

УДК 621.314.222

С. М. Левицький, к. т. н.; О. О. Матієнко

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНТРОЛЕРА TWIDO

У роботі запропоновано застосування мікропроцесорного контролера Twido в системах електропостачання з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги. Розроблено функціональну та програмну реалізацію мікроконтролера, яка відрізняється від відомих застосувань функції ПІД-регулятора для визначення знаку похідної огинаючої реактивної потужності й дозволяє оптимізувати тривалість виконання циклу програми.

Ключові слова: мікроконтролер, регулювання.

Вступ

Важливою перевагою застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК) для систем регулювання напруги є можливість створення програмного забезпечення з урахуванням багаторічного досвіду проектування, наладки та експлуатації автоматичних регуляторів. Крім того, ПЛК серійного виробництва мають набагато більшу гнучкість у вирішенні завдань контролю, регулювання, діагностування, аніж їхні мікропроцесорні аналоги, виконані як готовий виріб.

У роботі [1] запропоновано застосування ПЛК як первинної базової структури інформаційно-вимірювальних систем в електроенергетиці, однак відсутні конкретні програмні рішення щодо розробок. У роботі [2] обґрунтовано та запропоновано застосування пристроїв керування системами електропостачання підприємств електromеталургії на базі ПЛК, але не враховано особливості експлуатації зношених пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН), у тому числі для трансформаторів поперечного регулювання (ТПР). Тому завдання створення пристроїв автоматичного керування трансформаторами на базі ПЛК є актуальним.

Закон керування трансформатором поперечного регулювання

Під час застосування ТПР слід одночасно здійснювати корекцію режиму систем електропостачання за напругою, що зумовлює застосування сумісного поздовжньо-поперечного регулювання напруги.

У роботах [3, 4] запропоновано систему автоматичного керування пристроями РПН для трансформаторного комплексу з поздовжньо-поперечним регулюванням напруги, яка функціонує згідно із законом (1).

$$u_y(t) = k_1 [U_{наб}(t) - U_y] - k_2 (I_{наб}(t) - I_{min}); \quad u_x(t) = k_3 [Q_{зад} - Q(t)] + k_4 (P(t) - P_{зад});$$

$$k_i = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{ни}}, \text{ я якщо } \begin{cases} u_y(t) < u_{нз,y}; \\ u_y(t-\tau) < u_{нз,y}; \\ \frac{dU_{наб}(t)}{dt} < 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{ни}}, \text{ я якщо } u_{нз,y} \leq u_y(t) \leq u_{вз,y}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{ни}}, \text{ я якщо } \begin{cases} u_y(t) > u_{вз,y}; \\ u_y(t-\tau) > u_{вз,y}; \\ \frac{dU_{наб}(t)}{dt} > 0; \end{cases} \end{cases} \quad k_j = \begin{cases} \frac{U_{j+1}}{U_{ви}}, \text{ я якщо } \begin{cases} u_x(t) < u_{нз,x}; \\ u_x(t-\tau) < u_{нз,x}; \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0; \end{cases} \\ \frac{U_j}{U_{ви}}, \text{ я якщо } u_{нз,x} \leq u_x(t) \leq u_{вз,x}; \\ \frac{U_{j-1}}{U_{ви}}, \text{ я якщо } \begin{cases} u_x(t) > u_{вз,x}; \\ u_x(t-\tau) > u_{вз,x}; \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0; \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

де k_i – коефіцієнт трансформації на i -ому відгалуженні обмотки ВН; U_y – задане значення напруги на виводах споживачів; $U_{наб}(t)$ – дійсне значення напруги на виводах споживачів; U_i – ЕРС, що індукється в обмотці ВН на i -ому відгалуженні; k_1 – коефіцієнт, що характеризує чутливість регулятора напруги; k_2 – коефіцієнт, що визначає нахил характеристики зустрічного регулювання напруги, $k_2 = 0,05 \cdot U_{ном} / (I_{max} - I_{min})$; I_{min} – струм навантаження в режимі мінімуму; $I_{наб}(t)$ – фактичне значення струму навантаження; $dU(t)/dt$ – похідна огинаючої контрольованої напруги; $u_{вз,y}$, $u_{нз,y}$, $u_{вз,x}$, $u_{нз,x}$ – верхня та нижня межі зон нечутливості, що задаються, виходячи з умов надійності та точності підтримання регульованого параметра, відповідно за поздовжнім та поперечним складникам; $u_y(t)$ – напруга на виході силового трансформатора; $u_x(t)$ – напруга на виході ТПР; U_j – ЕРС, що індукється в живильній обмотці ТПР на j -ому відгалуженні; k_j – коефіцієнт трансформації на j -ому відгалуженні ТПР; $Q_{зад}$ – задане значення реактивної потужності, що визначає стійкий режим мережі з мінімальними відхиленнями напруги у вузлах електропостачання; k_3 – коефіцієнт, що враховує чутливість пристрою автоматичного керування положенням РПН ТПР; $dQ(t)/dt$ – похідна огинаючої реактивної потужності, яка перетікає через трансформаторну підстанцію з ТПР. Структурна схема такої системи регулювання напруги представлена на рис. 1.

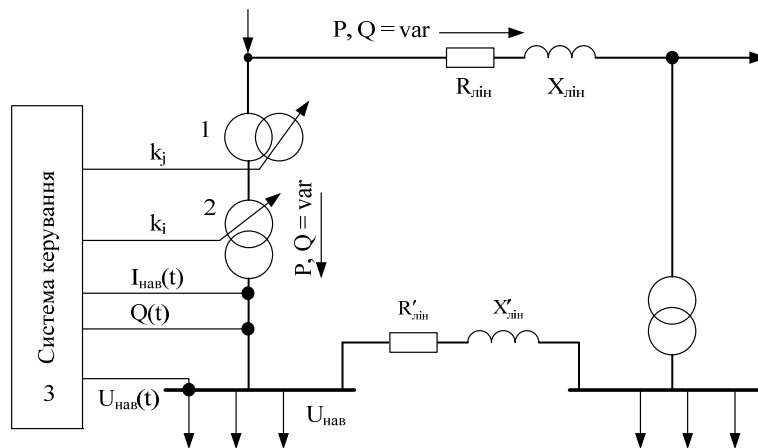


Рис. 1. Структурна схема системи електропостачання з трансформатором поперечного регулювання та силовим трансформатором з РПН: 1 – трансформатор поперечного регулювання (ТПР), 2 – силовий трансформатор з РПН, 3 – система керування

Віртуальна модель та програма керування контролера

Функціональна схема системи керування 3 з використанням програмованого логічного контролера, матиме вигляд, представлений на рис. 2.

Для організації керування трансформаторним комплексом вибрано модульний контролер *Twido TWDLMDA20DTK* з безінерційними транзисторними дискретними виходами 24 В постійного струму, людино-машинний інтерфейс на базі операторської панелі *XBTR410*, що дозволяє проводити налагодження уставок та зони нечутливості регулятора з використанням протоколу віддаленого доступу *Modbus* [5].

Вихідними сигналами пристрою керування служать дискретні виходи контролера $\%Q0.1$ – $\%Q0.4$, що комутують пускачі електроприводів РПН в напрямку на збільшення та на зменшення коефіцієнтів трансформації k_i силового трансформатора та k_j трансформатора поперечного регулювання відповідно.

Базовий контролер має лише один вбудований аналоговий вхід, а для системи керування слід мати не менше чотирьох (за активною та реактивною потужністю, напругою та струмом навантаження), тому в конфігурації базового модуля необхідно передбачити модуль розширення аналогових входів з уніфікованими струмовими сигналами 0 – 20 мА *TWDAMI4LT* (на 4 входи). Для узгодження сигналів з вимірювальних трансформаторів напруги та струму (ТН та ТС відповідно) передбачено вимірювальні перетворювачі напруги ПН та струму ПС типу ТІТ [6], а також вимірювальні перетворювачі активної та реактивної потужності (ПАП та ПРП відповідно) типу Е849-М1 [7], що мають клас точності 0,5 та сертифіковані виробниками як швидкодіючі вимірювальні перетворювачі.

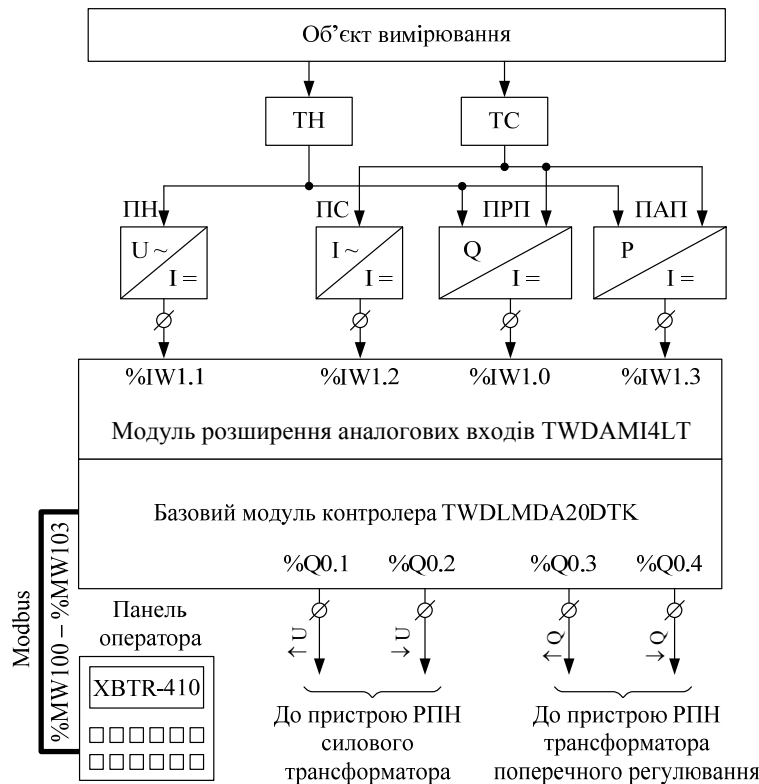


Рис. 2. Функціональна схема системи керування пристроями РПН трансформаторів

Віртуальна модель такої системи керування наведена на рис. 3.

Модуль розширення аналогових входів, доданий до базової конфігурації контролера, при звертанні до нього програми контролера, матиме внутрішній індекс змінних 1, а входам / виходам базового модуля присвоюються індекси 0.

Запропонована структура працює таким чином. Вхід $\%I0.0$ ініціалізує виконання програми, тобто переводить контролер у режим *RUN*. Для внутрішнього біта $\%M1$ організовується цикл, який періодично активує його. Період активації біта $\%M1$ відповідає формуванню імпульсів з тривалістю, необхідною для спрацювання ланки увімкнення

електроприводу РПН, та паузою, яка відповідає часу затримки формування сигналу керування τ (1). Таку ж функцію виконує внутрішній біт пам'яті контролера $\%M5$, але тривалість паузи між його активаціями відповідає часу переміщення пристрою РПН трансформатора з одного положення в сусіднє, тобто стану системи керування в режимі перемикання.

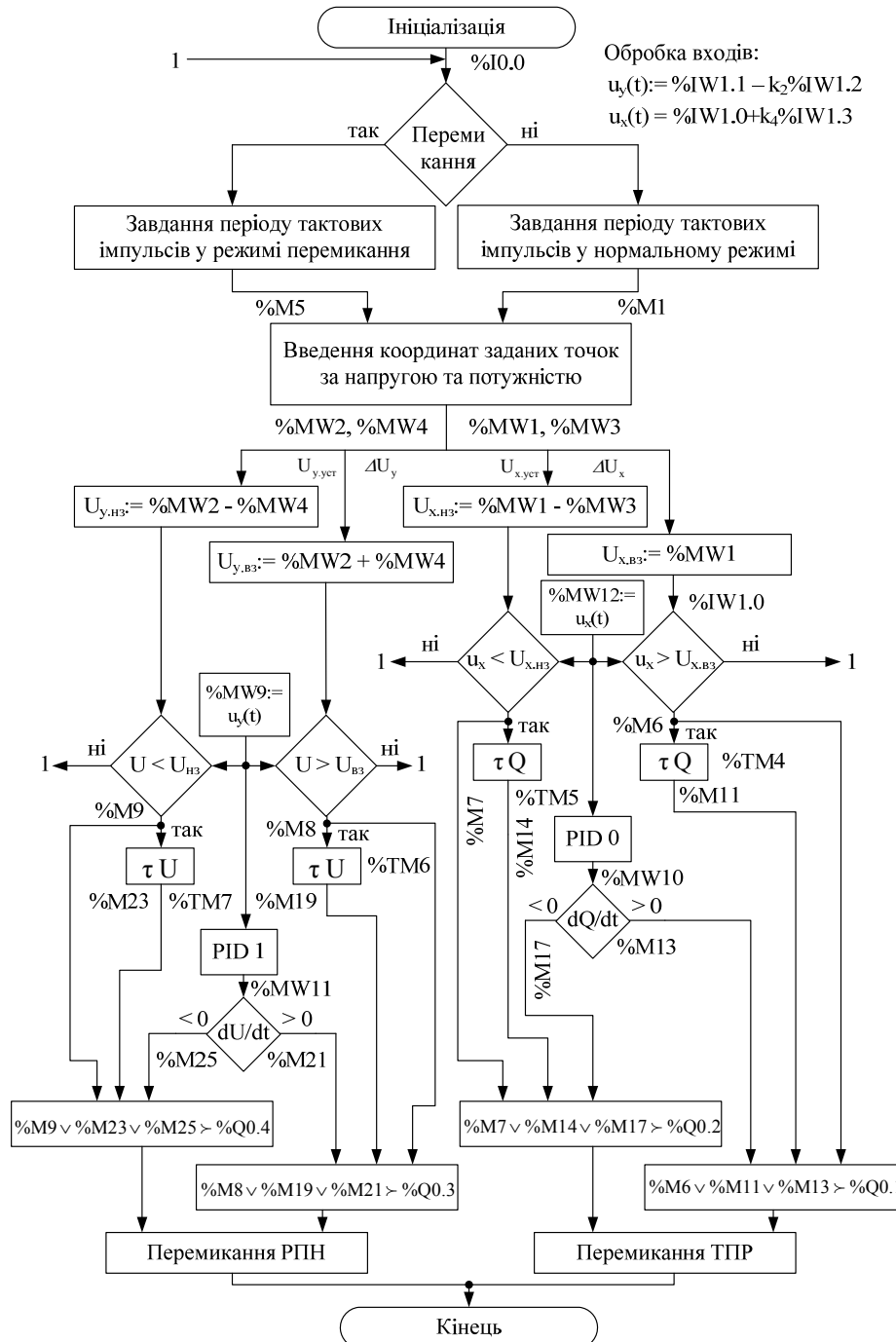


Рис. 3. Віртуальна модель програмованого контролера для системи керування трансформаторним комплексом

Внутрішнім регістрам (словом) пам'яті контролера $\%MW1$ та $\%MW2$ з допомогою введених в операторській панелі значень $\%MW100 - \%MW103$ присвоюються значення уставки регулятора за подовжнім та поперечним складникам напруги на вимірювальному органі регулятора, а словам $\%MW3$ та $\%MW4$ – значення зон нечутливості регулятора також

за подовжнім та поперечним складникам відповідно. У словах контролера $\%MW5$ та $\%MW6$ записують результати обчислення верхньої та нижньої меж відхилення поперечного складника закону регулювання U_x , а в словах $\%MW7$ та $\%MW8$ – за подовжнім складником U_y .

Сигнали з вимірювальних перетворювачів ПАП, ПРП, ПН та ПС, які надійшли на входи модуля розширення, зчитуються програмою та записуються у відповідних словах контролера $\%IW1.0$, $\%IW1.1$, $\%IW1.2$ та $\%IW1.3$ (рис. 2). Значенню внутрішнього слова $\%MW0$ присвоюється результат обчислення струмової компенсації в законі регулювання, а значенню слова $\%MW9$ – величина, що відповідає напрузі u_y на вимірювальному органі регулятора (відповідно до рис. 3, фактичне значення поперечного складника напруги на вимірювальному органі регулятора $u_x(t)$ отримується шляхом арифметичних операцій згідно (1) зі словами $\%IW1.0$ та $\%IW1.3$ та записується в слово $\%MW12$).

Далі виконання програми контролером розділяється на два напрямки: формування сигналів керування пристроєм РПН трансформатором подовжнього регулювання та пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання. Розглянемо детально роботу програми, яка відповідає тракту керування трансформатором поперечного регулювання.

Якщо значення слова $\%MW9$ є меншим за значення, записане в реєстрі $\%MW7$ (нижня уставка за напругою), то активується біт $\%M9$, якщо ж це значення є більшим за вміст реєстра $\%MW8$ (верхня уставка за напругою), то активується біт $\%M8$. Затримка часу τ на формування сигналу керування задається в цьому каналі таймерами $\%TM6$ та $\%TM7$ по каналах формування сигналу «Збільшити» та «Зменшити» відповідно. Якщо, наприклад, напруга на затискачах навантаження вийшла за межі зони нечутливості в сторону збільшення і за час τ не повертається в неї, то біт $\%M8$ активний протягом цього часу, а це призводить до активації виходу таймера $\%TM6$ та пов'язаного з ним біта $\%M19$.

Знак похідної огинаючої напруги обчислюється за допомогою вбудованої функції PID 1 та елемента порівняння (послідовність налаштування цієї функції на обчислення похідної огинаючої напруги описано далі). Похідна огинаючої напруги записується функцією PID 1 у внутрішній реєстр $\%MW11$, якщо вміст цього реєстру додатний чи дорівнює 0, то активується біт $\%M21$, а якщо від'ємний (чи дорівнює 0), то активується біт $\%M25$. Отже, якщо напруга на вводах споживачів перевищує значення зони нечутливості (біт $\%M8$) та не повертається в неї протягом часу τ (біт $\%M19$) і при цьому немає тенденції до зниження (похідна огинаючої дорівнює 0 або додатня – біт $\%M21$), то контролер формує сигнал на проведення перемикання пристроєм РПН силового трансформатора в сторону зниження напруги. Біти $\%M21$ та $\%M25$ інверсні, тобто, якщо похідна огинаючої напруги була додатною, а потім стала дорівнювати 0, то активний біт $\%M21$, якщо ж напруга знижується, то похідна напруги стає від'ємною, що призводить до скиду біта $\%M21$ та встановлення біта $\%M25$. Решта каналів формування сигналів на перемикання пристроїв РПН працює аналогічно.

Важливим етапом у процесі розробки програми є організація контурів обчислення похідної регульованого параметра. Для цього, відповідно, конфігуруються два ПД-регулятори (PID 0 – для обчислення похідної огинаючої реактивної потужності, PID 1 – для обчислення похідної огинаючої напруги). Згідно з теорією автоматичного керування, ПД-регулятор формує на своєму виході сигнал пропорційний до величини, тривалості та швидкості відхилення регульованого параметра від заданого значення [8]. Тобто на вході ПД-регулятора наявний сигнал, еквівалентний різниці фактичного значення параметра й заданого. У нашому випадку, якщо сигнал заданого значення (*setpoint*) встановити таким, який дорівнює 0, то на вході ПД-регулятора отримаємо інверсне значення вимірюваного параметра (для від'ємного зворотного зв'язку). Тому в програмному забезпеченні вихідний сигнал ПД-регулятора слід інвертувати (*action – invert*), а також встановити нульові значення коефіцієнта підсилення та часу інтегрування [5].

Для обміну даними між програмованим контролером та панеллю оператора слід в якості

заданих величин уставок та зон нечутливості регулятора використовувати такі адреси слів користувача, які потім будуть пов'язані із значеннями полів введення даних панелі. Таке завдання вирішується при конфігурації панелі оператора з допомогою програмного забезпечення (наприклад, *XBT-L1000*). Паралельно з присвоєнням значень слів контролера потрібно узгодити мережеве призначення контролера та панелі, встановивши панель в режим головного (*master*), а контролер – в режим підпорядкованого пристрою (*slave*) з відповідною адресою в мережі.

Приклад. Програма керування контролера, розроблена в середовищі *TwidoSoft* на мові *List Instruction* відповідно до запропонованої віртуальної структури (рис. 3).

```

LD %I0.0.0 LD Q          [%MW9:=%IW0.1.1 ST %Q0.0.1 ANDN %M19
ANDN %M4   R %M5          -%MW0] LD [%MW12<=0] S %M21
S %M0      R %M2          LD [%MW9>%MW7] AND %M7 LD %M9
BLK %TM0   END_BLK       ST %M8 ST %M16 R %M21
LD %M0     LD %M1         LD [%MW9<%MW8] BLK %TM5 LD %M21
IN         OR %M2         ST %M9 LD %M7 AND %M8
OUT_BLK    ST %M3         LD %I0.0.0 IN AND %M19
LD Q       LD %I0.0.0     [PID 0] OUT_BLK ANDN %I0.0.2
S %M1      [%MW1:=%MW100] LD %I0.0.0 LD Q ST %Q0.0.3
END_BLK    LD %I0.0.0     [PID 1] ST %M14 BLK %TM7
BLK %TM1   [%MW2:=%MW101] LD %I0.0.0 END_BLK LD %M9
LD %M1     LD %I0.0.0     [%MW12:=%MW10*% LD %M14 IN
IN         [%MW3:=%MW102] KWL] AND %M3 OUT_BLK
OUT_BLK    LD %I0.0.0     LD %I0.0.0 ST %M15 LD Q
LD Q       [%MW4:=%MW103] [%MW13:=%MW11*% LD %M16 ST %M22
R %M0      LD %I0.0.0     KWL] ANDN %M15 END_BLK
R %M1      [%MW5:=%MW1] LD [%MW12>=0] S %M17 LD %M22
END_BLK    LD %I0.0.0     AND %M6 LD %M6 AND %M3
LD %Q0.0.1 [%MW6:=%MW1-%MW3] ST %M12 R %M17 ST %M23
OR %Q0.0.2 LD %I0.0.0     BLK %TM4 LD %M17 LD [%MW13<=0]
OR %Q0.0.3 [%MW7:=%MW2+%MW4] LD %M6 AND %M7 AND %M9
OR %Q0.0.4 LD %I0.0.0     IN AND %M15 ST %M24
S %M4      [%MW8:=%MW2-%MW4] OUT_BLK ANDN %I0.0.2 LD %M24
LD %I0.0.1 LD [%IW0.1.0> LD Q ST %Q0.0.2 ANDN %M23
R %M4      %MW5] ST %M10 BLK %TM6 S %M25
LD %M4     ST %M6 END_BLK LD %M8 LD %M8
S %M5     LD [%IW0.1.0< LD %M10 IN R %M25
BLK %TM2   %MW6] AND %M3 OUT_BLK LD %M25
LD %M5     ST %M7 ST %M11 LD Q AND %M23
IN         LD %I0.0.0 LD %M12 ST %M18 AND %M9
OUT_BLK    [%MW0:=%IW0.1.2 / ANDN %M11 END_BLK ANDN %I0.0.2
LD Q       10] S %M13 LD %M18 ST %Q0.0.4
S %M2     LD %I0.0.0 LD %M7 AND %M3 LD %I0.0.2
END_BLK    [%MW12:=%IW0.1.0+ R %M13 ST %M19 ST %Q0.0.5
BLK %TM1   0.2*IW0.1.3] LD %M13 LD [%MW13>=0] LD %M3
LD %M2     AND %M6 AND %M8 AND %M8 ST %Q0.0.6
IN         AND %M11 ST %M20 END
OUT_BLK    ANDN %I0.0.2 LD %M20

```

Нижче наведено таблиці параметрів налагодження контурів *PID 0* та *PID 1*.

```

PID 0: configured
+-----+-----+
|Operating mode: PID          |          |          |
|PID Status: Inhibit         |          |          |
+-----+-----+
|Current value: %IW1.0       |          |          |
|Conversion: Inhibit         |Min:      |Max:      |
|Alarms: Allow               |Low: 5    |Output: %Q0.7 |
|                             |High: 95  |Output: %Q0.8 |
+-----+-----+
|Setpoint:                   |          |          |
|Kp: %KW0                    |Ti: 0     |Td: 10      |
|Sampling period: 20         |          |          |
+-----+-----+
|AT mode: Inhibit            |Limit:     |Output:     |
+-----+-----+
|Action: Invert              |          |          |
|Thresholds: Allow           |Min: %KW2  |Max: %KW3   |
|Manual mode: Inhibit        |Output:    |            |
|Digital output: %MW10       |          |            |
|PWM: Inhibit                |Period:    |Output:     |
+-----+-----+

```

Рис. 4. Вікно параметрів налагодження контуру ПІД-регулятора PID 0

Поточне значення вимірюваного параметра (*current value*) вибраного ПІД-регулятора зазначається в програмі зовнішньою змінною контролера – словом *%IW1.0*, у цьому ж рядку вказується діапазон зміни вхідного слова – від 5 до 95 технологічних одиниць. При виході вимірюваного параметра в сторону зменшення поза вказаний діапазон налагоджується спрацювання дискретного виходу *%Q0.7* для повідомлення диспетчера про критичне зниження вимірюваного параметра, аналогічно налагоджується спрацювання дискретного виходу *%Q0.8* при виході вимірюваного параметра за межі діапазону в сторону збільшення. Вибране значення коверсії сигналу (*conversion: inhibit*) вказує, що сигнал з вимірювального порту *%IW1.0* надходить на вхід ПІД-регулятора без змін (множення на коефіцієнт, зміщення нуля тощо).

Оскільки функція ПІД використовується у пристрої для обчислення похідної, то значення завдання параметра, сталої часу інтегрування (*Setpoint* та *Ti*) встановлюються такими, що дорівнюють 0, а значення коефіцієнта підсилення регулятора таким, що дорівнює 1 і задається внутрішньою константою *%KW0*.

Вкладка АТ (*auto-tuning: inhibit*) вибраного ПІД-регулятора дозволяє провести автоматичну настройку параметрів регулятора у відповідності до заданого діапазону зміни вхідного сигналу та вихідного завдання. Для активації функції АТ слід при конфігурації ПІД регулятора вибирати робочий режим не просто *PID*, а *PID+AT*.

У вкладці виходу (*output*) ПІД-регулятора інверсна вихідна дія (*action: invert*) встановлюється для отримання коректного значення похідної. Це вимагає алгоритм роботи системи керування, адже диференціал від вимірюваного параметра береться в ланці від'ємного зворотного зв'язку, тому для отримання прямого значення похідної вихідний сигнал каналу ПІД-регулятора інвертують. Вихідний сигнал, що несе інформацію про похідну, записується у внутрішнє слово контролера *%MW10* (*digital output*) і далі використовується програмою відповідно до віртуальної структури контролера (рис. 4).

Висновки

Розроблено функціональну та програмну реалізацію мікропроцесорного пристрою керування трансформаторним комплексом для поздовжньо-поперечного регулювання напруги на базі серійного мікропроцесорного контролера, що відрізняється від відомих застосуванням функції ПІД-регулятора для визначення знаку похідної огибаючої реактивної потужності і дозволяє оптимізувати тривалість виконання циклу програми, а також підвищити гнучкість системи керування за рахунок використання готових модулів контролера та адаптованого програмного забезпечення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чичёв С. И. Информационно-измерительная система центра управления электрических сетей / С. И. Чичёв, В. Ф. Калинин, Е. И. Глинкин. – М.: Машиностроение. – 2009. – 176 с. – ISBN 978-5-94275-506-5.
2. Труфанов И. Д. Научные основы разрешения инновационных проблем идентификации в системах автоматизации процессов электрометаллургии стали и сплавов / И. Д. Труфанов, А. П. Лютый и др. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/10(45). – С. 8 – 23.
3. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. – К.: Техника, 1985. – 104 с.
4. Грабко В. В. Система регулювання напруги електричної мережі за умови обмеженого споживання реактивної енергії / В. В. Грабко, С. М. Левицький. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика». – 2007. – С. 536 – 538.
5. Twido. Программируемые контроллеры. Справочное руководство по программному обеспечению. – Schneider Electric. – Telemecanique. – TWDUSE10AF ver 2.1 – 2004. – 478 с.
6. Аналоговые измерительные преобразователи переменного тока и напряжения переменного тока ТИТ. – Vertesz electronics. – ТИТ_02VSD. – 2008. – 2 с. – [Электронный ресурс] – Режим доступа до каталогу: – <http://www.vertesz.ru/product/pdf/ТИТ.pdf>
7. Преобразователь измерительный активной и реактивной мощности трехфазного тока типа E849-M1 / Описание. – ИТЦ "ЛаборКомплектСервис". [Электронный ресурс]. – Режим доступа до каталогу: <http://www.measurement.ru/gk/electro/04/02/026.htm>
8. Astrom Kristofer J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd Edition / K. J. Astrom, T. Hagglund. – ISA, Research Triangle Park, NC, USA. – 1995. – 456 p.

Левицький Сергій Михайлович – к. т. н., доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, +38 (0432) 598-167 leviserg@rambler.ru

Матієнко Олег Олександрович – студент факультету електромеханіки, електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.