

УДК 681.518.54, 621.311, 656.25

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.145.2014.81073>

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ Й АВТОМАТИКИ ДЛЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кандидати техн. наук І.В. Піскачова, С.Є. Бантюков, М.О. Колісник

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ДЛЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Кандидаты техн. наук И.В. Пискачева, С.Е. Бантюков, М.А. Колесник

RELIABILITY ANALYSIS OF MICROPROCESSOR SYSTEMS RELAY PROTECTION AND AUTOMATION FOR RAILWAY ENERGY SYSTEMS

Candidates of technical Sciences I. Piskachova, S. Bantyukov, M. Kolisnyk

Проведено аналіз недоліків мікропроцесорних систем релейного захисту й автоматики для енергосистем залізничного транспорту та можливості підвищення їх надійності за допомогою методу дублювання як апаратних, так і програмних засобів, а також розрахунок надійності досліджуваних структур.

Ключові слова: мікропроцесорна система релейного захисту та автоматики, надійність, дублювання, апаратні засоби, програмні засоби, ймовірність безвідмовної роботи, енергосистеми залізничного транспорту.

Проведен анализ недостатков систем релейной защиты и автоматики для энергосистем железнодорожного транспорта и возможности повышения их надежности с помощью дублирования как аппаратных, так и программных средств, а также расчет надежности исследуемых структур.

Ключевые слова: микропроцессорная система релейной защиты и автоматики, надежность, дублирование, аппаратные средства, программные средства, вероятность безотказной работы, энергосистемы железнодорожного транспорта.

The analysis of faults of microprocessors relay protection and automation of energy systems for railway transport faults and opportunities to increase their reliability by duplicating the method as a hardware so are software and calculation of reliability of structures that are investigated. The technical level of microprocessor devices of relay protection and automation usually considered from several positions: technical excellence and reliability of the devices, microprocessor-based protective relaying and automation technology level, which determines the performance of the system microprocessor relay protection and automation algorithms embedded security and automation; functionality of microprocessor relay protection systems and automation; possibility of integrating relaying and automation microprocessor systems in other systems. Invalid action relaying is one of the main causes of severe accidents that occasionally occur in energy systems - max globally. Therefore, the reliability of relay protection largely depends on the reliability of the entire grid. Previously developed methods to increase reliability of attitude to the old element base and microprocessor devices of relay protection and automation with a number of features that can not be taken into account in the calculation of these methods. It is necessary to develop new approaches to design microprocessor devices of relay protection and automation and methodology for assessing the performance reliability of these systems.

Keywords: microprocessor relay protection and automation systems, reliability, redundancy, hardware, software, failure operation, railway energy systems.

Вступ. Модернізація енергосистем (ЕС) на залізничному транспорті заснована на впровадженні інноваційних технологічних

розробок і використанні сучасних систем управління. Особлива увага у даний час приділяється проектуванню та впровадженню

високонадійних мікропроцесорних систем релейного захисту й автоматики (МС РЗА), які призначені для мінімізації негативного ефекту від виникаючих в енергосистемі різного роду ушкоджень і аномальних режимів. Тому необхідно розглядати різноманітні методи підвищення надійності МС РЗА з метою визначення найбільш ефективного методу.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Технічний рівень пристроїв МС РЗА звичайно розглядають з декількох позицій: технічна досконалість та надійність функціонування пристроїв МС РЗА; технологічний рівень, що визначає виконання МС РЗА вбудованих алгоритмів захисту та автоматики; функціональність МС РЗА; можливість інтегрування МС РЗА в інші системи. Неправильні дії релейного захисту є однією з основних причин виникнення важких аварій, що періодично відбуваються в ЕС. Тому від надійності релейного захисту багато в чому залежить надійність всієї ЕС. Розроблені раніше методи підвищення надійності ЕС ставилися до старої елементної бази, а пристрої МС РЗА мають цілий ряд особливостей, які не можуть бути враховані при цих методах розрахунку. Необхідно розробити нові підходи до проектування високонадійних МС РЗА, надійність яких суттєво впливає на надійність ЕС та методики оцінки показників надійності цих систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними North American Electric Reliability Council [1,5], в 74 % випадків причиною важких аварій в енергосистемах були неправильні дії релейного захисту в процесі розвитку аварії. Серпнева аварія 2003 року позбавила електроенергії п'ять найбільших міст США та Канади. Це обвальне відключення електрики вже визнано найбільшою енергетичною аварією в історії Америки, і представники офіційної влади привселюдно визнали, що національна мережа електропостачання США застаріла і має потребу в модернізації [1,5,6]. Після цієї аварійної ситуації в енергосистемі США та Канади висловлювалася версія про перевантаження електромережі, внаслідок локальної аварії на одній з генеруючих потужностей. Для забезпечення її безаварійної роботи існують пристрої релейного захисту та

протиаварійної автоматики, які мають спрацьовувати незалежно від того, з яких причин виник збій у системі. Їх призначення – локалізувати джерело аварії і не допустити її поширення на всю іншу енергосистему, чого у вищерозглянутій аварійній ситуації не відбулося [5,6].

Надійність функціонування МС РЗА визначає надійність спрацьовування (при ушкодженнях у зоні, що захищається). Зростаючі вимоги до МС РЗА мають забезпечити умови безперебійного забезпечення споживачів електроенергією, що має високу якість. [1,5,6].

До релейного захисту мікропроцесори прийшли на початку 80-х років (Siemens і ABB). Вимірювальні перетворювачі сприймають в основному тільки два параметри: величину струму та величину напруги в мережі. Мікропроцесорні пристрої на підставі аналізу двох даних параметрів видають і запам'ятовують ще цілий ряд додаткових параметрів, наприклад таких, як причина відключення, час і дата відключення, струм і тривалість аварійної ситуації, векторна діаграма напруг і струмів у лінії в момент відключення та ін. Але кінцеве завдання цих пристроїв – дати сигнал на відключення при перевантаженні мережі [5,6].

До недоліків МС РЗА належать:

- висока чутливість, яка впливає на помилкове спрацьовування;
- багатошарові друковані плати МС РЗА, які припускають величезну кількість контактних перемичок між шарами. Відомі випадки неправильних дій МС РЗА внаслідок зростання перехідного опору цих переходів [5];
- відмовою мікропроцесорних систем (МС) є не тільки відмова апаратних засобів (АЗ), а також відмови та збої через помилки в його програмних засобах (ПЗ) [1-4,7], які не завжди виявляються при тестуванні;
- необхідність відновлення ПЗ, що застаріває набагато швидше, ніж техніка [1-5]. При цьому часто при відновленні ПЗ виникає невідповідність між АЗ і ПЗ, або вносяться нові помилки [1-3,7]. Ці проблеми можуть призвести до важких наслідків для енергомережі. Як відомо, однією з причин найбільшої аварії в енергосистемах США та Канади в серпні 2003 року була відмова комп'ютерної системи управління в енергосистемі "First Energy" [1];

- мініатюризація МС РЗА, яка призводить до використання електронних елементів, що працюють із перевантаженням і розсіюють підвищену кількість тепла, що призводить до зниження її надійності та прискорює старіння елементів [5,6].

Все вищесказане вказує на те, що необхідно створювати високонадійні МС РЗА із застосуванням методів підвищення надійності як АЗ, так і ПЗ [1,2,7].

Визначення мети та задачі дослідження. Деякі автори [5,6] для підвищення надійності пропонують дублювання систем релейного захисту системами за різними принципами роботи: один канал – впровадження МС РЗА, а другий канал – електромеханічний захист, що дуже добре зарекомендував себе протягом багатьох років. Однак і самі МС РЗА потребують подальшого підвищення їх надійності. Якщо перегріву електронних приладів можна позбутися за допомогою охолодження повітря кондиціонерами в приміщенні, де розташовані МС РЗА, та встановленням додаткових вентиляторів на елементах, що сильно перегріваються. В мікропроцесорних системах для підвищення надійності широко використовуються дубльовані АЗ з однією версією ПЗ.

Мета досліджень – аналіз можливості підвищення надійності МС РЗА за допомогою методу дублювання АЗ та ПЗ, а також приклад розрахунку надійності структур, що досліджуються.

Основна частина дослідження. Для підвищення надійності МС широко використовується метод пасивного резервування, що дає змогу виправляти

помилки без підключення нових резервних вузлів, а тільки за рахунок тих, які із самого початку беруть участь у роботі нарівні з іншими. В основі методу пасивного резервування лежать два основні принципи: передача та обробка інформації за декількома паралельно працюючими каналами замість одного, при цьому помилки статистично незалежні; використання спеціальних засобів і процедур для відновлення правильної інформації на рівні окремих частин і надмірної системи в цілому, щоб виключити розповсюдження помилок по структурі [1, 2, 7].

Розглянемо варіант відмовостійкої двоканальної структури, коли АЗ створені з мікропроцесорів різних фірм, мають кожен свою систему контролю та діагностування (СКД) та ПЗ. Для аналізу надійності МС розглянемо випадок функціонування системи до першої відмови. При цьому можна прийняти, що ймовірність безвідмовної роботи (ІБР) АЗ змінюється залежно від часу за експоненціальним законом розподілу. Програмні засоби, як відомо, не зовсім підходять для оцінювання за допомогою експоненціального закону, однак, в умовах функціонування до першої відмови, коли кількість помилок, що призводять до відмови ПЗ, постійна, нові помилки не вносяться, тому можна прийняти, що ІБР ПЗ змінюються від часу теж за експоненціальним законом розподілу.

За допомогою табличного процесора були отримані таблиці істинності можливих станів працездатності МС і отримано формулу для визначення ІБР двоканальної МС з двома версіями АЗ та ПЗ (1):

$$P = (p_{11} \cdot p_{12} \cdot p_{21} \cdot p_{22} + p_{12} \cdot p_{22} + p_{11} \cdot p_{21}) \cdot P_{skd1} \cdot P_{skd2}, \quad (1)$$

де p_{11} , p_{12} – ІБР АЗ першого та другого каналів відповідно;

p_{21} , p_{22} – ІБР ПЗ першого та другого каналів відповідно;

P_{skd1} , P_{skd2} – ІБР СКД першого та другого каналів відповідно.

А також для двоканальної МС, у якій дубльовані канали ідентичні (2):

$$P1 = (2 \cdot p_1 \cdot p_2 - p_1^2 \cdot p_2^2) \cdot P_{skd1} \cdot P_{skd2}, \quad (2)$$

де p_1 , p_2 – ІБР АЗ та ПЗ відповідно; P_{skd1} , P_{skd2} – ІБР СКД першого та другого каналів відповідно.

Позначимо інтенсивності відмов для МС з двоверсійними АЗ та ПЗ:

$\lambda_{11}, \lambda_{21}$ – інтенсивність відмов АЗ та ПЗ першого каналу;

$\lambda_{12}, \lambda_{22}$ – інтенсивність відмов АЗ та ПЗ другого каналу;

$\lambda_{skd1}, \lambda_{skd2}$ – інтенсивність відмов СКД першого та другого каналів відповідно.

Інтенсивності відмов для МС з одноверсійними АЗ та ПЗ:

λ_1, λ_2 – інтенсивність відмов АЗ та ПЗ;

$\lambda_{skd1}, \lambda_{skd2}$ – інтенсивність відмов СКД першого та другого каналів відповідно.

В табличному процесорі заповнили таблиці, за допомогою якої побудували графік залежності $P(t)$ для двоверсійної МС (рис. 1) та $P_1(t)$ для одноверсійної МС (рис. 2). Порівняння отриманих залежностей (рис. 3) показує, що дублювання МС за принципом різних версій приводить до підвищення ІБР МС РЗА.

t, год	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
2	500	0,995012	0,995012	0,999950	0,997503	0,997503	0,999950	0,999944
3	1000	0,990050	0,990050	0,999900	0,995012	0,995012	0,999900	0,999578
4	1500	0,985112	0,985112	0,999850	0,992528	0,992528	0,999850	0,999205
5	2000	0,980199	0,980199	0,999800	0,990050	0,990050	0,999800	0,998727
6	2500	0,975310	0,975310	0,999750	0,987578	0,987578	0,999750	0,998146
7	3000	0,970446	0,970446	0,999700	0,985112	0,985112	0,999700	0,997465
8	3500	0,965605	0,965605	0,999650	0,982652	0,982652	0,999650	0,996686
9	4000	0,960789	0,960789	0,999600	0,980199	0,980199	0,999600	0,995812
10	4500	0,955997	0,955997	0,999550	0,977751	0,977751	0,999550	0,994844
11	5000	0,951229	0,951229	0,999500	0,975310	0,975310	0,999500	0,993785
12	5500	0,946485	0,946485	0,999450	0,972875	0,972875	0,999450	0,992637
13	6000	0,941765	0,941765	0,999400	0,970446	0,970446	0,999400	0,991402
14	6500	0,937067	0,937067	0,999350	0,968022	0,968022	0,999350	0,990082
15	7000	0,932394	0,932394	0,999300	0,965605	0,965605	0,999300	0,988680
16	7500	0,927743	0,927743	0,999250	0,963194	0,963194	0,999250	0,987197
17	8000	0,923116	0,923116	0,999200	0,960789	0,960789	0,999200	0,985635
18	8500	0,918512	0,918512	0,999150	0,958390	0,958390	0,999150	0,983996
19	9000	0,913931	0,913931	0,999100	0,955997	0,955997	0,999100	0,982283
20	9500	0,909373	0,909373	0,999050	0,953610	0,953610	0,999050	0,980496
21	10000	0,904837	0,904837	0,999000	0,951229	0,951229	0,999000	0,978638

Рис. 1. Аналіз залежності ІБР МС від часу двоверсійних АЗ та ПЗ при

$\lambda_{11}=1 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{21}=1 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{12}=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год,
 $\lambda_{22}=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{skd1}=1 \cdot 10^{-7}$ 1/год,
 $\lambda_{skd2}=1 \cdot 10^{-7}$ 1/год

t	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	500	0,997503	0,997503	0,997503	0,997503	0,99995	0,99995	0,997397
3	1000	0,995012	0,995012	0,995012	0,995012	0,9999	0,9999	0,994789
4	1500	0,992528	0,992528	0,992528	0,992528	0,99985	0,99985	0,992175
5	2000	0,99005	0,99005	0,99005	0,99005	0,9998	0,9998	0,989556
6	2500	0,987578	0,987578	0,987578	0,987578	0,99975	0,99975	0,986932
7	3000	0,985112	0,985112	0,985112	0,985112	0,9997	0,9997	0,984303
8	3500	0,982652	0,982652	0,982652	0,982652	0,99965	0,99965	0,981669
9	4000	0,980199	0,980199	0,980199	0,980199	0,9996	0,9996	0,979031
10	4500	0,977751	0,977751	0,977751	0,977751	0,99955	0,99955	0,976388
11	5000	0,97531	0,97531	0,97531	0,97531	0,9995	0,9995	0,973741
12	5500	0,972875	0,972875	0,972875	0,972875	0,99945	0,99945	0,97109
13	6000	0,970446	0,970446	0,970446	0,970446	0,9994	0,9994	0,968435
14	6500	0,968022	0,968022	0,968022	0,968022	0,99935	0,99935	0,965776
15	7000	0,965605	0,965605	0,965605	0,965605	0,9993	0,9993	0,963114
16	7500	0,963194	0,963194	0,963194	0,963194	0,99925	0,99925	0,960448
17	8000	0,960789	0,960789	0,960789	0,960789	0,9992	0,9992	0,957779
18	8500	0,95839	0,95839	0,95839	0,95839	0,99915	0,99915	0,955106
19	9000	0,955997	0,955997	0,955997	0,955997	0,9991	0,9991	0,952431
20	9500	0,95361	0,95361	0,95361	0,95361	0,99905	0,99905	0,949752
21	10000	0,951229	0,951229	0,951229	0,951229	0,999	0,999	0,947071

Рис. 2. Аналіз залежності ІБР МС від часу одноверсійних АЗ та ПЗ при

$\lambda_1=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_2=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год,
 $\lambda_{skd1}=1 \cdot 10^{-7}$ 1/год, $\lambda_{skd2}=1 \cdot 10^{-7}$ 1/год

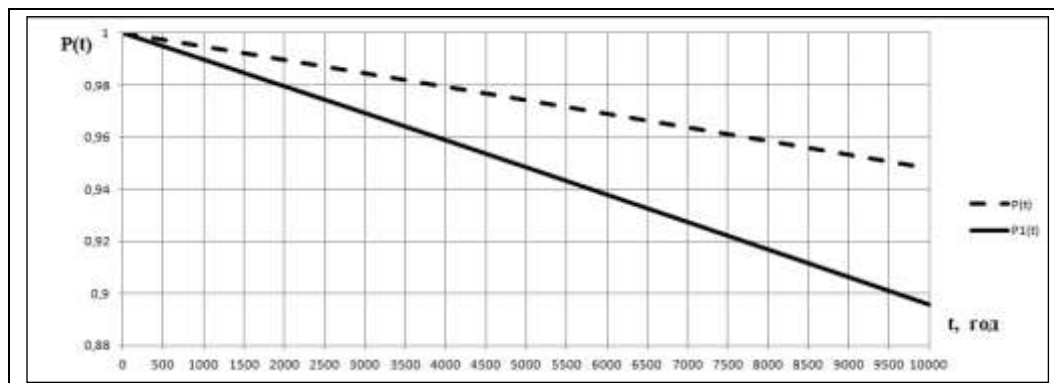


Рис. 3. Порівняння залежності ІБР МС від часу одноверсійних АЗ та ПЗ при $\lambda_1=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_2=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год ($P_1(t)$) та залежності ІБР МС від часу двоверсійних АЗ та ПЗ при $\lambda_{11}=1 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{21}=1 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{12}=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{22}=0,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, $\lambda_{skd1}=1 \cdot 10^{-7}$ 1/год, $\lambda_{skd2}=1 \cdot 10^{-7}$ 1/год

Висновок. Дослідження МС показали, що навіть маючи високу надійність одноверсійних АЗ та ПЗ, вони поступаються за надійністю МС, де АЗ та АЗ мають різні версії. Подальші дослідження будуть проводитись для адаптивних МС з автоматичним включенням

або відключенням резервного каналу та оцінкою надійності таких систем. Ці МС широко використовуються для підвищення надійності МС РЗА, однак введення багатоверсійності ПЗ та АЗ в ЕС на залізничному транспорті не розглядалось.

Список використаних джерел

1. Харченко, В.С. Безопасность критических инфраструктур: математические методы анализа и обеспечения [Текст] / В.С. Харченко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2011. – 641 с.
2. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы оценки и обеспечения [Текст] / под ред. В.С. Харченко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2011. – 603 с.
3. Харченко, В.С. Гарантоспособность и гарантоспособные системы: элементы методологии [Текст] / В.С. Харченко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 5(17). – С. 7–19.
4. Kharchenko, V.S. Dependable Systems and Multi-Version Computing: Aspects of Evolution [Text] / V.S. Kharchenko // Radio Electronic and Computer Systems. – 2009. – № 7 (41). – P. 46-60.
5. Гуревич, В.И. Микропроцессорные реле защиты: альтернативный взгляд [Текст] // Электроинфо. – 2006. – № 4 (№30). – С. 40-46.
6. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита [Текст] / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 547 с.
7. Колісник, М.О. Надійність програмних засобів мікропроцесорних пристроїв управління систем телекомунікації [Текст]: навч. посібник / М.О. Колісник, І.В. Піскачова. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 167 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор В.І. Мойсеєнко

Піскачова Ірина Вікторівна, канд. техн. наук, доцент кафедри обчислювальної техніки та систем управління Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-40. E-mail: vtsu@kart.edu.ua.
Бантюков Сергій Євгенович, канд. техн. наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки та систем управління Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-39. E-mail: vtsu@kart.edu.ua.
Колісник Марина Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортного зв'язку Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-83. E-mail: kart TZ@ukr.net.

Piskachova Iryna Viktorivna, candidate of technical Sciences, docent, Cafedra of Computer technics and Control Systems Ukraine State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-40. E-mail: vtsu@kart.edu.ua.
Bantyukov Sergey Evgenovich, candidate of technical Sciences, Head of Cafedra of Computer technics and Control Systems Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-39. E-mail: vtsu@kart.edu.ua.
Kolisnyk Maryna Olexandrivna, candidate of technical Sciences. docent, Cafedra of Transportation Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-83. E-mail: kart TZ@ukr.net