

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/PXLE1275>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/VRQU5053>

***А. К. Жумадилова**

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0232-6779>

*e-mail: zhumadirova.a@teachers.tou.edu.kz

РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ УСТАВКИ ТОКА

В данной статье разработано программное обеспечение устройства централизованной защиты от однофазного замыкания на землю в электрических сетях промышленных предприятий.

Основой для разработки устройства служит метод централизованной защиты линий от однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с автоматическим изменением уставки защиты по току ОЗЗ при изменении конфигурации распределительной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением 6–10 кВ. Применение данного способа обеспечивает высокую селективность защиты от однофазного замыкания на землю, что способствует повышению надежности и уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок.

При разработке алгоритма функционирования устройства применялась теория цветных сетей Петри. Теория цветных сетей Петри близка к структурным методам моделирования систем, она базируется на хорошо разработанном математическом аппарате и поэтому допускает проведение аналитических и имитационных исследований.

При выборе элементной базы устройства наиболее целесообразно применение микропроцессоров, так как они обладают большими вычислительными и логическими возможностями при высокой надежности, универсальности применения, малых размерах и дешевизне. В частности, микроконтроллеры семейства AVR отличаются большой скоростью работы, большой универсальностью, быстройдействием. В результате проведенного анализа был выбран

микроконтроллер фирмы Atmel Corporation Atmega8535 как наиболее оптимальный для реализации устройства.

Ключевые слова: электрическая сеть, однофазное замыкание, централизованная защита, микроконтроллер, программное обеспечение.

Введение

В настоящее время все более широкое применение находят релейные защиты на основе микропроцессорных средств и систем. Это обусловлено их надежностью, быстродействием и селективностью. В своей структуре цифровые защитные устройства имеют много общего и строятся в большинстве случаев на базе микроконтроллеров. Микроконтроллер, являясь центральным узлом защиты, через устройства ввода-вывода и периферийные узлы интегрируется с электрической сетью. Для правильного функционирования цифровых защит важно выбрать соответствующую элементную базу, иметь хорошо прописанные алгоритм и программный код, позволяющие учесть все нюансы процесса и избежать ошибок.

Как известно, в реальных устройствах защиты может использоваться несколько процессоров, то есть один процессор решает отдельную задачу общего комплекса защиты. Целью такого разделения является повышение быстродействия. В статье будет рассмотрена защита от однофазного замыкания на землю на базе однокристалльного микроконтроллера. Существует достаточно большое количество способов и устройств защиты от однофазных замыканий. Каждое из них имеет как достоинства, так и недостатки. Какое из них окажется наиболее совершенным покажет только опыт эксплуатации. Поэтому разработка новых защит является актуальной [1; 2].

Материалы и методы

Для функционирования централизованной защиты от однофазного замыкания на землю с автоматическим изменением уставки тока в сетях 6–10 кВ промышленных предприятий на основе составленного алгоритма [3; 4; 5; 6] разработано программное обеспечение.

На первом этапе для проверки алгоритма использовался метод цветных сетей Петри. Главная сеть, приведенная на рисунке 1, имеет три подсети – работающие фидеры, вычисление тока уставки и сравнение токов в фидерах с током уставки. Из анализа [3] следует, что полученная сеть Петри является живой и обратимой, в ней отсутствуют тупиковые состояния, и имеется дуга, направленная к начальной метке. Следовательно сеть, моделирующая устройство защиты от однофазного замыкания на землю, является правильной сетью. Далее следует перейти к выбору элементной базы и написанию программного кода.

Доминирующее положение на рынке современных микроконтроллеров занимают четыре архитектуры: MCS-51, AVR, PIC и HC68. Анализируя новые модели AVR-микроконтроллеров, можно отметить, что их производительность увеличилась скачкообразно по сравнению с аналогичными PIC и MCS-51 контроллерами. Таким образом, в качестве элементной базы, на основе которого функционирует устройство выбран микроконтроллер фирмы Atmel Corporation Atmega8535.

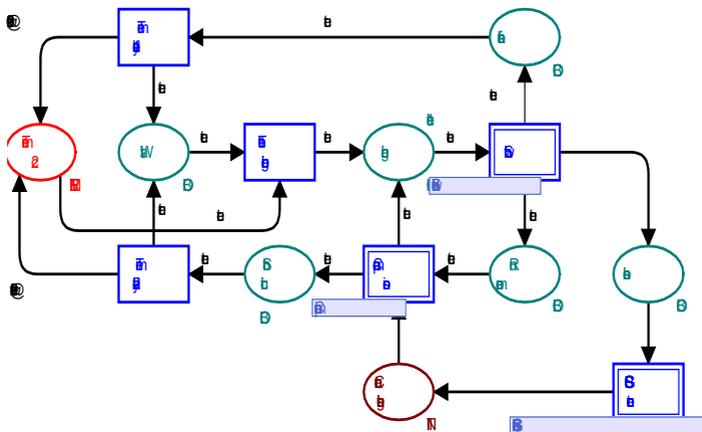


Рисунок 1 – Главная сеть Петри, моделирующая устройство защиты

Функциональная схема устройства с микроконтроллером приведена на рисунке 2. Ток уставки рассчитывается в зависимости от параметров работающих фидеров. Для этого, как показано на рисунке 2, считываются величины напряжений, через согласующие преобразователи поступающие в порт ввода А. На этот же порт подаются сигналы, уровень которых соответствует значениям протекающих в фидерах токов. В схеме в качестве согласующих преобразователей используются электромагнитные трансформаторы с ферромагнитным сердечником.

АЦП, расположенный в линиях порта А, преобразовывает сигналы токов и напряжений в цифровые коды. Процессор производит обработку сигналов в соответствии с алгоритмом.

При превышении тока, протекающего в фидере, значения уставки защиты по току однофазного замыкания на землю, центральным процессором формируется команда на отключение соответствующего выключателя. Порт С микроконтроллера частично сконфигурирован на вывод – включение

и отключение фидеров. Связь защиты и высоковольтного выключателя осуществляется с помощью твердотельного реле, представляющее собой полупроводниковый ключ.

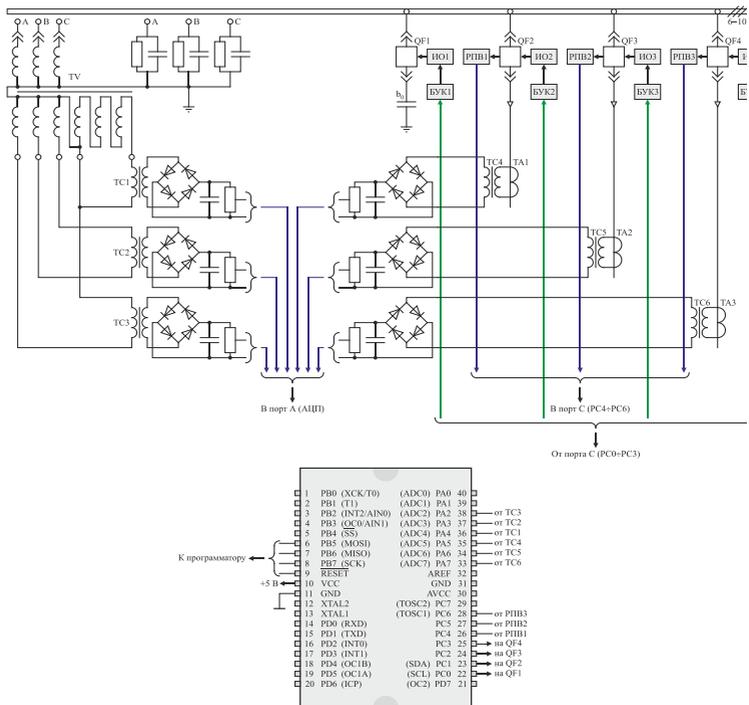


Рисунок 2 – Схема защиты на основе микроконтроллера Atmega8535

Структура микроконтроллера, способы управления АЦП и инициализации портов ввода и вывода описаны в литературе [7; 8]. При написании программного кода учитывались следующие настройки микроконтроллера:

1) Порт А настроен на ввод и аналого-цифровое преобразование сигналов:

- напряжение фазы А относительно земли с вывода PA2;
- линейное напряжение с вывода PA3;
- напряжение нулевой последовательности с вывода PA4;
- ток первого фидера с вывода PA5;
- ток второго фидера с вывода PA6;

- ток третьего фидера с вывода PA7.
- 2) Порт В подключен к дисплею.
- 3) Порт С настроен на ввод и вывод:
 - включение/отключение линии с дополнительной емкостной проводимостью с вывода PC0;
 - включение/отключение первого фидера с вывода PC1;
 - включение/отключение второго фидера с вывода PC2;
 - включение/отключение третьего фидера с вывода PC3;
 - сигнал от РПВ первого фидера с вывода PC4;
 - сигнал от РПВ второго фидера с вывода PC5;
 - сигнал от РПВ третьего фидера с вывода PC6.

Результаты и обсуждение

Составлена программа устройства на языке Си [9; 10], листинг которой в приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Листинг программного кода устройства

Программный код	Пояснения
#include <mega8535.h>	
#include <delay.h>	
#include <stdio.h>	
#asm	
.equ __lcd_port=0x18 ;PORTB	ЖКИ подключен к порту В
#endasm	
#include <lcd.h>	
#define ADC_VREF_TYPE 0x00	
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)	подпрограмма чтения АЦП
{	
ADMUX=adc_input ADC_VREF_TYPE;	
ADCSRA =0x40;	
while ((ADCSRA & 0x10)==0);	
ADCSRA =0x10;	
return ADCW;	
}	
void main(void)	
{	
float bo= .000157;	величина дополнительной емкостной проводимости $b_0 = 0,157 \cdot 10^{-3}$ См
unsigned short ku=2500;	коэффициент трансформации
float Uo, Ulin, Uph, I1, I2, I3, I0;	объявление переменных
unsigned char k1, k2;	
char buffer[255];	

PORTA=0x00;	инициализация порта А
DDRA=0x00;	
PORTC=0x0E;	инициализация порта С
DDRC=0x0F;	
ADMUX=ADC_VREF_TYPE;	инициализация АЦП
ADCSRA=0x85;	
SFIOR&=0xEF;	
lcd_init(16);	инициализация ЖКИ
while (1)	
{	
label1:	метка 1
k1=PINC&0x70;	считывание и запись сигналов с РПВ
PORTC.0=1;	подключение b_0 к фазе А сети
delay_ms(50);	выдержка времени на подключение b_0
Uo=read_adc(4);	преобразование и запись в переменную значения U_0 с канала 4 АЦП
Ulin=read_adc(3);	преобразование и запись в переменную значения $U_л$ с канала 3 АЦП
Uph=read_adc(2);	преобразование и запись в переменную значения $U_{ф0}$ с канала 2 АЦП
PORTC.0=0;	отключение b_0
I0=3*bo*ku*Ulin*Uph/Uo;	вычисление величины тока ОЗЗ (уставки тока)
_lcd_ready();	
lcd_clear();	
sprintf(buffer, "current: %fA", I0);	
lcd_puts(buffer);	вывод на дисплей значения I_0
label2:	метка 2
I1=read_adc(5);	преобразование и запись в переменную значения тока первой линии I_1 с канала 5 АЦП
I2=read_adc(6);	преобразование и запись в переменную значения тока второй линии I_2 с канала 6 АЦП
I3=read_adc(7);	преобразование и запись в переменную значения тока третьей линии I_3 с канала 7 АЦП
if(I1>=I0) goto label3; else	сравнение значения I_1 с уставкой
if(I2>=I0) goto label4; else	сравнение значения I_2 с уставкой
if(I3>=I0) goto label5; else	сравнение значения I_3 с уставкой
k2=PINC&0x70;	считывание и запись сигналов с РПВ
if(k1!=k2) goto label1;	сравнение k1 и k2, то есть наличие изменения в количестве работающих линий
else goto label2;	переход к метке 2
label3:	метка 3
PORTC.1=0;	отключение поврежденной линии 1
delay_ms(50);	выдержка времени на отключение линии 1

goto label1;	переход к метке 1
label4:	метка 4
PORTC.2=0;	отключение поврежденной линии 2
delay_ms(50);	выдержка времени на отключение линии 2
goto label1;	переход к метке 1
label5:	метка 5
PORTC.3=0;	отключение поврежденной линии 3
delay_ms(50);	выдержка времени на отключение линии 3
goto label1;	переход к метке 1
return;	
};	
}	

Выходы PB5 (MOSI), PB6 (MISO), PB7 (SCK) и RESET подключаются к программатору. Приведенная выше программа перед записью в память микроконтроллера подлежит компиляции для анализа, проверки синтаксиса, выявления возможных ошибок и преобразования программы в машинный код. Программирование осуществляется внутрисхемным способом через коммуникационный интерфейс SPI.

Выводы

Разработанное программное обеспечение устройства централизованной защиты от ОЗЗ с автоматическим изменением уставки тока на основе применения микроконтроллера Atmega8535 позволяет реализовать устройство согласно заданному алгоритму, исключить ложное срабатывание защиты в неповрежденных присоединениях в случае возникновения ОЗЗ и повышает селективность защиты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Achitaev, A. A., Suslov, K. V., Volkova, I. O., Kozhemyakin, V. E., Dvoryansky, Y. V. Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral [Text], Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 1079–1086, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.046>.

2 Kachesov, V., Lebedev, A., Kitova, E. Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder [Text], International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 152, 2023, 109271, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109271>.

3 Zhumadirova, A., Markovskiy, V., Kislov, A. Simulation of single-phase ground short circuit protection device [Text], E3S Web of Conferences 288, 01038

(2021), International Symposium «Sustainable Energy and Power Engineering 2021» (SUSE-2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801038>.

4 **Саятов, Ә. А., Жумадилова, А. К.** Разработка устройства автоматического определения параметров изоляции электрических сетей [Текст] // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. – 2018. – № 3. – С. 144–152.

5 **Жумадилова, А. К.** Математическая модель устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю [Текст] // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – № 3. – С. 83–101.

6 **Утегулов, Б. Б., Марковский, В. П., Жумадилова, А. К.** Анализ сети Петри устройства контроля состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6-10 кВ [Текст] // Материалы 11 МНПК «Проблемы и достижения в промышленной энергетике ПДЭ-11» в рамках выставки «Энергетика и электротехника – 2012». – Екатеринбург, 2012. – С. 22–27.

7 **Белов, А. В.** Микроконтроллеры AVR : от азов программирования до создания практических устройств : учебное пособие [Текст]. – Санкт-Петербург : Наука и техника, 2016. – 544 с.

8 **Хартов, В. Я.** Микроконтроллеры AVR в проектах и упражнениях : учебное пособие [Текст]. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 288 с.

9 **Рацева, С. М.** Программирование на языке Си : учебное пособие [Текст]. – М. : Издательство ЛАНЬ, 2023. – 330 с.

10 **Подбельский, В. В., Фомин, С. С.** Курс программирования на языке Си : учебное пособие [Текст]. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 386 с.

REFERENCES

1 **Achitaev, A. A., Suslov, K. V., Volkova, I. O., Kozhemyakin, V. E., Dvoryansky, Y. V.** Development of an algorithm for identifying single-phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral [Text], Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, 2023, Pages 1079-1086, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.046>.

2 **Kachesov, V., Lebedev, A., Kitova, E.** Monitoring in 6–35 kV power networks, location of single-phase ground fault and detection of fault feeder [Text], International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 152, 2023, 109271, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109271>.

3 **Zhumadirova, A., Markovskiy, V., Kislov, A.** Simulation of single-phase ground short circuit protection device [Text], E3S Web of Conferences 288, 01038

(2021), International Symposium «Sustainable Energy and Power Engineering 2021» (SUSE-2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801038>.

4 **Sayatov, Ə. A., Zhumadirova, A. K.** Razrabotka ustroystva avtomaticheskogo opredeleniya parametrov izolyatsii elektricheskikh setei [Development of a device for automatic determination of insulation parameters of electric networks] [Text] // Vestnik PGU. Energeticheskaya seriya. – 2018. – № 3. – P. 144–152.

5 **Zhumadirova, A. K.** Matematicheskaya model' ustroystva kontrolya sostoyaniya izolyatsii i toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu [Mathematical model of the insulation condition and single-phase short circuit to ground current monitoring device] [Text] // Vestnik Toraigyrov universiteta. Energeticheskaya seriya. – 2024. – № 3. – P. 83–101.

6 **Utegulov, B. B., Markovskii, V. P., Zhumadirova, A. K.** Analiz seti Petri ustroystva kontrolya sostoyaniya izolyatsii i toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh napryazheniem 6-10 kV [Petri net analysis of insulation condition and single-phase short circuit to ground current monitoring devices in 6-10 kV electrical networks] [Text] // Materialy 11 MNPК «Problemy i dostizheniya v promyshlennoi energetike PDE-11» v ramkakh vystavki «Energetika i elektrotehnika – 2012». – Ekaterinburg, 2012. – P. 22–27.

7 **Belov, A. V.** Mikrokontrollery AVR : ot azov programmirovaniya do sozdaniya prakticheskikh ustroystv : uchebnoe posobie [AVR microcontrollers : from the basics of programming to the creation of practical devices : textbook] [Text]. – Sankt-Peterburg : Nauka i tekhnika, 2016. – 544 p.

8 **Khartov, V. Ya.** Mikrokontrollery AVR v proektakh i uprazhneniyakh : uchebnoe posobie [AVR microcontrollers in projects and exercises : textbook] [Text]. – M. : Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2022. – 288 p.

9 **Ratseeva, S. M.** Programmirovaniye na yazyke Si : uchebnoe posobie [Programming in C : textbook] [Text]. – M. : Izdatel'stvo LAN', 2023. – 330 p.

10 **Podbel'skii, V. V., Fomin, S. S.** Kurs programmirovaniya na yazyke Si : uchebnoe posobie [C Programming course : textbook] [Text]. – M. : DMK Press, 2012. – 386 p.

Поступило в редакцию 04.02.25

Поступило с исправлениями 18.02.25

Принято в печать 10.03.25

А. К. Жұмадилова

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

04.02.25 ж. баспаға түсті.

18.02.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТОҚ ТАҒАЙЫНДАМАСЫНЫҢ АВТОМАТТЫ ӨЗГЕРУІМЕН ЖЕРГЕ БІР ФАЗАЛЫ ТҰЙЫҚТАЛУДАН ҚОРҒАНЫСТЫ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ

Бұл мақалада өнеркәсіптік кәсіпорындардың электр желілерінде жерге бір фазалы тұйықталудан орталықтандырылған қорғаныс құрылғысының бағдарламалық жасақтамасы әзірленді.

Құрылғыны әзірлеудің негізі – кернеуі 6–10 кВ оқшауланған бейтарабы быр тарату электр желісінің конфигурациясы өзгерген кезде ЖБФТ тогы бойынша қорғаныс тағайындамасының автоматты өзгеруімен желілерді жерге бір фазалық тұйықталудан (ЖБФТ) орталықтандырылған қорғаныс әдісі. Бұл әдісті қолдану жерге бір фазалы тұйықталудан қорғаныстың жоғары селективтілігін қамтамасыз етеді, бұл электр қондырғыларын пайдалану кезінде сенімділік пен қауіпсіздік деңгейін арттыруға көмектеседі.

Құрылғының жұмыс істеу алгоритмін жасау кезінде Петри түсті желілер теориясы қолданылды. Петри түсті желілер теориясы жүйелерді модельдеудің құрылымдық әдістеріне жақын, ол жақсы дамыған математикалық аппаратқа негізделген, сондықтан аналитикалық және имитациялық зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

Құрылғының элементтік базасын таңдағанда, микропроцессорларды қолданған жөн, өйткені олар жоғары сенімділікпен, қолданудың әмбебаптығымен, шағын өлшемдерімен және арзандығымен үлкен есептеу және логикалық мүмкіндіктерге ие. Атап айтқанда, AVR отбасының микроконтроллерлері үлкен жұмыс жылдамдығымен, үлкен әмбебаптығымен, жылдамдығымен ерекшеленеді. Талдау нәтижесінде Atmel Corporation Atmega8535 микроконтроллері құрылғыны іске асыру үшін ең оңтайлы болып таңдалды.

Кілтті сөздер: электр желісі, бір фазалы тұйықталу, орталықтандырылған қорғаныс, микроконтроллер, бағдарламалық жасақтама.

A. K. Zhumadirova

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 04.02.25

Received in revised form 18.02.25

Accepted for publication 10.03.25

IMPLEMENTATION OF PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE EARTH FAULT WITH AUTOMATIC CURRENT SETPOINT CHANGE

This article develops software for centralized protection against single phase to earth fault in the electrical networks of industrial enterprises.

The basis for the development of the device is the method of centralized protection of lines against single phase to earth fault (SPE) with automatic change of protection set point on SPE current at change of configuration of distribution electric network with isolated neutral voltage 6-10 kV. The use of this method provides high selectivity of protection against single phase to earth fault, which helps to increase the reliability and level of electrical safety during operation of electrical installations.

The theory of colored Petri nets was used to develop the algorithm for the device's operation. The theory of colored Petri nets is close to the structural methods of modeling systems, it is based on a well-developed mathematical apparatus and therefore allows for analytical and simulation studies.

When choosing the element base of a device, it is most advisable to use microprocessors, since they have great computing and logical capabilities with high reliability, versatility of application, small size and low cost. In particular, the AVR family microcontrollers are characterized by high speed, great versatility, and high performance. As a result of the analysis, the Atmel Corporation Atmega8535 microcontroller was selected as the most optimal for the implementation of the device.

Keywords: electrical network, single to phase fault, centralized protection, microcontroller, software.

Теруге 10.03.2025 ж. жіберілді. Басуға 28.03.2025 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
29.9 Мб RAM
Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс №4358

Сдано в набор 10.03.2025 г. Подписано в печать 28.03.2025 г.
Электронное издание
29.9 Мб RAM
Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4358

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz