

## ПРОЕКТИРАНЕ НА ЦИФРОВА РЕЛЕЙНА ЗАЩИТА ЗА ТЯГОВИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ВЕРИГИ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

Тодор Лалев<sup>1</sup>, Иван Миленов<sup>2</sup>  
[16nakon@gmail.com](mailto:16nakon@gmail.com)

<sup>1</sup>„Метрополитен“ ЕАД, ул. „Антим I“ № 35, София 1303  
<sup>2</sup>ВТУ „Тодор Каблешков“, ул. Гео Милев 158, София 1574  
БЪЛГАРИЯ

**Ключови думи:** *Normal 0 false false false EN-US X-NONE X-NONE цифрови релейни защиты, тягова енергийна система, Метрополитен*

**Резюме:** *В настоящия доклад е направено предложение за проектиране на цифрова релейна защита (ЦРЗ), на база предварително получени резултати от аналитични и експериментални изследване на параметрите на преходните процеси при аварийни режими в тягово енергийната система на „Метрополитен“ ЕАД. Въз основа на получените резултати за изменението на основните параметри при преходните режими на работа на ЦРЗ в Софийския метрополитен е направен избор на подходящ тип микропроцесор за вграждане в ЦРЗ. Предложена е конкретна схемна реализация, описани са основните функции и възможности.*

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Към момента в „Метрополитен“ ЕАД са експлоатират три вида тягово-понижаващи станции (ТПС). Първите ТПС се напълно изградени през 1989 г., но се експлоатират от 1998 г. Релейните защиты (РЗ) използвани при тях (СКД Praha NA7D2) са от аналогов тип, като управлението и основните функции се осъществяват от няколко електронни блока. Характеризира се с висока степен на надеждност, поради опростения начин на следене на големината на параметрите на първичната верига (Хол сензор и електронен блок).

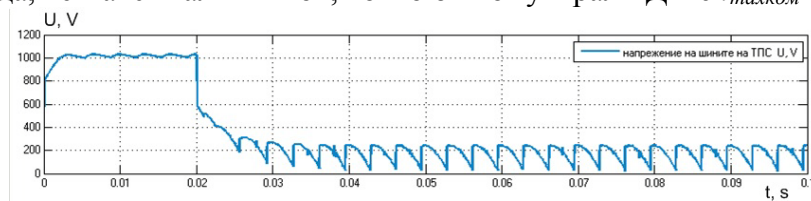
Основните недостатъци на NA7D2 са, че при повреда на електронния блок трябва да се подмени и Хол сензора. Единствените параметри, които могат да се настройват са ( $di/dt$ ) и времезакъснението  $t$  [1, 2].

Друг съществен недостатък на този тип защиты е липсата на модул за оперативна памет, който да запамятава основните параметри на процесите при настъпване на аварийен режим.

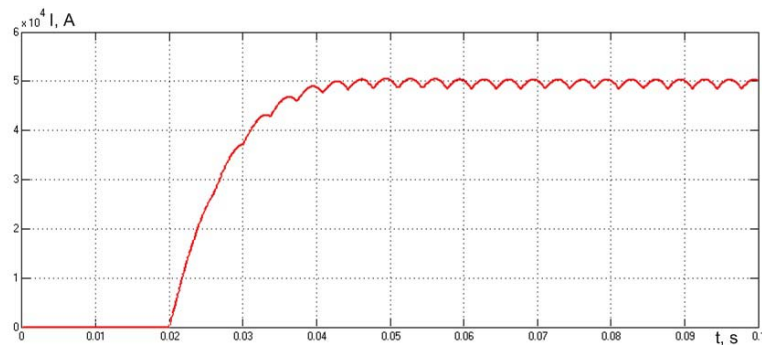
На фиг. 1 и фиг. 2 са показани резултати от аналитични изследвания на зависимостите на тока на к.с.  $I$  и напрежението  $U$  на шините на ТПС при електрозахранване с трифазни тягови агрегати (ТА).

След необходимите пресмятания на стойностите получени при симулацията по израза (1) за скоростта на нарастване на тока се получава ( $di/dt$ )=1514 A/ms. Като се отчетат фактите, че максималната стойности на настройката на тока на РЗ е 4,5 кА, и тази стойност на тока на к.с. е достигната за  $t_p=0,08$  ms, а времето за реакция на

бързодействащия прекъсвач (БДП) е 4,1 ms, от получения графичен резултат на MATLAB се вижда, че максималният ток, който би комутирал БДП е  $i_{\maxком} = 22740$  А.



Фиг. 1. Напрежение на шините на ТПС при трифазен ТА



Фиг. 2. Ток на к.с. на края на захранващите фидери при трифазен ТА

$$(1) \quad \frac{di}{dt} = \frac{I_{\infty}}{\tau_{mec}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{mec}}},$$

където  $I_{\infty}$  е установената стойност на тока на к.с., А;  
 $\tau_{mec}$  е времеконстанта, s.

## 2. ИЗБОР НА МИКРОКОНТРОЛЕР ЗА ЦРЗ ЗА ТЯГОВО ЕНЕРГИЙНА СИСТЕМА НА „МЕТРОПОЛИТЕН“ ЕАД

За обработка на информацията от сензорите в силовата верига (измервателен шунт, делител на напрежение и др.) трябва да се избере подходящ микроконтролер, който да отговаря на следните критерии:

- Да има достатъчен обем програмна памет, в която ще се разположи управляващата програма и да се записват и възпроизвеждат параметрите на тяговата верига при аварийни и нормални експлоатационни режими.
- Да има достатъчен брой входно-изходни портове.
- Да съдържа поне 5 броя аналогово цифров преобразувател (АЦП), който да преобразува аналоговия сигнал от сензорите в цифров с необходимата точност.

### 2.1. ИЗБОР НА АЦП ЗА ЦРЗ ЗА ТЯГОВО ЕНЕРГИЙНА СИСТЕМА (ТЕС)

Основните параметри, които характеризират аналогово-цифровите преобразователи са разрядност, бързодействие, точност и шумоустойчивост.

*Разрядност на АЦП* - тя определя динамичния обхват на измерваната аналогова величина. Съществуват 3, 4, 8, 10, 12, 14, 16 и 24 разрядни (битови);

*Точност на преобразуване* – тя зависи от няколко фактора: 1) Разрядността на АЦП, която влияе върху точността с грешката от дискретизация. 2) Линейността на преобразователната функция  $N=f(t)$ , където  $N$  е изходната цифрова величина на АЦП, която теоретично трябва да бъде идеално линейна (по-точно със стъпка от един дискрет), но на практика не е така поради динамични грешки при преобразуването.

За да се определи грешката при преобразуване на сигнала е необходимо да се избере оптималния интервал за квантуване (2) [2, 3].

$$(2) \quad \Delta = \frac{\text{Диапазон}}{2^{\text{Разрядност}}},$$

където *Диапазон* е абсолютната стойност на интервала за преобразуване, *Разрядност* е разрядността на АЦП.

От аналитичните изследвания направени в се вижда, че диапазонът на изменение на токът и напрежението в ТЕС може да варират в следните граници:

- Диапазон на изменение тока  $I_{\text{дан.}} = \pm 20000 \text{ A}$ ;
- Диапазон на изменение напрежението  $U_{\text{дан.}} = 0 \div 1200 \text{ V}$ .

За изчисляване на грешката при преобразуване  $\Gamma$  е необходимо предварително да се избере абсолютната минимална стойност на кванта на преобразуване  $C_{\text{min}}$  на величината.

Грешката на преобразуване се изчислява по (3):

$$(3) \quad \Gamma = \frac{\Delta}{100\% \cdot C_{\text{min}}}$$

В таблици 1 и 2 са показани съответните стойности на грешката  $\Gamma$  при преобразуване на тока и напрежението, при различни стойности на  $C_{\text{min}}$ .

Анализът на изчисленията в таблици 1 и 2 показва, че АЦП с малка разрядност не може да бъде използван за конвертиране в споменатите диапазони, понеже грешката превишава допустимите стойности. Затова за нуждите на ЦРЗ за ТЕС е избрано 12 битово АЦП при стъпки на квантоване за тока  $C_{\text{min}}=100 \text{ A}$  и за напрежението  $C_{\text{min}}=10 \text{ V}$ .

Тъй като тяговият ток  $I_d$  протича в права и обратна посока т.е. приема както положителни, така и отрицателни стойности, е необходимо един от входовете на процесора, да се използва за следене на поляритета му.

*Бързодействие* - при АЦП то зависи от типа на използваното преобразуване. За АЦП с интегриране времето за преобразуване е от 100 ms до 1 ms. При АЦП с поразрядно кодиране времето за преобразуване е от няколко десетки  $\mu\text{s}$  до няколко  $\mu\text{s}$ . За по-кратки времена на преобразуване се използват АЦП с паралелно преобразуване - именно такъв тип АЦП е избрано за нуждите на проектирането.

## 2.2. ПАРАМЕТРИ НА МИКРОКОНТРОЛЕРА

Някой от основните параметри, които характеризират микроконтролерите са разгледани по-долу.

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АЦП	Разрядност АЦП		
	8 бит	10 бит	12 бит
Брой преобразуване	256	1024	4096
Стойност на кванта при максимална стойност на тока в ТЕС 20000 А	78,125А	19,531А	4,88А
Грешка при стъпка $C_{\text{min}}=10 \text{ A}$	781,25%	195,31%	48,82%
Грешка при стъпка $C_{\text{min}}=50 \text{ A}$	156,25%	39,06%	9,76%
Грешка при стъпка $C_{\text{min}}=100\text{A}$	78,125%	19,55%	4,88%

Таблица 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ НА АЦП	Разрядност АЦП		
	8 бит	10 бит	12 бит
Брой преобразуване	256	1024	4096
Стойност на кванта при максимална стойност на напрежението в ТЕС 1200V	4,685 V	1,175 V	0,299 V
Грешка при стъпка $C_{\text{min}}=1 \text{ V}$	468,75%	117,18%	29,29%
Грешка при стъпка $C_{\text{min}}=5 \text{ V}$	93,75%	23,43%	11,75%
Грешка при стъпка $C_{\text{min}}=10 \text{ V}$	29,28%	5,85%	2,95%

- *Разрядност на микроконтролера* - това е максималният размер на информацията, която се обработва в един цикъл от микроконтролера. В повечето случаи тя се различава от разрядността на АЦП. За микроконтролерите е необходимо да се гарантира чистотата на входния сигнал, тъй като дори малки нарушения водят до значителни грешки в преобразуването. С колкото по висока разрядност е микроконтролера, толкова по-добре филтриран трябва да е входният сигнал.

- *Тактова честота* - по-високата тактова честота на микроконтролера обуславя по-малко време за изпълнение на един цикъл и съответно по-бързо изпълнение на една цяла програма.

В нашия случай диапазоните на обработваните сигнали варират в границите на  $I_{dian.} = \pm 20\ 000\ A$  и  $U_{dian.} = 1200\ V$ , като при подходяща тактова честота може да се използва и 8 битов микроконтролер [2, 3].

В допълнение следва да се отбележи, че честотата на часовника определя и честотата на синхронизация за всички вътрешни и външни устройства и компоненти, което означава, че при по-висока тактовата честота АЦП ще може да работи по-бързо.

Тъй като микроконтролерът работи в тежка електромагнитна среда, различните видове външни влияния може да доведат до така нареченото „зацикляне“. Това означава, че поради загуба на данни или грешка в информацията може да започне изпълнението на команди, които не са програмирани. В крайна сметка изпълнението на команди, написани от програмиста, ще се развие по случаен и непредсказуем начин, който ще доведе до промяна и загуба на въвеждане на данни в един безкраен цикъл. Този проблем се решава с използването на така нареченият „watchdog“ таймер.

- *Входно-изходни портове* - когато се проектира ЦРЗ на базата на микроконтролер, неизбежно се повдига въпроса за управлението на съоръженията и сигнализация, затова е необходимо микроконтролерът да има подходящ брой входно-изходни портове.

**Таблица 3**

Тип микроконтролер	PCP80C552	N8005166	PIC16F1788	№7C196KC20	PIC17C43	8AV80C166-M
Разрядност на микроконтролер, bit	8	8	8	8 или 16	8	16
Тактова честота, MHz	1.2-24	11.059-16	32	8-20	32	20(40)
Скорост за изпълнение на команди:						
Команди изпълнени за 1 цикъл, nS при честота, MHz	1000 при 12	1000 при 12	125 при 33	300 при 20	125 при 33	100 при 20
Команди изпълнени за 2 цикъла, nS при честота, MHz	2000 при 12	2000 при 12	250 при 33	600 при 20	250 при 33	200(100) при 20
Команди изпълнени за 3 цикъла, nS при честота, MHz				900 при 20	-	
Команди изпълнени за 4 цикъла, nS при честота, MHz	4000 при 12	4000 при 12		1200 при 20	-	
Команди изпълнени за 5 цикъла, nS при честота, MHz				1500 при 20	-	500(250)при 20
Макс. време изпълнение на команди, nS при честота, MHz	4000 при 12	4000 при 12	250 при 33	3100 при 20	250 при 33	1000 при 20
РАМ Оперативна памет	256Byte	256Byte	2048Byte	512Byte	454Byte	1024Byte
Програмна памет ROM			16 KbyteX	16Kbyte	4 KbyteX 16	
Презаписваема памет EEPROM			256			
АЦП	+	+	+	+		+
разрядност, Bit	10	8	12	10		10
скорост на преобразуване, $\mu S$	25при12MHz	20 при 16MHz	13	20 при 16MHz		925при 40MHz
Брой източници	15	15	24	28	11	32
число вектори	15	15	5	16	4	32
Брой прекъсвания	2	4	5	16	4	16
watchdog таймер:	да	да	да	да	да	да
разрядност, bit	8	14	8/16	16		16
Минимално време за рестарт, $\mu S$	2048 при 12MHz	1 при 12MHz	12000	0.1	12000	25 при 40MHz
Максимално време за рестарт, $\mu S$	524288 при 12 MHz	16384 при 12 MHz	3000000	6553.6	3000000	420000 при 40MHz
Портове входове/изходи	40+8(входове)	48	25	40+8{входове}	33	до 76

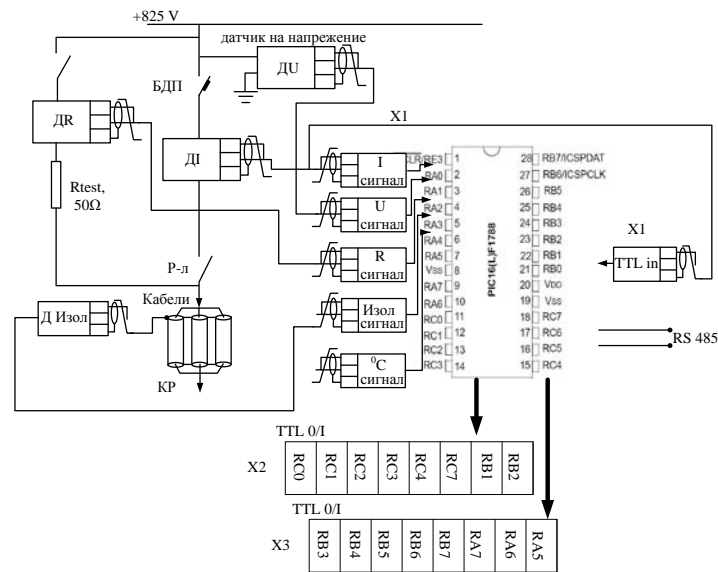
В следващата част от доклада е представено сравнение на няколко микроконтролера, като целта е да бъде избран най-подходящия при проектирането на ЦРЗ за ТЕС. Цялата информация, е систематизирана и показана в таблица 3.

На базата на сравнение на основните параметри и дефинираните по-горе изисквания при проектирането на ЦРЗ е избран PIC16F1788.

При проектиране на ЦРЗ освен избора на микроконтролер е необходимо да се дефинират и входно-изходните (I/O) портове. На фиг. 3. е показана примерна схема на реализация на ЦРЗ на базата на микроконтролер тип PIC16F1788.

Изискванията за това защитно устройство са резултат от аналитичните изследванията, проведени посредством предварително разработения математически модел.

За контрол на първичните величини и защита на ТЕС се дефинират следните входове:



Фиг. 3. Примерна схема на реализация на контролния модул на проектираната на база PIC16F1788 ЦРЗ

- **TTL in RBO** - този порт осигурява прекъсване, ако е разрешено и следи за евентуална промяна в посоката на протичане на тяговия ток (напр. при рекуперативен режим на работа на метросъстава). Необходимо е в токовата измервателна верига да се инсталира и операционен усилвател с двуполярно захранване, работещ като компаратор;
- **RA0** е програмиран да работи като 12 битово АЦП. Той е присъединен към токовия сигнал. Посредством този порт се следи моментната стойност на тока в ТЕС и при настъпване на дадено събитие токът се записва в оперативната памет на процесора;
- **RA1** е програмиран да работят като 12 битово АЦП и чрез него се следи напрежението. Този порт е присъединен към сигнала от сензорът за напрежение U;
- **RA3** е програмиран да работи като 12 битово АЦП и чрез него, и сензора на съпротивление, и 50Ω резистор при АПВ на БДП микропроцесора прави проверка на веригата в ТЕС за наличие на КС;
- **RA4** е програмиран да работи като 12 битово АЦП и чрез него и кабелния модул Д Изол. микропроцесора прави проверка на кабелната изолация на захранващите ТЕС фидери;
- Портовете изведени на клеморедата **X2** могат да бъдат програмирани да работят и като входно/изходни устройства, като чрез тях по определен алгоритъм, както и по помощни вериги и със сигнализации, може да се управлява БДП;

- RC6 и RC5 работят като серийни портове за предаване на данни по промишления протокол RS-485. Чрез тях може да се осъществява както връзка с вече изградената в „Метрополитен“ ЕАД SCADA система, така и с преносим компютър.

Всички входове и изходи на микроконтролера с цел безопасност и надеждност са разделени от първичните вериги чрез използването на оптронни двойки.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съобразно получените резултати за изменението на основните параметри при преходните режими на работа на ЦРЗ в Софийският метрополитен е направен избор на подходящ тип микроконтролер за вграждане в ЦРЗ. Предложена е конкретна схемна реализация, описани са основните функции и възможности.

Направеното предложение за конкретна схемна реализация на ЦРЗ, дава възможност за проектиране и изработване на българска цифрова защита, адаптирана за нуждите и специфичните особености на процесите в Софийският метрополитен.

Освен това се създава техническа възможност за оптимална адаптивна настройка на режимите на работа на използваните в момента релейни защиты, съобразно специфичните особености на отделните метроучастъци.

#### ЛИТЕРАТУРА:

[1] Лалев Т., Изследване и анализ на преходни процеси при аварийни режими в тяговите електрозахранващи вериги на „Метрополитен“ ЕАД, Годишник на ТУ – София, т. 63, кн. 6, 2013, ISSN 1311-0829, V-та конференция на електро-технически факултет „ЕФ 2013“, 2-5.09.2013 г., Созопол, България, стр. 425-434

[2] Назаренко В. М., Рогоза В. В., Стогний В. С., Холоденко Ю. И., Принципы построения и структура микропроцессорных систем защиты и автоматики, «Электричество», 1985, с. 46-48.

[3] Под ред. Морозкина В. П., Микропроцессорные гибкие системы релейные защиты, М., «Энергоатомиздат», 1988.

## DESIGN OF DIGITAL RELAY PROTECTION FOR DC TRACTION POWER SUPPLY

Todor Lalev<sup>1</sup>, Ivan Milenov<sup>2</sup>  
[16nakon@gmail.com](mailto:16nakon@gmail.com)

<sup>1</sup>*Metropolitan JCB, 35 Antim I Str., Sofia 1303*

<sup>2</sup>*Todor Kableshkov University of Transport, 158 Geo Milev Str., Sofia 1574  
BULGARIA*

**Key words:** digital relay protection, traction power supply, Metropolitan PLC Normal 0 false false false EN-US X-NONE X-NONE

**Abstract:** The paper is proposed a design of the digital relay protection, based previously obtained results of an analytical and experimental study of the parameters of the transition processes in emergency regimes of TES Metropolitan PLC. According to the results obtained for changes in the basic parameters of the transitional modes of CTA in Sofia subway in this report is made selection of the appropriate type microprocessor incorporated into the CTA. Proposed a specific scheme implementation described the main features and capabilities.