

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ДОДО АМАДУ МАМАН МУСТАФА
(Hıger)**

УДК 621.316.786

Пристрої автоматичного частотного розвантаження енергосистем

**Спеціальність 05.13.05 – елементи та пристрої обчислювальної техніки
та систем керування**

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків - 2000

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Електричні станції” Харківського державного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Максимов Вадим Михайлович,
Харківський державний політехнічний університет,
професор кафедри “Електричні станції”.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Артюх Станіслав Федорович,
Українська Інженерно-педагогічна Академія,
ректор

кандидат технічних наук, доцент
Ситнік Борис Тимофійович,
Харківська Державна Академія залізничного транспорту,
доцент кафедри “Автоматика та комп’ютерні системи
керування”.

Провідна установа: Відкрите акціонерне товариство Харківське науково-виробниче
об’єднання “Хартрон”, м. Харків

Захист відбудеться 23 листопада _____ 2000 року о 14³⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д64.050.07 у Харківському державному політехнічному
університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, в ауд. 507, к.У-2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного політехнічного
університету.

Автореферат розісланий “ 21 ” жовтня 2000р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Голоскоков О.Є.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Сучасні енергосистеми (ЕС) характеризуються об’єднанням декількох ЕС на рівнобіжну роботу. При цьому деякі ЕС одержують значну потужність від інших. За цих умов аварія (наприклад, відключення потужної лінії електропередачі, генератора великої одиничної потужності, автотрансформатора зв’язку тощо) може дати каскадний розвиток аварії та привести до

повного погашення об'єднаної ЕС. Подібні аварії мали місце в ЕС США в листопаді 1965 р. і 13 липня 1977 р., у Франції - 19 грудня 1978 р. Вони одержали назву системних аварій. Аналіз показав, що однією з причин розвитку зазначених аварій є хиба засобів протиаварійної автоматики, а також неефективність дії автоматичного частотного розвантаження (АЧР): затримка в спрацьовуванні, відключення невідповідної частки навантаження і помилкові спрацьовування. Тому розробка пристроїв АЧР із високою ефективністю спрацьовування є актуальним завданням. Дослідження багатьох авторів свідчать, що істотне підвищення ефективності АЧР може досягатися при використанні в пристроях АЧР не тільки сигналу, пропорційного значенню частоти, але й низки додаткових чинників, зокрема швидкості зниження частоти, а також їхньої комбінації.

Значний внесок у розробку принципів виконання АЧР і реалізації відповідних пристроїв внесли такі фахівці, як А.Г. Москалев, Е.Д. Зейлидзон, Н.С. Маркушевич, Р.С. Рабинович, М.С. Гуров, а також науковий колектив кафедри “Електричні станції” Харківського державного політехнічного університету під керівництвом професора В.У. Кизилова.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи входить як складова головного напрямку наукових досліджень кафедри “Електричні станції” Харківського державного політехнічного університету “Розробка вимірювальних перетворювачів струму, напруги, частоти, активної та реактивної потужності” (номер державної реєстрації – 0195002107).

У дисертації розв'язується наукова задача, яка полягає у розробці нових принципів АЧР з метою підвищення ефективності систем автоматики та надійності ЕС.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є підвищення ефективності роботи алгоритмів і пристроїв АЧР. Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються такі задачі:

1. Розробка ефективних методів частотного розвантаження енергосистем.
2. Удосконалення пристроїв АЧР шляхом:
 - 2.1 розробки алгоритмів функціонування пристроїв АЧР, що реалізують ефективні методи розвантаження;
 - 2.2 вибір найбільш раціонального принципу вимірювання частоти мережі і швидкості її зміни на основі аналізу різноманітних засобів;
 - 2.3 дослідження похибки прийнятого засобу вимірювання частоти при наявності перешкод і швидкості зміни частоти;
 - 2.4 розробка алгоритмів пристроїв, що блокують АЧР на основі дослідження перехідних режимів роботи енергосистеми й пристроїв АЧР.

Об'єкт дослідження: Автоматичне частотне розвантаження енергосистем.

Предмет дослідження: Розробка нових принципів виконання та підвищення ефективності роботи автоматичного частотного розвантаження.

Методи дослідження включають: аналітичні методи досліджень, математичне моделювання на основі формалізації досліджуваних процесів, загальну теорію електричних кіл, а також натурні експерименти.

Наукова новизна одержаних результатів:

1 Розглянута та обґрунтована нова теоретична методика визначення величини виниклого дефіциту активної потужності (АП), яка на відміну від відомої методики не потребує знання постійної механічної інерції ЕС.

2 Проведено теоретичний аналіз роботи багатоступінчастої АЧР, в результаті якого одержаний аналітичний вираз величини потужності навантаження, яка повинна бути вимикнута з мінімальною витримкою часу. На підставі проведеного аналізу розроблено рекомендації з оптимізації роботи комбінованої АЧР, принцип роботи якої поєднує абсолютне значення частоти та швидкість її змінення, а також знак швидкості змінення частоти.

3 Установлена нова закономірність змінення вимірюваної частоти у разі суміші корисного гармонічного сигналу та перешкоди у вигляді аперіодичної складової при вимірюванні частоти методом фіксації моментів переходу напруги через нуль. Досліджено можливості фільтрації АС.

4 Уперше проведено теоретичний аналіз вимірювання частоти по моментах переходу через нуль гармонічного сигналу у випадку наявності швидкості змінення частоти. Показано, що в цих умовах виникає методична похибка. Отримано аналітичний вираз цієї похибки.

5 Обґрунтована можливість використання закономірності зміни частоти при асинхронному режимі з метою зменшення витримки часу для ухилення від помилкових спрацьовувань АЧР.

6 Теоретично обґрунтована можливість диференціювання на основі широтно-імпульсної модуляції, що дає можливість диференціювати сигнал, який повільно змінюється.

Практичне значення отриманих результатів. Результати проведених досліджень використані у розробленому на кафедрі “Електричні станції” Харківського державного політехнічного університету реле частоти РЧЧА-1, яке пройшло незалежні порівняльні випробування в Міненерго України. Результати проведених досліджень можна також використовувати для удосконалення алгоритмів функціонування нових пристроїв АЧР. Розроблений пристрій може доповнювати роботу вже існуючих пристроїв АЧР.

Особистий внесок здобувача. Розробка нових методів розвантаження, аналіз методичної похибки при вимірюванні частоти по моментах переходу через нуль контролюємої напруги у випадку наявності швидкості змінення частоти, розробка алгоритму функціонування пристроїв АЧР з метою зменшення витримки часу для усунення помилкових спрацьовувань при асинхронному режимі і пропозиція приблизного засобу виміру швидкості змінення частоти на базі розробленого диференціатора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи повідомлені: на щорічних міжнародних науково-технічних конференціях “MICROCAD” 1996, 1997, 1998 і 1999 р;

на п’ятій науково-технічній конференції “Пристрої перетворення інформації для контролю та керування в енергетиці” - Харків: ХДПУ, 1996.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у чотирьох статтях у Віснику ХДПУ, одна стаття у Збірнику наукових праць ХДПУ, три статті у матеріалах науково-технічних конференцій, чотири тези у Матеріалах науково-технічних конференцій. Подано також заявку на винахід з нового засобу диференціювання.

Структура дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, висновки, чотири додатки. Повний обсяг дисертації складає 238 сторінок, в тому числі 40 ілюстрацій на 35 сторінках, 11 таблиць на 11 сторінках, список використаних літературних джерел з 125 найменувань на 12 сторінках і додатки на 42 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі після обґрунтування актуальності теми дисертації сформульовані наукова задача, мета і задачі дослідження. Показана наукова новизна і практичне значення результатів і їх апробація. Наведені особистий внесок здобувача і публікації результатів дисертації.

У першій частині першого розділу обґрунтований вибір моделі аналізованої ЕС, у якій зміна відхилення частоти f від вихідного значення f_0 , яке дорівнює $\Delta f = f - f_0$, і швидкість її зміни V описуються такими співвідношеннями:

$$\Delta f^* = -\frac{P_{D0}^*}{k_H} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

де $\Delta f^* = \frac{\Delta f}{f_0}$, $P_{D0}^* = P_{D0} / P_{H0}$ - початковий відносний небаланс активної потужності (АП) (при частоті f_0) для вихідного режиму до виникнення дефіциту, $\tau = T_H / k_H$ - постійна часу зміни частоти ЕС, T_H - постійна часу механічної інерції ЕС приведена до потужності навантаження P_{H0} у вихідному режимі; k_H - регулюючий ефект навантаження по частоті;

$$V^* = -\frac{P_{D0}^*}{k_H \tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

де $V^* = \frac{V}{f_0}$.

Далі приведена класифікація існуючих принципів виконання АЧР за двома критеріями: у залежності від чинника появи дефіциту й у залежності від засобу відновлення балансу потужності. За першим критерієм принципи виконання АЧР можна розділити на три групи: по абсолютному значенню частоти, по швидкості зниження частоти і по абсолютному значенню частоти і швидкості зниження частоти. За другим критерієм виділені два принципи виконання АЧР: однокатегорійна і багатокатегорійна, що складається з категорії для запобігання зниження частоти (АЧР-1), категорії для відновлення частоти (АЧР-2) і категорії додаткового розвантаження. Багатокатегорійна АЧР, яка застосовується нині в Україні, є найбільш адаптивною. Проте категорія додаткового розвантаження, що діє при великих дефіцитах АП з метою збільшення обсягу і прискорення відключення навантаження, не завжди можлива. Тому виникає необхідність підвищення ефективності роботи категорії для запобігання зниження частоти. Основною причиною, що знижує ефективність роботи зазначеної категорії розвантаження, є наявність витримки часу при відключенні навантаження пристроями АЧР, що складається з часу дії реле частоти, витримки часу, яка традиційно вводиться для уникнення від помилкового спрацьовування пристроїв АЧР, і часу дії вимикача. Аналіз показав, що скорочення зазначеної затримки дозволяє підвищити ефективність даного засобу розвантаження. Проте, оскільки неможливо цілком виключити зазначену часову затримку, необхідно додатково її враховувати в алгоритмі функціонування пристроїв АЧР.

Аналіз також показав, що використання швидкості зміни частоти V підвищує ефективність роботи АЧР. Відомі два засоби застосування V для розвантаження:

- значення V використовується для зміни уставок по частоті черг АЧР. Ефективність цього заходу обмежується наявністю верхньої межі по частоті, вище якої недоцільно робити розвантаження;
- значення V використовується для відключення визначеної частки навантаження. Як слідує з (2), початкова швидкість зниження частоти (при $t=0$) пропорційна дефіциту АП. Даний засіб найефективніший, проте потрібно проведення додаткових досліджень, спрямованих на усунення неоднозначності при визначенні $P_{до}^*$ по V через мінливість T_{II} або на обґрунтування частки навантаження, що відмикається.

Основний вузол пристрою АЧР, що визначає його точність, швидкодію і надійність, є вимірювальний орган частоти (ВОЧ). Тому друга частина першого розділу присвячена порівняльному аналізу різноманітних методів вимірювання промислової частоти. Проведено класифікацію цих методів за двома головними критеріями: по типу елементної бази і по засобу перетворення відхилення частоти у вихідний параметр. По першому критерію всі методи виміру промислової частоти можна розділити на три групи: аналогові, цифрові та аналого-цифрові. Більшість запропонованих останнім часом у зв'язку з розвитком мікропроцесорної техніки цифрових методів, що використовують перетворені в код вибірки миттєвих значень контролюємої

напруги, припускають синусоїдальну форму останньої. Проведений у дисертації аналіз зазначених методів виміру частоти показує, що при перекрученій формі вони дають значні помилки. У зв'язку з цим зроблено висновок про доцільність використання в пристроях АЧР методу виміру частоти, в основі якого лежить фіксація моментів переходу через нуль контролюємої напруги. Проте при використанні даного методу необхідно проведення аналізу похибок виміру частоти в перехідних режимах як у ЕС, так і в самому реле, на основі якого варто розробити прості та ефективні заходи для їхнього зниження.

Другий розділ роботи присвячений розгляду деяких нових принципів виконання АЧР. Запропоновано алгоритм АЧР, що дозволяє визначити величину виниклого дефіциту $P_{Д0}^*$, у якому виключена постійна інерції T_{II} ЕС. Цей алгоритм припускає введення так званого спробного або дозованого відмикання навантаження P_{II} . Отримано співвідношення для визначення $P_{Д0}^*$:

$$P_{Д0}^* = \frac{KP_{II}^*}{K + P_{II}^* - 1}, \quad (3)$$

де $P_{II}^* = P_{II} / P_{H0}$; $K = \Delta f_{ycm1}^* / \Delta f_{ycm2}^*$ (Δf_{ycm1}^* і Δf_{ycm2}^* - сталі відхилення частоти до і після відключення навантаження P_{II}). У роботі розглянуто один із можливих засобів визначення невідомих у (3) Δf_{ycm1}^* і Δf_{ycm2}^* за допомогою методу ідентифікації.

Основна складність, що виникає при реалізації даного алгоритму, пов'язана з вибором розміру навантаження P_{II} .

У роботі для підвищення ефективності існуючої АЧР-1 запропоновано алгоритм роботи АЧР, що враховує час відключення навантаження $t_{ОТК}$. Принцип виконання цього алгоритму такий: при досягненні частотою в ЕС уставки по частоті f_1 першої черги запускаються всі черги, уставки по частоті котрих більше або дорівнюють значенню частоти $f_{ОТК1}$ (рис.1).

Розмір навантаження P_{II}^* , що відмикається в момент $t_{ОТК1}$ при дії запропонованої АЧР, визначається таким виразом:

$$P_{II}^* = \frac{P_{Д\max}^*}{\Delta f_{ОЧЕР}^*} \Delta f_{np}^*, \quad (4)$$

де $P_{Д\max}^*$ - обсяг розвантаження (сумарна потужність навантаження, залучена до черг), $\Delta f_{np}^* = \Delta f_{np} / f_0 = (f_1 - f_{ОТК1}) / f_0 = \Delta f_1^* - \Delta f_{ОТК1}^*$, $\Delta f_{ОЧЕР}^* = \Delta f_{ОЧЕР} / f_0 = (f_1 - f_N) / f_0$ - відносний діапазон уставок по частоті черг (f_N - уставка по частоті останньої черги).

З урахуванням залежності (1) P_{II}^* приблизно визначається виразом:

$$P_{PP}^* = \frac{P_{D \max}^* P_{D0}^* t_{OTK}}{T_H \Delta f_{OЧЕР}^*} \left(1 - \frac{\Delta f_1^*}{\Delta f_{уст}^*} \right), \text{ де } \Delta f_{уст}^* = -P_{D0}^* / k_H. \quad (5)$$

З виразу (5) отриманий деякий розрахунковий час відмикання навантаження t_{OTK}^{GP} визначаємо залежністю:

$$t_{OTK}^{GP} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta f_1^*}{\Delta f_{уст}^*} \right)} \frac{T_H \Delta f_{OЧЕР}^*}{P_{D \max}^*}. \quad (6)$$

Для часу t_{OTK}^{GP} P_{PP}^* саме буде дорівнювати P_{D0}^* , тобто розміру виниклого дефіциту. У протилежному разі буде або зайве вимикання навантаження, або недовимикання. Для оцінки цих чинників введено коефіцієнт α , що визначається відношенням P_{PP}^* / P_{D0}^* :

$$\alpha = \frac{P_{D \max}^* t_{OTK}}{T_H \Delta f_{OЧЕР}^*} \left(1 - \frac{\Delta f_1^*}{\Delta f_{уст}^*} \right). \quad (7)$$

У таблиці 1 наведено порівняння ефективності запропонованої АЧР, АЧР-1 і АЧР-1 з урахуванням знака похідної $\text{Sign}(V)$, що відрізняється від звичайної АЧР-1 тим, що команда на відмикання споживачів подається, якщо швидкість зміни частоти негативна. З порівняння за таблицею 1 очевидно, що запропонована АЧР має більш високу мінімальну частоту f_{\min} , а зайвого вимикання навантаження $P_{ИЗЛ}$ взагалі немає, а є невеличке недовимикання навантаження, про що свідчить негативний знак $P_{ИЗЛ}$.

Таблиця 1

Порівняння ефективності дії різноманітних видів АЧР при $t_{OTK} = 0,3с/0,4с$

Вид АЧР	Критерії оцінки	
	f_{\min} , Гц	$P_{ИЗЛ}$, о.е.
АЧР- 1	46,857/46,577	0,095/0,2
АЧР-1 з урахуванням $\text{Sign}(V)$	46,857/46,577	0,060/0,130
АЧР-1 з урахуванням t_{OTK}	47,159/47,230	- 0,010/-0,010

Дані в таблиці 1 наведені для таких вихідних даних: дефіцит $P_{D0}^* = 0,5$, $P_{D \max}^* = 0,7$, постійна інерції ЕС до виникнення дефіциту $T_H = 10с$, $f_0 = 50Гц$, $f_1 = 48,5Гц$, $f_N = 46,6 Гц$ і $N = 20$ (число черг АЧР).

Реалізацію запропонованої АЧР найпростіше здійснити за допомогою пристроїв із різними уставками по частоті і похідної. Уставка по похідній i -тої черги визначається за виразом:

$V_i = (f_1 - f_i)/(k_3 t_{отк})$, де $k_3 < 1$ - деякий коефіцієнт запасу, що враховує нелінійний характер зміни похідною частоти за часом.

У роботі запропонована двохкатегорійна АЧР, що дозволяє виключити зайве вимикання навантаження в раніш розглянутому засобі. Дана АЧР має однакову уставку за частотою $f_{зАП}$ для усіх черг і різні уставки за часом. Категорія для запобігання зниження частоти - швидкодіюче автоматичне частотне розвантаження за часом (ШАЧРЧ) вступає в дію при виконанні двох умов: $f < f_{зАП}$ і $\text{Sign}(V) < 0$, де f - поточне значення частоти. Щабель за часом δt між чергами при дії ШАЧРЧ визначається виразом: $\delta t = k_3 t_{БК}$, де k_3 - коефіцієнт запасу (приймається в діапазоні 0,5÷1,1), $t_{БК}$ - час вимикання вимикача. При великих дефіцитах із метою запобігання глибокого зниження частоти вимикається одночасно S черг, тобто витримка за часом кожної із (S-1) черг приймається рівній витримці за часом першої черги. При цьому $S = \bar{P}_S / P_{очер}$, де $\bar{\quad}$ означає цілу частину величини $P_S / P_{очер}$; P_S - сумарна потужність S черг; $P_{очер}$ - навантаження, залучене до кожної черги (передбачається, що обсяг розвантаження розподілений рівномірно між чергами). Поклавши P_S^* рівним $P_{пр}^*$, обумовленому по (5) при $t_{отк}$ рівному $T_{и}^{мин} \Delta f_{очер}^* / P_{дмак}^*$, одержимо:

$$P_S^* = \frac{V_1 T_{и}^{мин}}{f_0}, \quad (8)$$

де $T_{и}^{мин}$ - мінімальне оцінке значення постійної інерції ЕС. Подальше відмикання навантаження здійснюється за допомогою черг із різними уставками за часом з урахуванням знака похідної V, що дозволяє враховувати наявність резерву АП.

Категорія для відновлення частоти - автоматичне частотне розвантаження, що повільно діє за часом (ПАЧРЧ), виконується, як АЧР-2, але запускається при виконанні двох умов $f \leq f_{зАП}$ і $\text{Sign}(V) \geq 0$.

Для вилучення перерви при відмиканні навантаження проводиться автоматична перебудова уставок за часом черг ШАЧРЧ при роботі ПАЧРЧ і навпаки.

Проведено перевірку обґрунтування методу визначення обсягу навантаження відповідно до

виразу (8) за критерієм $\alpha \geq \beta = \frac{P_{н}^{макс}}{P_{до}}$, де $P_{н}^{макс}$ - величина навантаження, яку необхідно

відключити після виникнення великих дефіцитів із мінімальною затримкою за часом так, щоб стале відхилення частоти після її вимикання обмежити деякою заданою величиною $\Delta f_{макс}$ більше ніж (-5) Гц (робота ЕС із частотою рівної або нижче 45 Гц неприпустима).

Третій розділ присвячений дослідженню основних вузлів розробленого на кафедрі

“Електричні станції“ ХДПУ реле частоти (РЧ) РЧЧА1. Спрощена функціональна схема розробленого РЧ наведена на рис.2.

Вона містить: вимірювальну частину (ВЧ), логічну частину (ЛЧ), два реле часу для каналу АЧР - РЧС_{АЧР} і для каналу частотного автоматичного повторного вмикання (ЧАПВ) – РЧС_{ЧАПВ} і два вихідних реле: ВР_{АЧР} і ВР_{ЧАПВ}. ВЧ містить два ВОЧ, що живляться від двох незалежних джерел контролюємої напруги u_1 та u_2 і диференціатор (Д). ВОЧ і Д мають регульовані уставки f_y і V_y відповідно. ЛЧ дозволяє вибрати режим роботи РЧ і запускає РЧС при відсутності сигналів, що блокують їх дію. РЧС мають регульовані уставки за часом t_v , що подають затримку на спрацьовування ВР_{АЧР} або ВР_{ЧАПВ}.

Робота ВОЧ заснована на фіксації моментів переходу через нуль контролюємої напруги. Кожний ВОЧ являє собою імпульсний перетворювач відхилення частоти контролюємої напруги в постійну напругу виходу з формуванням на кожному періоді контролюємої напруги стабільної каліброваної вольтсекундної площі. Середнє за період T_c контролюємої напруги значення вихідної напруги ВОЧ подається таким виразом:

$$U_{CP} = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} U_{BX}(t) dt = K_{CX} \left(\frac{2T_0}{T_c} - 1 \right), \quad (9)$$

де K_{CX} - коефіцієнт пропорційності, $T_0 = T_H/2$ (T_H - період при номінальній частоті); T_0 - тривалість імпульсу стабільної каліброваної вольтсекундної площі.

Досліджено деякі похибки методу виміру частоти по моментах переходу через нуль контрольованої напруги в перехідних режимах як в енергосистемі, так і в самому реле. Аналіз впливу аперіодичної складової, що виникає при комутаціях у ЕС, дозволив установити таку закономірність: вимірювання частоти по моментах переходу через нуль перекрученої напруги з одним знаком її похідної в момент переходу через нуль більше (менше) значення частоти корисного сталого гармонійного сигналу, а вимірювання частоти по моментах переходу через нуль перекрученої напруги з протилежним знаком його похідною в момент переходу через нуль навпаки менше (більше) корисного сталого сигналу.

Установлена вище закономірність може бути використана для запобігання від помилкового спрацьовування реле. Проте, оскільки в контролюємій напругі можуть бути присутні перешкоди різних частот, у роботі розглянутий варіант фільтрації контролюємої напруги. Показано, що вхідний активний фільтр 2 - го порядку з частотою резонансу $f_p = 50$ Гц і добротністю $Q=3$ дозволяє запобігти впливу як аперіодичної складової, так і високочастотних перешкод. Для запобігання впливу власного перехідного процесу фільтра необхідно мати витримку часу в спрацьованні реле в межах 60мс, що припустимо для пристроїв АЧР.

Оскільки пристрої АЧР реагують на значення частоти, що вимірюється в умовах її зміни, то в

роботі досліджена методична похибка вимірювання частоти прийнятим методом при наявності похідної. Функція перетворення ВОЧ, що аналізується, із виділенням моментів переходу контролюємої напруги через нуль в узагальненій формі подана співвідношенням:

$$\Delta f_H = \frac{1}{T_c} - f_H, \quad (10)$$

де T_c - час між двома довільними моментами переходу через нуль з однаковим знаком похідної контролюємої напруги, яка у даному випадку подається співвідношенням:

$$u_c(t) = U_m \sin\left[2\pi\left(f_3 - \frac{1}{2}Vt\right)t\right], \quad (11)$$

де f_3 - значення частоти на початку періоду T , V - швидкість зміни частоти (покладаємо $V = \text{const}$).

Виходячи з (11), для визначення T запишемо рівняння $2\pi\left(f_3 - \frac{1}{2}VT\right)T = 2\pi$. Далі, підставивши T у функцію перетворення ВОЧ (10) замість T_c , одержимо вираз Δf_H . Дійсне відхилення частоти Δf_δ визначається співвідношенням $\Delta f_\delta = f_3 - VT - f_H$. Абсолютне значення методичної похибки δf визначимо як різницю $\Delta f_H - \Delta f_\delta$. Спрощений вираз δf з огляду на те, що $2V/f_3^2 \ll 1$, подається співвідношенням

$$\delta f \approx \frac{V}{2f_3}. \quad (12)$$

Як очевидно з (12), δf пропорційна швидкості зміни частоти. Проведено також оцінку похибки δV визначення швидкості V , коли остання визначається співвідношенням $V_{H,K} = (\Delta f_{H,K} - \Delta f_{H,K-1})/T_K$, де $\Delta f_{H,K}$, $\Delta f_{H,K-1}$ - відхилення частоти, що вимірюються наприкінці k -го і $(k-1)$ -го періодів відповідно, T_K -тривалість k -го періоду.

Аналіз результатів моделювання на ЕОМ, наведених у таблиці 2, показує, що отримані значення похибки δf^M (де індекс "м" вгорі означає результат, отриманий шляхом моделювання) не відрізняються від значення, розрахованого за аналітичним виразом (12). Як очевидно з цих даних, похибка δV^M першого виміру V досягає половини значення дійсної величини, що пояснюється відсутністю похибки при вимірі $\Delta f_{H,K}$, коли V дорівнює нулю. Тому у пристроях АЧР, що реагують на швидкість зміни частоти, її варто виключати.

У дисертації проведено аналіз закону зміни частоти і швидкості її зміни в асинхронному режимі ЕС з метою розробки більш ефективного алгоритму функціонування пристрою АЧР. Відомо, що при асинхронному режимі і синхронних хитаннях для запобігання помилкового спрацьовування пристроїв АЧР вводиться витримка часу (ВЧ) на спрацьовування вихідного реле

пристрою. Проте дана ВЧ знижує ефективність роботи АЧР у випадку виникнення дефіциту АП. Розроблений алгоритм дозволяє скоротити зазначену ВЧ. Електрична схема заміщення аналізованої ЕС подана двомашинною моделлю (рис.3).

Як відзначалося вище, використання в пристроях АЧР швидкості зміни частоти дозволяє підвищити ефективність роботи АЧР. Тому в дисертації розроблено і розглянуто новий диференціатор (Д) на основі широтно-імпульсної модуляції. Схема даного широтно-імпульсного диференціатора (ШІД) подана на рис. 4, а часові діаграми його роботи на рис.5. Диференціатор містить: ОП1, ОП2 – операційні підсилювачі, С– інтегруюча ємність, СТ – стабілітрони, ПУ – пристрій усереднення.

На базі розробленого ШІД запропоновано приблизний цифровий засіб визначення похідної. Його сутність полягає у такому: для значень V у діапазоні $0 \div 10$ Гц/с (який має місце після виникнення дефіциту АП у ЕС) тривалості T_1 й T_2 імпульсів майже пропорційні V . При цьому вимір V зводиться до виміру тривалості відповідного імпульсу, що легко здійснюється за допомогою лічильника імпульсів.

Четвертий розділ присвячений експериментальному дослідженню і розробці блокувань пристрою АЧР. Експериментальні дослідження показали, що основна приведена похибка ВОЧ при зміні частоти складає 0,005 Гц, приведена похибка ВОЧ при зміні температури від -20 до $+50^{\circ}\text{C}$ не перевищує $\pm 0,1\%$ у діапазоні частот $45 \div 55$ Гц. , зміна форми контролюємої напруги (наявність вищих гармонік) не призводить до зростання приведеної похибки ВОЧ, затримка на спрацьовування РЧ не перевищує 0,06с, відпрацьовування уставок за частотою не перевищує $\pm 0,1\%$, а за часом провадиться з приведеною похибкою менше $\pm 0,5\%$, приведена похибка перетворення Д на аналоговому виході при швидкості зміни частоти в діапазоні $0,1 \div 10$ Гц не перевищує 2,5%.

На основі встановленої вище закономірності змінення частоти при асинхронному режимі запропонован новий алгоритм функціонування пристрою АЧР. На рис.6 наведено графік зміни частоти, побудований з урахуванням (13) при $\alpha = 0,4$, $f_1 = 48$ Гц і $f_2 = 50$ Гц.

Традиційно для запобігання помилкового спрацьовування пристрою АЧР в асинхронному режимі, що має уставку по частоті f_y (рис.6), вводиться витримка часу (ВЧ) t_1 . З метою зменшення зазначеної ВЧ у роботі пропонується дозволяти роботу пристрою тільки при зниженні частоти, тобто враховувати знак похідної. При цьому необхідна ВЧ, як очевидно з рис.6, зменшується в два рази. Запропоновано алгоритм функціонування пристрою з урахуванням зазначеного чинника.

Аналіз роботи реле при різких змінах змінної напруги і напруги живлення показав, що в цих режимах можливо помилкове спрацьовування. Тому в зазначених режимах разом з введенням ВЧ, що знижує ефективність роботи АЧР, розроблені алгоритми, що блокують роботу РЧ в цих умовах.

Висновки

1. Розроблено новий алгоритм АЧР, що дозволяє визначити величину виниклого дефіциту активної потужності. При цьому на відміну від відомих алгоритмів не потрібне знання постійної механічної інерції ЕС.
2. Показано, що ефективність роботи категорії розвантаження АЧР-1 може бути поліпшена, якщо враховувати часову затримку при відмиканні навантаження після подачі команди від пристрою АЧР. Запропоновано методику реалізації АЧР з урахуванням зазначеного чинника.
3. З метою вилучення зайвого відмикання навантаження запропоновано виконувати АЧР, черги якого мають однакову уставку по частоті і різні уставки за часом, з урахуванням значення і знака похідної частоти за часом. Обґрунтовано метод визначення величини навантаження, що відмикається АЧР, за допомогою похідною.
4. Проведено порівняльний аналіз відомих методів вимірювання промислової частоти, що показав доцільність використання в пристроях АЧР методу, в основі якого лежить фіксація моментів переходу через нуль контролюємої напруги.
5. Проведено аналіз похибок, що виникають при вимірюванні частоти по моментах переходу через нуль у перехідних режимах ЕС через виникнення аперіодичної складової, а також через перехідний процес вхідного фільтра пристрою.
6. Показано, що вхідний активний смуговий фільтр другого порядку з частотою резонансу 50 Гц і добротністю 3 дозволяє знизити вплив перешкод, що виникають у перехідних режимах енергосистеми. При цьому для усунення впливу власного перехідного процесу фільтра достатньо вводити витримку часу в межах 60 мс на спрацьовування вихідного реле пристрою.
7. Отримано аналітичний вираз методичної похибки, яка обумовлена наявністю похідної, при вимірюванні частоти методом фіксації моментів переходу через нуль контролюємої напруги. У пристроях, що реагують на швидкість зміни частоти, необхідно виключити перший вимір, оскільки тільки даний вимір проводиться з великою помилкою.
8. Розроблено новий диференціатор на основі широтно-імпульсної модуляції, що дозволяє збільшити чутливість і одночасно зменшити значення опорів і ємкості конденсатора. На базі розробленого диференціатора запропоновано спрощений засіб виміру похідної.
9. Запропоновано алгоритм функціонування пристрою АЧР, який дозволяє скоротити витримку часу, що вводиться для усунення від надлишкових спрацьовувань пристроїв АЧР в асинхронному режимі.
10. На основі проведених теоретичних досліджень розроблено високоточне швидкодіюче РЧ РЧЧА-1, що успішно пройшло порівняльні випробування в Міненерго України і було рекомендовано для проведення дослідно-конструкторської розробки.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Додо Амаду М.М., Максимов В.М. Погрешность измерения частоты по моментам перехода напряжения сети через ноль // Вестник ХГПУ. – 1998. - Вып. 11. – С. 107-109.
2. Додо Амаду М.М. Повышение эффективности автоматической частотной разгрузки // Вестник ХГПУ. – 1999. - Вып.37. - С.104-110.
3. Максимов В.М., Додо Амаду М. М. Анализ поведения устройств автоматической частотной разгрузки при асинхронном режиме // Вестник ХГПУ. – 1999. - Вып. 64. – С.70-74.
4. Додо Амаду М.М., Максимов В.М. Оптимизация алгоритма частотной разгрузки. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сборник научных трудов ХГПУ. - 1998. - Ч.1. – Вып. 6. – С. 512-516.
5. Додо Амаду М.М., Максимов В.М. Цифровые алгоритмы измерения частоты для устройств частотной автоматики // Вестник ХГПУ. – 1999. - Вып. 37. - С. 98-104.
6. Додо Амаду М.М., Максимов В.М., Стабилизация работы электронных реле частоты в переходных режимах работы энергосистем // Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье: Материалы международной научно-технической конференции 12- 14 мая. Харьков, 1997. - Ч. 5. - С.270-274.
7. Кизилев В.У., Додо Амаду М.М., Кашин А.А., Максимов В.М. Простое быстродействующее электронное реле частоты // Тезисы докладов пятой Украинской научно-технической конференции. – ХГПУ, 1996. – С. 54-55.
8. Кизилев В.У., Максимов В.М., Додо Амаду М.М. Совершенствование алгоритмов работы автоматической частотной разгрузки энергосистем // Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье: Материалы международной научно-технической конференции 19-21 апреля.. Харьков, 1995. – Ч. 2. - С. 33.
9. Додо Амаду М.М. Методы измерения частоты промышленной сети // Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье: Материалы международной научно-технической конференции 19-21 апреля. Харьков, 1995. – Ч.2. - С. 31.
10. Додо Амаду М.М., Максимов В.М. Адаптивная частотная разгрузка. // Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике: Тезисы докладов пятой Украинской научно-технической конференции. – ХГПУ, 1996. – С. 33.
11. Додо Амаду М.М., Максимов В.М. Оптимизация переходного процесса АЧР при использовании производной частоты. Тезисы докладов пятой Украинской научно-технической конференции. – ХГПУ, 1996. – С. 34.
12. Максимов В.М., Додо Амаду М.М. Принципы выполнения органов выдержки времени реле частоты // Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье: Труды международной научно-технической конференции 12-14 мая. Харьков, 1997. - Ч. 5. - С. 270-274.

АНОТАЦІЇ

Додо Амаду М.М. Пристрої автоматичного частотного розвантаження енергосистем.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності роботи алгоритмів і пристроїв автоматичного частотного розвантаження (АЧР). У роботі запропонований новий алгоритм, що дозволяє визначити величину виниклого дефіциту активної потужності, у якому виключені параметри енергосистеми. Розглянуто засіб підвищення ефективності роботи АЧР-1 шляхом урахування запізнювання при відмиканні навантаження. Теоретично обґрунтований метод визначення величини навантаження, що відмикається, який використовує значення швидкості зниження частоти. На підставі порівняльного аналізу різноманітних методів вимірювання промислової частоти в роботі зроблено висновок про доцільність використання в пристроях АЧР методу, в основі якого лежить фіксація моментів переходу через нуль контролюємої напруги. Проведено аналіз деяких похибок виміру частоти даним методом при перехідних режимах як в енергосистемі, так і в самому реле. На основі цього аналізу запропоновані прості й ефективні заходи для зниження їхнього впливу. Розроблено новий диференціатор на основі широтно-імпульсної модуляції, що придатний для диференціювання сигналів, які повільно змінюються. Запропоновано алгоритм функціонування пристроїв АЧР, що дозволяє скоротити витримку часу, яка вводиться для усунення надлишкових спрацьовувань в асинхронному режимі. Проведені теоретичні дослідження використані в розробленому на кафедрі “Електричні станції” ХДПУ реле частоти РЧЧА-1, що має ефективний алгоритм функціонування і поліпшені технічні характеристики.

Ключові слова: частотне розвантаження, пристрої, енергосистема, дефіцит, частота, вимірювання, аналіз, диференціатор.

Додо Амаду М.М. Устройства автоматической частотной разгрузки энергосистем.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности работы алгоритмов и устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР). В работе предложен новый алгоритм, позволяющий определить величину возникшего дефицита активной мощности, в котором исключены параметры энергосистемы. Рассмотрен способ повышения эффективности работы АЧР-1 путем учета запаздывания при отключении нагрузки. Теоретически обоснован метод определения величины

отключаемой нагрузки, использующий значение скорости снижения частоты. На основании сравнительного анализа различных методов измерения промышленной частоты в работе сделан вывод о целесообразности использования в устройствах АЧР метода, в основе которого лежит фиксация моментов перехода через ноль контролируемого напряжения. Проведен анализ некоторых погрешностей измерения частоты данным методом при переходных режимах как в энергосистеме, так и в самом реле. На основе этого анализа предложены простые и эффективные меры для снижения их влияния. Разработан новый дифференциатор на основе широтно-импульсной модуляции, который пригоден для дифференцирования медленно изменяющихся сигналов. Предложен алгоритм функционирования устройств, позволяющий сократить выдержку времени, которая вводится для отстройки от избыточных срабатываний в асинхронном режиме. Проведенные теоретические исследования использованы в разработанном на кафедре “Электрические станции” ХГПУ реле частоты РЧЧА-1, имеющем эффективный алгоритм функционирования и улучшенные технические характеристики.

Ключевые слова: частотная разгрузка, устройства, энергосистема, дефицит, частота, измерение, анализ, дифференциатор.

Dodo Amadou M. M. Device of Automatic Load Shedding for Power Systems. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D's degree by speciality 05.13.05 – Elements and Devices of Computing Technology and Control Systems. The dissertation is devoted to problems of improving the effectiveness of algorithms and devices of underfrequency automatic load shedding (UALS). A new algorithm based on the parameter identification techniques allowing to determine the amount of active power deficit has been developed. In comparison with the known one the proposed algorithm does not require the inertia constant of the power system as input data. Moreover, the proposed algorithm requires little computational effort. Analytical investigations of the multistage load shedding have been carried out. Analytical expression of the amount of the load that must be disconnect with minimum time delay is obtained. Based on these analytical investigations an UALS taking into account the time delay required to disconnect the load is proposed. Comparison of three load shedding schemes (traditional multistage load shedding, load shedding taking into account the sign of the rate of frequency change, and the proposed load shedding) is carried out by computer simulations. Analysis of the simulation results confirm the effectiveness of the proposed load shedding. Moreover, based on these analytical investigations, recommendations have been made in order to optimise the performance of load shedding in which frequency as well as rate of frequency change are used. Methods of implementation the proposed algorithms for load shedding are discussed. On the basis of comparative analysis of various methods of system frequency measurement, it has been concluded that the method based on zero crossing detection of the controlled voltage is more convenient for devices of the UALS. The measurement of system frequency by the given method is simple and accurate at normal

conditions. However, in transient state both in the power system and in the device the presence of the aperiodic component gives rise to large errors. In order to investigate the influence of the aperiodic component in the power system, controlled voltage composed of sinusoidal signal and an aperiodic component is considered. Based on the analysis of the measured frequencies a new regularity in the change of the measured frequencies has been established: depending on the sign of the aperiodic component the measured frequencies corresponding to zero crossing with positive sign of the derivative of the controlled voltage are larger (less) than the frequency of the sinusoidal signal. On the contrary, the measured frequencies corresponding to zero crossing with negative sign of the derivative of the controlled voltage are less (larger) than the frequency of the sinusoidal signal. The results obtained from computer simulation confirm the validity of the established regularity. The obtained regularity is used to prevent unnecessary relay tripping. An alternative approach to cope with the aperiodic component is analysed. It is shown that an active band-pass filter can sufficiently attenuate the aperiodic component. The influence of the transient component of the proposed filter is analysed. It has shown that a temporary relay disarming during three cycles is sufficient to prevent unnecessary relay tripping. It is shown that there is an error in the measured frequency of sinusoidal signal whose frequency changes at constant rate. Analytical expression of this error is obtained. This error is proportional to the rate of frequency change and inversely proportional to the initial frequency of the sinusoidal signal. Results obtained through computer simulation agree well with theory. From this analysis it is concluded that for the values of the rate of the change of the frequency during power imbalance the error in the frequency measurement is small, but this error gives rise to a large error in the first measured rate of the change of the frequency after the occurring of the power imbalance. Therefore, it is recommended to exclude this first measured rate of the frequency change. On the basis of the analysis of the regularity of the frequency change during asynchronous mode an algorithm of functioning for device of UALS allowing to reduce intentional time delay, which is introduced, to prevent false operations is proposed. A new differentiator based on pulse-width modulation, which is suitable for differentiation of slowly varied signals such as a signal proportional to power system frequency during active power imbalance, is developed. The proposed differentiator has both analog and digital outputs. On the basis of the developed differentiator a simple approach for differentiation is proposed. With this approach measurement of the rate of change of the frequency results in the measurement of time interval. These studies have been used to design a device of UALS with an effective functioning algorithm and improved technical characteristics in Electric Power Stations Faculty of Kharkiv State Polytechnical University.

Keywords: load shedding, device, power system, deficit, frequency, measurement, analysis, differentiator.

Додо Амаду Маман Мустафа

Пристрої автоматичного частотного розвантаження енергосистем

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

**Спеціальність 05.13.05 - елементи та пристрої обчислювальної
техніки та систем керування**

Відповідальний за випуск — к.т.н., доц. Смелянський І.І.

Підп. до друку 19.10.2000 р. Формат видання 145x215. Формат паперу 60x90/16.
Папір СоруРех. Друк - ризографія. Обсяг 0,9 авт.арк. Тираж 100. Зам. 33-10.

Надруковано на ризографі ХДПУ.
310002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.