменшити обсяг надлишку потужностей що відключаються при аваріях із значним дефіцитом активної потужності.

2. Запропоновано використання змінного часу спостереження при вимірюванні частоти, в залежності від рівню спотворень вхідного сигналу. Це дозволяє отримати оптимальний за швидкістю та точністю результат та зменшити затримку спрацьовування пристрою розвантаження.

3. Розроблено комп'ютерну модель багатомашинної енергосистеми, що дозволило дослідити реакцію існуючих методів вимірювання частоти на основні види перехідних процесів у енергетичній системі. Аналіз показав, що наявність вищих гармонійних складових у вхідному сигналі не призводить до появи значних похибок вимірювання частоти, проте жоден з методів

вимірювання не дає змоги отримати достовірний результат, якщо в складі сигналу є аперіодична складова.

4. Запропоновано цифровий метод вимірювання частоти на основі множини пересічень заданих рівнів з наступним визначенням середньої частоти, швидкості її зміни і оцінки рівня спотворення вихідного сигналу, було обґрунтовано оптимальне число рівнів сигналу, а також отримані числові оцінки похибок методу.

5. Отримав подальший розвиток алгоритм на основі методу найменших квадратів, що дозволяє вимірювати середнє значення частоти, швидкість її зміни, рівень спотворення вхідного сигналу, а також амплітуди і фази основних гармонійних складових вхідного сигналу. Експериментальні дослідження довели ефективність роботи даного методу. Отримані числові оцінки похибок.

6. Проведений аналіз експериментальних даних показав, що оптимальна тривалість інтервалу спостереження може змінюватися, в залежності від рівню спотворень вхідного сигналу, та лежить в межах від одного до трьох періодів основної гармоніки вхідного сигналу. Зменшення інтервалу спостереження призводить до погіршення точності вимірювань. Використання часу спостереження, який перевищує тривалість трьох періодів основної гармонійної складової, недоцільно у зв'язку з тим, що динамічна похибка перевищить похибку вимірювання.

7. Запропоновані методи, що дозволяють виключити можливість невірної роботи пристрою при виникненні перехідних процесів в енергосистемі не пов'язаних з пониженням частоти. Для цього використовується оцінка рівня відхилення сигналу напруги від форми, відповідної до нормального режиму роботи. Показано, що застосування даних методів дозволить скоротити витримку часу при виконанні розвантаження до мінімуму.

8. Розроблено функціональну та принципову схеми пристрою частотного розвантаження на базі мікроконтролера STM32. Застосування такої елементної бази дозволило отримати надійний і повнофункціональний пристрій з мінімальною собівартістю.

9. Результати дисертаційної роботи використані при модернізації системи визначення якості електричної енергії на шинах підстанції 330 кВ «Котовська» ДП НЕК «Укренерго», а також були впроваджені в навчальний процес у НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гапон Д.А. Оптимизация алгоритмов автоматической частотной разгрузки / Гапон Д.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХП», 2002. – № 6 т.2 С.147-152.

2. Гапон Д.А. Использование дополнительных критериев при работе автоматической частотной / Максимов В.М., Додо Амаду М.М., Гапон Д.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХП», 2002. – № 9 т.3 С.56-60.

Здобувачем досліджено застосування швидкості зниження частоти як ознаки близькості збурення.

3. Гапон Д.А. Цифровой помехозащищённый измеритель частоты промышленной сети / Максимов В.М., Гапон Д.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 22 С.27-32.

Здобувачем розроблено алгоритм вимірювання частоти напруги промислової мережі.

4. Гапон Д.А. Динамические качества цифровых методов измерения частоты в автоматической частотной разгрузке / Гапон Д.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 35. – С. 47-54.

5. Гапон Д.А. Исследование вариаций периодов электросети с помощью микроконтроллера / Гапон Д.А., Кулаков П.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2007. – № 10. – С. 31-39.

Здобувачем розроблено схему експериментальної установки для вимірювання періоду напруги промислової мережі.

6. Гапон Д.А. Исследование точности определения частоты промышленной сети методом сканирования по АЦП / Гапон Д.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 1. – С. 77-80.

7. Гапон Д.А. Быстродействующий метод измерения промышленной частоты по моментам пересечения фиксированных уровней / Гапон Д.А. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 23 С.75-79.

8. Гапон Д.А. Мікропроцесорний пристрій частотної автоматики енергосистем / Богатирьов І.Н., Гапон Д.А., Максимов В.М. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції 15-16 травня. – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – С.313.

Здобувачем зроблено порівняльний аналіз характеристик деяких з пристроїв частотної автоматики.

9. Гапон Д.А. Завадостійкий метод вимірювання промислової частоти і швидкості її зміни / Гапон Д.А. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції Ч.ІІ 15-17 травня. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 206.

АНОТАЦІЇ

Гапон Д.А. Методи та засоби підвищення якості функціонування автоматичного частотного розвантаження енергосистеми в аварійних режимах. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 — комп'ютерні системи та компоненти. -

Національний технічний університет – «Харківський політехнічний інститут», Харків 2012

Дисертація присвячена розробці методів та засобів автоматичного частотного розвантаження енергосистем які відповідають сучасним вимогам надійності, швидкодії та стійкості.

Запропоновано функцію управління, розраховану за оптимальним квадратичним критерієм для системи с запізнюванням, яка враховує значення відхилення частоти від номінального значення та швидкість зміни цього відхилення, за рахунок чого реалізовано випередження.

В роботі запропоновано метод вимірювання частоти, заснований на множині перетинів набору заданих рівнів вхідним сигналом що, дозволяє з високою точністю вимірювати частоту і швидкість її зміни за час спостереження відповідний двом періодам основної гармоніки вхідного сигналу. Також запропоновано метод заснований на методі найменших квадратів, який має більшу обчислювальну складність, але дозволяє працювати при часі спостереження менше одного періоду основної гармоніки вхідного сигналу.

Розроблено метод виключення помилкових спрацьовувань без витримки часу, за рахунок використання інтервальних оцінок значень частоти та швидкості її зміни, що будуються з врахуванням рівня спотворень вхідного сигналу.

Наведено результати експериментальних досліджень запропонованих методів на різних тестових впливах, у тому числі і на осцилограмах отриманих у енергосистемі.

Ключові слова: автоматика, інформаційно-вимірювальна система, контроль параметрів процесів, автоматичне частотне розвантаження, вимірювання промислової частоти, протиаварійна автоматика, енергосистема.

Гапон Д.А. Методы и средства повышения качества функционирования автоматической частотной разгрузки энергосистемы в аварийных режимах. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - компьютерные системы и компоненты. - Национальный технический университет – «Харьковский политехнический институт», Харьков 2012

Диссертация посвящена разработке методов и средств автоматической частотной разгрузки энергосистем, которые отвечают современным требованиям по надежности, быстродействию и устойчивости.

В диссертации обоснована цель, актуальность направления исследования, проведен обзор известных методов выполнения частотной разгрузки, а также методов измерения промышленной частоты и скорости ее изменения, показаны их преимущества и недостатки. Рассмотрены основные виды возмущений, возникающих в энергосистемах и способных приводить к неправильному функционированию частотной автоматики. Показаны пути и способы

повышения эффективности разгрузки и, в частности, повышения ее быстродействия и устойчивости.

По мере технического совершенствования основного оборудования электростанций и других элементов энергосистем возникло множество несоответствий между действительными требованиями и существующей нормативной документацией. Существующая система автоматической частотной разгрузки не способна в полной мере удовлетворить современным требованиям, и требует глубокой модернизации. Нижний уровень уставки по частоте для АЧР-I должен быть не ниже 48 Гц. Такой запас частоты, необходимый для надежной работы современного оборудования электростанций, принят в странах управления UCTE/CENTREL. Для реализации эффективной системы АЧР необходимо, чтобы каждое устройство было способно измерять частоту напряжения в месте его установки с высокой точностью, помехоустойчивостью и быстродействием. Эти качества, в первую очередь, определяются методом измерения частоты. Существующие методы либо обладают недостаточным быстродействием, либо не способны правильно функционировать при наличии значительных искажений формы напряжения, возникающих вследствие коммутационных явлений.

В диссертационной работе рассмотрены методы оптимизации алгоритмов автоматической частотной разгрузки. Показано, что условие максимальной скорости восстановления частоты противоречит условию минимизации отключаемых потребителей. Предложена функция управления, учитывающая значения отклонения частоты от номинального значения и скорость изменения этого отклонения, являющаяся оптимальной по среднеквадратичному критерию для системы с запаздыванием. Показано, что применение других методов многокритериальной оптимизации, таких как генетические алгоритмы, не могут быть применены к автоматической частотной разгрузке без глобального изменения аппаратной части автоматики.

В работе рассмотрена работа различных методов измерения частоты при возникновении переходного процесса по частоте. Показано, что в ряде случаев динамическая погрешность значительно превышает заявленную максимальную погрешность метода. Также исследовано влияние различных возмущений во входном сигнале на результат измерения частоты. Так изменение амплитуды напряжения большинством методов интерпретируется как одновременное изменение частоты входного сигнала, что может приводить к ложным срабатываниям и, соответственно, значительному материальному ущербу от недопоставки электрической энергии.

Для устранения указанных недостатков предложены новые методы измерения частоты. Метод, основанный на множественных пересечениях входного сигнала с набором заданных уровней, позволяет с высокой точностью измерять частоту и скорость ее изменения за время наблюдения соответствующее двум периодам основной гармонике входного сигнала. При этом определяется также уровень искажения этого сигнала, что позволяет исключить ошибочные срабатывания, независимо от величины возмущения. При этом метод достаточно прост в реализации и не требователен к аппаратной

части устройства разгрузки. Также предложен метод, основанный на методе наименьших квадратов, имеющий значительно большую вычислительную сложность, однако и большую точность. Кроме того, он может применяться при времени наблюдения менее одного периода основной гармонической входного сигнала. Характерной особенностью обоих методов является корректная работа при изменяющейся во времени частоте входного сигнала.

Предложен метод исключения ложных срабатываний при наличии искажений во входном сигнале. Для этого используются интервальные оценки значений частоты и скорости ее изменения, полученные на основе оценки уровня искажений входного сигнала.

Приведены результаты экспериментальных исследований предложенных методов на различных тестовых воздействиях, в том числе и на осциллограммах полученных в действующей энергосистеме.

Ключевые слова: автоматика, информационно-измерительная система, контроль параметров процессов, автоматическая частотная разгрузка, измерение промышленной частоты, противоаварийная автоматика, энергосистема.

Gapon D Methods and means of improving the quality of operation of power system load shedding in emergency mode. - Manuscript .

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.13.05 - computer systems and components. - National Technical University – «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkov 2012

The thesis is devoted to developing methods and means of automatic frequency discharge power corresponding to modern requirements for reliability and performance.

The method is based on the multiple intersections of the input signal with a set of levels, allows high accuracy to measure the frequency and speed of its change during the observation corresponding to the two periods of fundamental harmonic. Also, the method based on the method of least squares, which has a much higher computational complexity, but has great accuracy and can work in less than one period of the fundamental harmonic. A feature of both methods is the correct work with time varying input signal frequency.

The experimental results of proposed methods to test various influences, including the oscillograms obtained in the power system.

Keywords: automation, information-measuring system, control of process parameters, load shedding, frequency estimation, emergency control, power system.

Відповідальний за випуск
к.т.н., доц. кафедри автоматизації енергосистем НТУ «ХП»
Рудевіч Наталія Валентинівна

Підписано до друку 10.10.2012 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення №

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 04058841 Ф0050331 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
