

УДК 621.314.222

**С. М. Левицкий, к. т. н., доц.; О. А. Матиенко****МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ  
ТРАНСФОРМАТОРОМ ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРОЛЛЕРА TWIDO**

*В работе предлагается использование микропроцессорного контроллера Twido в системах электроснабжения с продольно-поперечным регулированием напряжения. Разработана функциональная и программная реализация микроконтроллера, которая отличается от известных использованием функции ПИД-регулятора для определения знака производной огибающей реактивной мощности и позволяет оптимизировать длительность выполнения цикла программы.*

**Ключевые слова:** микроконтроллер, регулирование.

**Введение**

Важным преимуществом использования программируемых логических контроллеров (ПЛК) для систем регулирования напряжения является возможность создания программного обеспечения с использованием накопленного опыта проектирования, настройки и эксплуатации автоматических регуляторов. Кроме того, ПЛК серийного производства владеют большей гибкостью в решении задач контроля, регулирования, диагностирования, чем их микропроцессорные аналоги, созданные как готовое изделие.

В работе [1] предлагается использование ПЛК как первичной базовой структуры информационно-измерительных систем в электроэнергетике, однако отсутствуют конкретные программные решения относительно разработок. В работе [2] обосновано и предложено использование устройств управления системами электроснабжения предприятий электрометаллургии на базе ПЛК, но не приняты во внимание особенности эксплуатации изношенных устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), в том числе для трансформаторов поперечного регулирования (ТПР). Поэтому задача создания устройств автоматического управления трансформаторами на базе ПЛК является актуальной.

**Закон управления трансформатором поперечного регулирования**

При использовании ТПР следует одновременно проводить коррекцию режима систем электроснабжения по напряжению, что обуславливает использование совместного продольно-поперечного регулирования напряжения.

В работах [3, 4] предложена система автоматического управления устройствами РПН для трансформаторного комплекса с продольно-поперечным регулированием напряжения, которая функционирует в соответствии с законом регулирования (1).

$$\begin{aligned}
 u_y(t) &= k_1 [ (U_{наб}(t) - U_y) - k_2 (I_{наб}(t) - I_{min}) ]; \quad u_x(t) = k_3 [ (Q_{зад} - Q(t)) + k_4 (P(t) - P_{зад}) ]; \\
 k_i &= \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{ни}}, \text{ е если } \begin{cases} u_y(t) < u_{нз,y}; \\ u_y(t-\tau) < u_{нз,y}; \\ \frac{dU_{наб}(t)}{dt} < 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{ни}}, \text{ е если } u_{нз,y} \leq u_y(t) \leq u_{вз,y}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{ни}}, \text{ е если } \begin{cases} u_y(t) > u_{вз,y}; \\ u_y(t-\tau) > u_{вз,y}; \\ \frac{dU_{наб}(t)}{dt} > 0; \end{cases} \end{cases} & \quad k_j = \begin{cases} \frac{U_{j+1}}{U_{вн}}, \text{ е если } \begin{cases} u_x(t) < u_{нз,x}; \\ u_x(t-\tau) < u_{нз,x}; \\ \frac{dQ(t)}{dt} > 0; \end{cases} \\ \frac{U_j}{U_{вн}}, \text{ е если } u_{нз,x} \leq u(t) \leq u_{вз,x}; \\ \frac{U_{j-1}}{U_{вн}}, \text{ е если } \begin{cases} u_x(t) > u_{вз,x}; \\ u_x(t-\tau) > u_{вз,x}; \\ \frac{dQ(t)}{dt} < 0; \end{cases} \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $k_i$  – коэффициент трансформации на  $i$ -ом ответвлении обмотки ВН;  $U_y$  – заданное значение напряжения на выводах потребителей;  $U_{наб}(t)$  – действительное значение напряжения на выводах потребителей;  $U_i$  – ЭДС, индуцируемая в обмотке высокого напряжения (ВН) на  $i$ -ом ответвлении;  $k_1$  – коэффициент чувствительности регулятора напряжения;  $k_2$  – коэффициент наклона характеристики встречного регулирования напряжения,  $k_2 = 0,05 \cdot U_{ном} / (I_{max} - I_{min})$ ;  $I_{min}$  – ток нагрузки в режиме минимума;  $I_{наб}(t)$  – фактическое значение тока нагрузки;  $dU(t)/dt$  – производная огибающей контролируемого напряжения;  $u_{вз,y}$ ,  $u_{нз,y}$ ,  $u_{вз,x}$ ,  $u_{нз,x}$  – верхняя и нижняя границы зон нечувствительности, которые задаются, исходя из условий надежности и точности поддержки регулируемого параметра, соответственно по продольной и поперечной составляющих;  $u_y(t)$  – напряжение на выходе силового трансформатора;  $u_x(t)$  – напряжение на выходе трансформатора поперечного регулирования (ТПР);  $U_j$  – ЭДС, индуцируемая в питающей обмотке ТПР на  $j$ -ом ответвлении;  $k_j$  – коэффициент трансформации на  $j$ -ом ответвлении ТПР;  $Q_{зад}$  – заданное значение реактивной мощности, определяющее устойчивость режима системы электроснабжения с минимальными отклонениями напряжения в узлах электроснабжения;  $k_3$  – коэффициент чувствительности устройства автоматического управления положением РПН ТПР;  $dQ(t)/dt$  – производная огибающей реактивной мощности, передающаяся через трансформаторную подстанцию с ТПР. Структурная схема такой системы регулирования напряжения представлена на рис. 1.

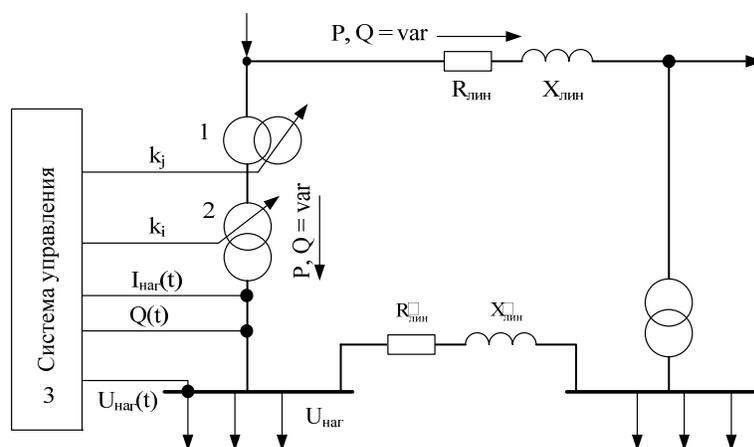


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения с трансформатором поперечного регулирования и силовым трансформатором с РПН: 1 – трансформатор поперечного регулирования (ТПР), 2 – силовой трансформатор с РПН, 3 – система управления

### Виртуальная модель и программа управления контроллера

Функциональная схема системы управления 3 с использованием программируемого логического контроллера, будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Для организации управления трансформаторным комплексом выбран модульный контроллер *Twido TWDLMDA20DTK* с безинерционными транзисторными дискретными выходами 24 В постоянного тока, человеко-машинный интерфейс на базе операторской панели *XBTR410*, которая позволяет проводить наладку уставок и зоны нечувствительности регулятора с использованием протокола удаленного *Modbus* [5].

Выходными сигналами устройства управления служат дискретные выходы контроллера  $\%Q0.1 - \%Q0.4$ , которые коммутируют пускатели электроприводов РПН в направления на увеличение и на уменьшение коэффициентов трансформации  $k_i$  силового трансформатора и  $k_j$  трансформатора поперечного регулирования соответственно.

Базовый контроллер имеет один встроенный аналоговый вход, а для системы управления следует иметь не меньше четырех (по активной и реактивной мощности, напряжению и току нагрузки), поэтому в конфигурации базового модуля следует предусмотреть модуль расширения аналоговых входов с унифицированными токовыми сигналами 0 – 20 мА *TWDAMI4LT* (на 4 входа). Для согласования сигналов от измерительных трансформаторов напряжения и тока (ТН и ТТ соответственно) предусмотрено наличие измерительных преобразователей напряжения ПН и тока ПТ типа ПТ [6], а также измерительные преобразователи активной и реактивной мощности (ПАМ и ПРМ соответственно) типа Е849-М1 [7] с классом точности 0,5 и сертифицированные производителями как быстродействующие измерительные преобразователи.

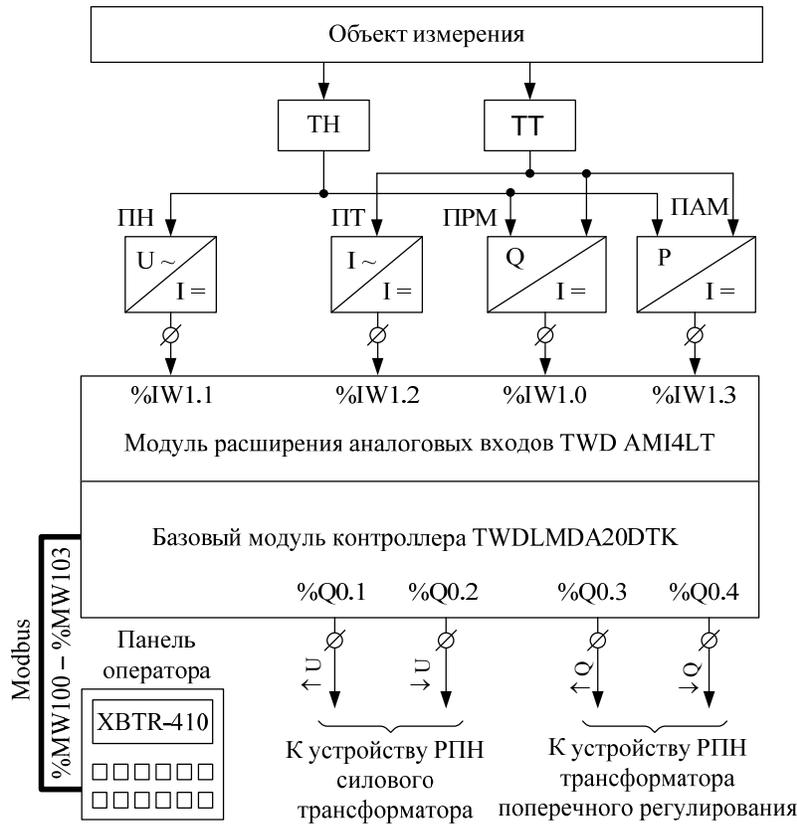


Рис. 2. Функциональная схема системы управления устройствами РПН трансформаторов

Виртуальная модель такой системы управления приведена на рис. 3.

Модуль расширения аналоговых входов, прилагаемый к базовой конфигурации контроллера, при обращении к нему программы контроллера будет иметь внутренний индекс переменных 1, а входам / выходам базового модуля присваиваются индексы 0.

Предложенная структура работает следующим образом. Вход  $%I0.0$  инициализирует выполнение программы, т. е. переводит контроллер в режим *RUN*. Для внутреннего бита  $%M1$  организовывается цикл, который периодически его активизирует. Период активации бита  $%M1$  соответствует формированию импульсов с длительностью, необходимой для срабатывания цепи включения электропривода РПН, и паузой, соответствующей времени задержки формирования сигнала управления  $\tau$  (1). Такую же функцию выполняет внутренний бит памяти контроллера  $%M5$ , но длительность паузы между его активациями соответствует времени перемещения устройства РПН трансформатора из одного положения в соседнее, т. е. состоянию системы управления в режиме переключения.

Внутренним регистрам (словам) памяти контроллера  $%MW1$  и  $%MW2$  с помощью введенных в операторской панели значений  $%MW100 - %MW103$  присваиваются значения уставки регулятора по продольной и поперечной составляющих напряжения на измерительном органе регулятора, а словам  $%MW3$  и  $%MW4$  – значения зон нечувствительности регулятора также по продольной и поперечной составляющих соответственно. В словах контроллера  $%MW5$  и  $%MW6$  записываются результаты расчета верхней и нижней границ отклонения поперечной составляющей закона регулирования  $U_x$ , а в словах  $%MW7$  и  $%MW8$  – по продольной составляющей  $U_y$ .

Сигналы из измерительных преобразователей ПАМ, ПРМ, ПН и ПТ, поступившие на входы модуля расширения, считываются программой и записываются в соответствующих словах контроллера  $%IW1.0$ ,  $%IW1.1$ ,  $%IW1.2$  и  $%IW1.3$  (рис. 2). Значению внутреннего слова  $%MW0$  присваивается результат расчета токовой компенсации в законе регулирования, а

значению слова  $\%MW9$  – величина, соответствующая напряжению  $u_y$  на измерительном органе регулятора (в соответствии с рис. 3, фактическое значение поперечной составляющей напряжения на измерительном органе регулятора  $u_x(t)$  получается путем арифметических операций согласно (1) со словами  $\%IW1.0$  и  $\%IW1.3$  и записывается в слово  $\%MW12$ ).

Далее выполнение программы контроллером разделяется на два направления: формирование сигналов управления устройством РПН силового трансформатора и устройством РПН ТПР. Рассмотрим детально работу программы, соответствующую тракту управления ТПР.

Если значение слова  $\%MW9$  является меньшим, чем значение, записанное в регистре  $\%MW7$  (нижняя уставка по напряжению), то активируется бит  $\%M9$ , если же это значение является большим, чем содержание регистра  $\%MW8$  (верхняя уставка по напряжению), то активируется бит  $\%M8$ . Задержка времени  $\tau$  на формирование сигнала управления задается в этом канале таймерами  $\%TM6$  и  $\%TM7$  по каналам формирования сигналов «Увеличить» и «Уменьшить» соответственно. Если, например, напряжение на зажимах нагрузки выходит за пределы зоны нечувствительности в сторону увеличения и за время  $\tau$  не возвращается в нее, то бит  $\%M8$  активен на протяжении этого времени, а это приводит к активации выхода таймера  $\%TM6$  и связанного с ним бита  $\%M19$ .

Знак производной огибающей напряжения рассчитывается с помощью встроенной функции  $PID 1$  и элемента сравнения (последовательность настройки этой функции на расчет производной огибающей напряжения описывается далее). Производная огибающей напряжения записывается функцией  $PID 1$  во внутренний регистр  $\%MW11$ , если содержание этого регистра положительное или равное 0, то активируется бит  $\%M21$ , а если отрицательное (или равное 0), то активируется бит  $\%M25$ . Таким образом, если напряжение на выводах потребителей превышает значение зоны нечувствительности (бит  $\%M8$ ) и не возвращается в нее на протяжении времени  $\tau$  (бит  $\%M19$ ) и при этом не имеет тенденции к снижению (производная огибающей равна 0 или положительная – бит  $\%M21$ ), то контроллер формирует сигнал на переключение устройства РПН силового трансформатора в сторону уменьшения напряжения. Биты  $\%M21$  и  $\%M25$  инверсные, т. е., если производная огибающей напряжения была положительной, а потом стала равной 0, то активен бит  $\%M21$ , если же напряжение уменьшается, то производная огибающей напряжения становится отрицательной, что приводит к сбрасыванию бита  $\%M21$  и активации бита  $\%M25$ . Остальные каналы формирования сигналов на переключение устройств РПН работают аналогично.

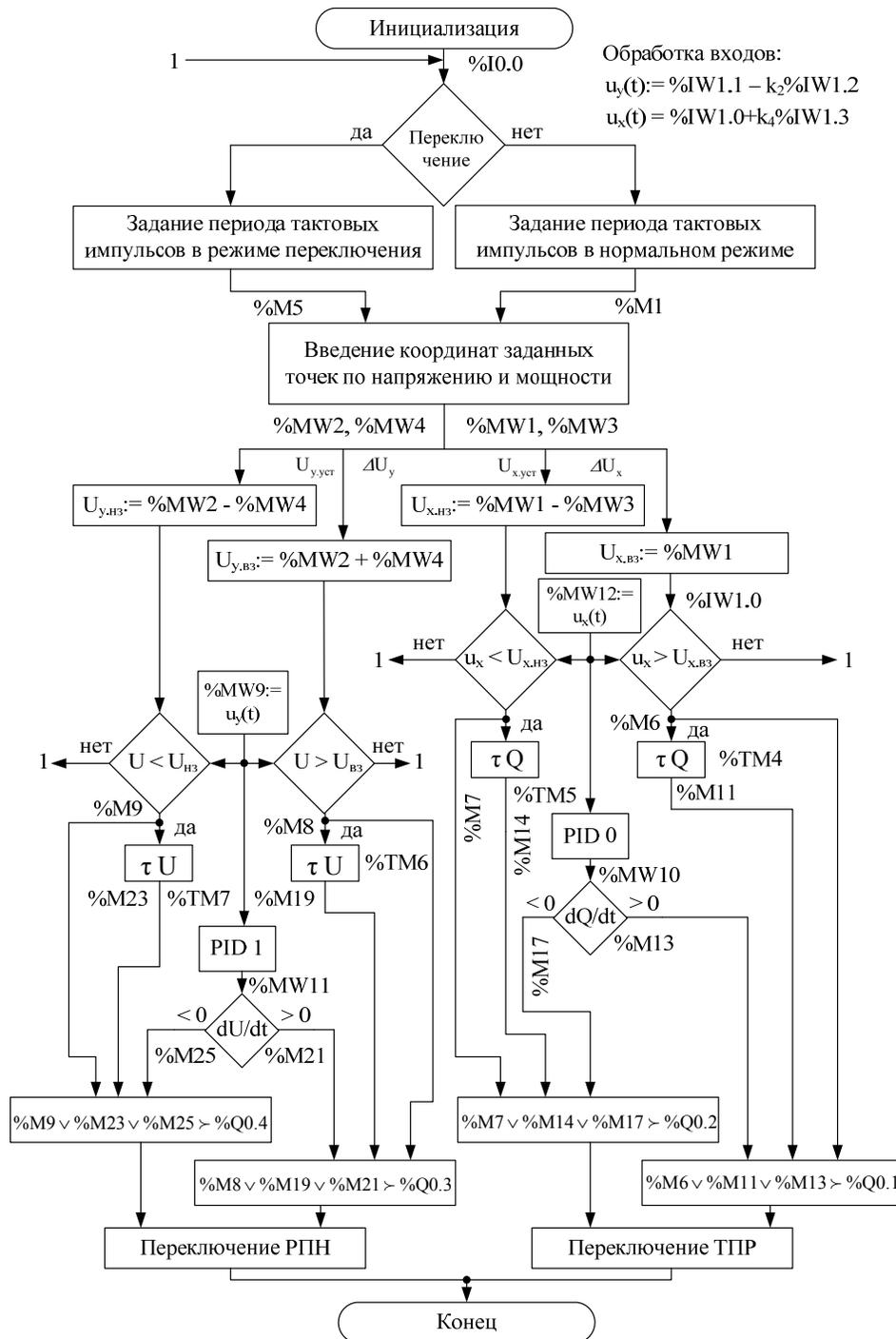


Рис. 3. Виртуальная модель программируемого контроллера для системы управления трансформаторным комплексом

Важным этапом в процессе разработки программы является организация контуров расчета производной регулируемого параметра. Для этого, соответственно, конфигурируются два ПИД-регулятора (*PID 0* – для расчета производной огибающей реактивной мощности, *PID 1* – для расчета производной огибающей напряжения). В соответствии с теорией автоматического управления, ПИД-регулятор формирует на своем выходе сигнал, пропорциональный величине, длительности и скорости отклонения регулируемого параметра от заданного значения [8]. Следовательно, на входе ПИД-регулятора есть сигнал, эквивалентный разнице фактического значения параметра и заданного. В нашем случае, если

сигнал заданного значения (*setpoint*) установить равным 0, то на входе ПИД-регулятора получим инверсное значения параметра (для отрицательной обратной связи). Поэтому в программном обеспечении выходной сигнал ПИД-регулятора следует инвертировать (*action – invert*), а также установить нулевые значения коэффициента усиления и времени интегрирования [5].

Для обмена данными между программируемым контроллером и панелью оператора следует в качестве заданных величин уставок и зон нечувствительности регулятора использовать такие адреса слов пользователя, которые потом будут связаны со значениями полей ввода данных панели. Такая задача решается при конфигурации панели оператора с помощью программного обеспечения (например, *XBT-L1000*). Параллельно с присваиванием значений слов контроллера необходимо согласовать сетевое назначение контроллера и панели, установив панель в режим главного устройства (*master*), а контроллер – в режим подчиненного устройства (*slave*) с соответствующим адресом в сети.

**Пример.** Программа управления контроллера, разработанная в среде *TwidoSoft* на языке *List Instruction* в соответствии с предложенной виртуальной структурой (рис. 3).

Поточное значение измеряемого параметра (*current value*) выбранного ПИД-регулятора отмечается в программе внешней переменной контроллера – словом *%IW1.0*, в этой же строке указывается диапазон изменения входного слова – от 5 до 95 технологических единиц. При выходе измеряемого параметра в сторону уменьшения за выбранный диапазон настраивается срабатывание дискретного выхода *%Q0.7* для сообщения диспетчера о критическом снижении параметра, аналогично настраивается срабатывание дискретного выхода *%Q0.8* при выходе параметра за пределы диапазона в сторону увеличения. Выбранное значение конверсии сигнала (*conversion: inhibit*) указывает, что сигнал из измерительного порта *%IW1.0* поступает на вход ПИД-регулятора без изменений (умножение на коэффициент, смещение нуля и т. д.).

Поскольку функция ПИД используется в устройстве для расчета производной, то значения задания параметра, постоянной времени интегрирования (*Setpoint* и *Ti*) устанавливаются равными 0, а значение коэффициента усиления регулятора принимается равным 1 и задается внутренней константой *%KW0*.

Вкладка АТ (*auto-tuning: inhibit*) выбранного ПИД-регулятора позволяет провести автоматическую настройку параметров регулятора в соответствии с заданным диапазоном изменения входного сигнала и выходного задания. Для активации функции АТ следует при конфигурации ПИД-регулятора выбрать рабочий режим не просто *PID*, а *PID+AT*.

```

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 ST %Q0.0.6
IN AND %M11 ST %M20 END
OUT_BLK ANDN %I0.0.2 LD %M20

```

Ниже приведены таблицы параметров настройки контуров *PID 0* и *PID 1*.

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

Рис. 4. Окно параметров настройки контура ПИД-регулятора PID 0

Во вкладке выхода (*output*) ПИД-регулятора инверсное выходное действие (*action: invert*) устанавливается для получения корректного значения производной. Этого требует алгоритм работы системы управления, так как дифференциал от измеряемого параметра берется в канале отрицательной обратной связи, поэтому для получения прямого значения производной выходной сигнал канала ПИД-регулятора подлежит инверсии. Выходной Наукові праці ВНТУ, 2010, № 4

сигнал, который несет информацию о значении производной, записывается во внутреннее слово контроллера *%MW10 (digital output)* и далее используется программой согласно виртуальной структуре контроллера (рис. 4).

### Выводы

Разработана функциональная и программная реализация микропроцессорного устройства управления трансформаторным комплексом для продольно-поперечного регулирования напряжения на базе серийного микропроцессорного контроллера, которая отличается от известных использованием функции ПИД-регулятора для определения знака производной огибающей реактивной мощности и позволяет оптимизировать время выполнения цикла программы, а также повысить гибкость системы управления за счет использования готовых модулей контроллера и адаптированного программного обеспечения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 ТПТ. – Vertesz electronics. – ТПТ\_02VSD. – 2008. – 2 с. – [Электронный ресурс] – Режим доступа до каталогу: – <http://www.vertesz.ru/product/pdf/ТПТ.pdf>
7. Преобразователь измерительный активной и реактивной мощности трехфазного тока типа Е849-М1 / 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 Сергей Михайлович* – к. т. н., доцент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте, +38 (0432) 598-167 [leviserg@rambler.ru](mailto:leviserg@rambler.ru)

*Матиенко Олег Александрович* – студент факультета электромеханики, электропотребления и энергетического менеджмента.

Винницкий национальный технический университет.