

*Ю.С. ГРИЩУК*, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПІ", Харків  
*Р.Ф. ТИМОШЕНКО*, магістр, НТУ "ХПІ", Харків

## **АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ**

Проведено порівняльний аналіз надійності різних видів релейного захисту електроенергетичних об'єктів, виявлені переваги і недоліки електромеханічних реле захисту і мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та запропоновано застосування високопродуктивних перешкодостійких мікроконтролерів.

Проведен сравнительный анализ надежности разных типов релейной защиты электроэнергетических объектов, выявлены преимущества и недостатки электромеханических реле защиты и микропроцессорных устройств релейной защиты и предложено применение высокопроизводительных помехоустойчивых микроконтроллеров.

**Вступ.** Кінцевою метою функціонування релейного захисту (РЗ) є забезпечення безаварійності об'єктів захисту (ОЗ) (електричних станцій, ліній електропередач, електроенергетичних установок і т.п.) тобто можливості системи РЗ шляхом відключення ОЗ вчасно запобігати розвитку аварійних ситуацій, небезпечних для встаткування й обслуговуючого персоналу. Попереднє покоління пристроїв РЗ було створено на базі електромеханічних реле, напівпровідникових елементів і аналогових інтегральних мікросхем (ІМ) і являє собою кінцеві автомати другого роду з незмінною (твердою) архітектурою.

На відміну від них мікропроцесорні пристрої релейного захисту (МПРЗ) мають можливість перепрограмування на реалізацію тих або інших функцій без зміни складу технічних засобів і реалізації алгоритмів виявлення складних ушкоджень, їх реєстрації, зображення, документування, автоматизації процесів діагностики, налагодження, виробування та дослідження [1-3].

**Метою даної роботи** є ознайомлення й виявлення переваг й недоліків деяких видів систем релейного захисту, заснованих на різних елементних базах у перших і останніх періодах розвитку систем захисту це електромеханічних реле захисту (ЕМРЗ) і мікропроцесорних пристроїв релейного захисту (МПРЗ).

**Аналіз джерел інформації.** В [4] на основі аналізу матеріалів ви-

кладених в [5-8] показано що твердження про те, що надійність МПРЗ вище надійності ЕМРЗ тому, що вони не містять рухливих частин, є необґрунтованим. Відмови ЕМРЗ пов'язують у літературі, звичайно, зі старінням і ушкодженням ізоляції (стирання, висихання), ржавінням гвинтів і клемних затискачів, зношуванням у механічній частині реле. Однак, з урахуванням того, що кількість циклів спрацьовування (тобто руху рухливих частин) за весь термін служби ЕМРЗ у реальних умовах експлуатації в енергосистемах не перевищує декількох сотень, говорити про механічне зношування рухливих частин реле можна тільки у випадку явного браку заводу-виготовлювача або використання невідповідних для цих цілей матеріалів. Що стосується корозії металевих елементів або висихання ізоляції, то це є наслідком використання при виготовленні реле неякісних матеріалів. Такі дефекти є характерними для ЕМРЗ Російського виробництва й практично не зустрічаються в реле провідних Західних компаній, що перебувають в експлуатації по 30-40 років навіть в умовах тропічного клімату. Таким чином, говорити про недостатній механічний ресурс ЕМРЗ, як виду реле, абсолютно необґрунтовано. З іншого боку, якщо рухливі елементи ЕМРЗ перебувають у русі тільки в моменти спрацьовування реле, то тисячі електронних компонентів МПРЗ постійно перебувають у роботі: постійно працюють генератори сигналів, численні транзисторні ключі, підсилювачі, стабілізатори напруги, мікропроцесор постійно обмінюється сигналами з елементами пам'яті, аналого-цифровий перетворювач постійно веде обробку вхідних сигналів і т.д. Багато елементів постійно знаходяться під впливом високої робочої напруги ( 220-250 В) і імпульсів перенапруг, що періодично виникають у вхідних ланцюгах і ланцюгах живлення, постійно розсіюють потужність (тобто нагріваються) і т.д. В особливо важкому режимі працюють у МПРЗ імпульсні високочастотні джерела живлення, які дуже часто є причиною відмов МПРЗ.

На основі аналізу великої кількості матеріалів в [4] детально розглянуто питання про достовірність наступних тверджень про те, чи:

- надійність напівпровідникових реле на дискретних компонентах вище надійності електромеханічних реле;
- надійність напівпровідникових пристроїв захисту на основі інтегральних мікросхем з високим ступенем інтеграції вище, ніж надійність пристроїв на дискретних електронних компонентах;
- надійність мікропроцесорних реле вище надійності електронних не мікропроцесорних пристроїв.

Результати аналізу показали, що твердження про безумовно більшу надійність електронних реле перед електромеханічними є розповсюджена омана. Підвищеною надійністю напівпровідникові реле володіють тільки при великій кількості комутаційних циклів або при великій частоті комутації. У багатьох інших випадках надійність напівпровідникових реле істотно нижче надійності електромеханічних. Дискретні електронні елементи мають набагато більше високу стійкість до перенапруг і інших несприятливих впливів, чим інтегральні мікросхеми. За даними роботи [7] 75% всіх ушкоджень мікропроцесорних пристроїв відбувається через вплив перенапруг. Такі перенапруги з амплітудою від десятків вольтів до декількох кіловольтів, що виникають внаслідок комутаційних процесів у ланцюгах або при впливі електростатичних розрядів, є "смертельними" для внутрішніх мікроелементів мікросхем і процесорів. По даним [8] звичайні транзистори можуть витримувати напругу електростатичного розряду майже в 70 разів більше високе, чим, наприклад, мікрочип пам'яті мікропроцесорної системи. Найстрашніше, що випадкові збої в роботі мікропроцесора, викликані електромагнітними шумами, можуть бути тимчасовими, такими як мимовільні зміни змісту оперативної пам'яті й регістрів, а внутрішні ушкодження можуть носити схований характер. Обоє цих виду ушкоджень не виявляються ніякими тестами й можуть проявлятися в самі несподівані моменти. За даними статистики, представленим у роботі, добре видно, що реле захисту на електронних елементах мають у троє більших пошкоджуваностей, чим електромеханічні, а мікропроцесорні - в 50 разів більшу пошкоджуваність МПРЗ. Крім того, на відміну від звичайних мікросхем, відмовою мікропроцесора є не тільки його фізичне ушкодження, але також і збої в його програмному забезпеченні ушкодження не відомі раніше для електромеханічних і електронних реле. Як відзначено в роботі програмні багги далеко не завжди виявляються при тестуванні МПРЗ. Додатковим джерелом проблем є необхідність періодичного відновлення версій програм, використовуваних МПРЗ, при якому часто виникає невідповідність між "залізом" і програмою [4].

Дуже розповсюдженою є така теза, що надійність МПРЗ значно вище надійності всіх інших типів реле захисту завдяки наявності убудованої самодіагностики. Самодіагностикою в МПРЗ охоплене 70-80 % всіх елементів МПРЗ. Ця теза зустрічається практично у всіх публікаціях, присвячених перевагам МПРЗ. Проаналізуємо розглянуті особливості цієї самодіагностики, які докладно наведені в [4].

#### **Аналіз особливостей самодіагностики.**

*Аналого-цифровий перетворювач (АЦП).* Це пристрій, що перет-

ворює вхідний аналоговий сигнал із трансформаторів струму й напруги у двійковий код, який передається через спеціальні фільтри на обробку в мікропроцесор. Всі АЦП працюють шляхом вибірки вхідних значень через фіксовані інтервали часу й у такий спосіб перетворюють синусоїдальний сигнал у набір фіксованих амплітуд. Деякі сучасні АЦП настільки складні, що містять у собі навіть невеликий мікропроцесор, керуючий їхньою роботою. АЦП - це фактично головний вузол вимірювального пристрою. Як і будь-якому складному вимірювальному пристрою АЦП властиві різні погрішності й помилки перетворення вхідної величини. Як же можна контролювати в процесі вхідної величини, що безупинно змінюється, справність такого складного пристрою? Оскільки єдиним елементом з незмінним рівнем сигналу в процесі роботи АЦП є джерело опорної напруги, те саме на моніторингу якого й заснована так звана самодіагностика АЦП [4-8]. Питання про *надійність елементів пам'яті МПЗ* у дійсності набагато складніше. Виявляється, елементи пам'яті піддаються випадковим непередбаченим збоєм, не пов'язаним з фізичним ушкодженням комірок пам'яті. Такі випадкові, оборотні збої, обумовлені мимовільною зміною змісту комірок пам'яті, називаються "м'якими помилками", не плутати із програмними помилками. Помилки такого роду були невідомі раніше для електронних пристроїв, виконаних на дискретних напівпровідникових елементах або на звичайних мікросхемах[4]. Прогрес останніх років в області нанотехнологій привів до істотного зниження розмірів напівпровідникових елементів (мова йде про одиниці й навіть частки мікрона), зменшення товщини шарів напівпровідникових і ізоляційних матеріалів, зменшення робочих напруг, збільшення робочої швидкості, зменшення електричної ємності окремих комірок пам'яті, збільшення щільності розміщення елементарних логічних осередків в одному пристрої. Все це разом узятє привело до різкого підвищення чутливості елементів пам'яті до іонізуючих випромінювань. Ця чутливість стала настільки високою, що звичайне радіаційне тло на рівні моря стає небезпечним для комірок пам'яті. Особливо небезпечними є потоки високоенергетичних елементарних часток, що приходять із космосу. Навіть одна така частка при влученні в комірку пам'яті народжує вторинні потоки електронів і іонів, що викликають мимовільне перемикання елементарного транзистора або розряд ємності в елементах з пам'яттю. Проблема усугубляється тим, що в сучасних мікропроцесорних структурах спостерігається стійка тенденція розширення використання елементів пам'яті. Багато сучасних інтегральних мікросхем високого рівня інтеграції, що входять до складу мік-

ропроцесорного пристрою, містять убудовані елементи пам'яті досить великої місткості, справність яких взагалі ніяк не контролюється. Як показано в роботах, проблема різкого збільшення чутливості до іонізуючих випромінювань актуальна не тільки для елементів пам'яті, але також і для високошвидкісних логічних елементів, компараторів і т.д., тобто, практично, для всієї сучасної мікроелектроніки [4-8].

*Центральний процесор (ЦП).* На відміну від описаних вище складностей з контролем справності пам'яті, самоконтроль ЦП виглядає досить простим.

Він просто посилає контрольні імпульси із заданим періодом проходження в так званий сторожовий таймер, що скидається у вихідний стан із приходом кожного нового контрольного імпульсу, після чого починає новий відлік часу. Якщо до певного моменту часу зі ЦП не надійшов черговий контрольний імпульс, то таймер запускає процес перезавантаження ЦП. При серйозній несправності мікропроцесора і його "зависанні" при перезавантаженні, що виявляється таймером як повторна відсутність контрольного сигналу, відбувається блокування ЦП і видача сигналу про несправність центрального процесора. Робота з відстеження контрольних імпульсів сторожовим таймером синхронізована за допомогою зовнішніх синхроімпульсів. Іноді сторожові таймери вбудовуються безпосередньо в мікропроцесор, іноді являють собою зовнішні спеціалізовані інтегральні мікросхеми. Пауза між контрольними імпульсами сторожового таймера може бути 0,1 або 1,6 сек. Зовсім очевидно, що перевірити в такий спосіб справність сотень тисяч транзисторних наноструктур, з яких властиво й складається будь-який мікропроцесор, абсолютно неможливо. Мова може йти про моніторинг лише загальної працездатності ЦП, тобто про те, живий він або мертвий. При дуже складній внутрішній структурі ЦП, що містить велику кількість вузлів і мікроелементів, контрольні сигнали зі ЦП можуть продовжувати надходити на сторожовий таймер навіть якщо частина внутрішньої структури ЦП виявиться ушкодженою[4-8].

*Джерело живлення.* МПРЗ всіх типів забезпечуються так званими імпульсними джерелами живлення, у яких вхідна напруга надходить на випрямляч і фільтр, після чого переривається з великою частотою (десятки кілогерців) за допомогою потужного транзисторного комутуючого елемента тобто перетворюється в змінне високочастотне. Ця високочастотна напруга трансформується за допомогою високочастотного трансформатора в напругу низького рівня (частіше всього. 12 В), випрямлюється, фільтрується й стабілізується. Далі із цієї постійної

напруги формуються більше низькі напруги (5 В, наприклад), необхідні для роботи МПРЗ. Мікропроцесори, звичайно, досить чутливі до рівня живлячої напруги й можуть робити непередбачені операції при певнім зниженні напруги живлення, у зв'язку із чим, у МПРЗ здійснюється постійний моніторинг рівня напруги живлення ЦП. Як і у випадку зі сторожовим таймером, ця мікросхема робить генерацію сигналу, що блокує роботу ЦП при неприпустимому зниженні напруги живлення. Сигнал, що блокує, залишається доти, поки напруга живлення не відновиться. Не можна вважати такий контроль рівня напруги джерела живлення його самодіагностикою, що підвищує надійність його функціонування, оскільки мова йде про чисто технологічне внутрішнє блокування, що запобігає збою в ЦП. До надійності джерела живлення такий контроль не має ніякого відношення. А тим часом, саме джерела живлення МПРЗ є самим ненадійним вузлом МПРЗ [4].

- *Вихідні електромагнітні реле.* Як показано в дослідженнях [4-8], контакти мініатюрних електромеханічних реле працюють зі значним перенавантаженням. Тому надійність цих реле істотно знижена в порівнянні з величиною, нормованої заводом-вироблювачем. З іншого боку, у рекламних проспектах МПРЗ різних виробників обов'язково відзначається, що справність таких важливих елементів, як вихідні реле, безупинно контролюється засобами самодіагностики МПРЗ. В дійсності перевірити справність електромеханічного реле в працюючих МПРЗ, якщо контакти цього реле включені безпосередньо в ланцюг котушки вимикача, що відключає не можна [4].

Теза про те, що МПРЗ є істотно більше надійними в порівнянні із пристроями релейного захисту попереднього покоління, тому що містять значно менше число елементів і ці елементи значно менше піддані фізичному старінню нічим не підтверджується. В дійсності кількість елементів, з яких складається МПРЗ на кілька порядків більше, ніж кількість елементів, з яких склалися реле захисту попередніх поколінь. Що стосується нібито більше інтенсивного фізичного старіння, елементів реле захисту попереднього покоління, то ця теза також не відповідає дійсності. Автор цієї тези порівнює сучасні матеріали, що застосовуються в МПРЗ з матеріалами, розробленими й, що проробили в реле захисту десятки років. Як вже відзначалось вище, старі електромеханічні реле західного виробництва, у яких застосовувалися високоякісні матеріали й покриття, дотепер успішно працюють і прекрасно виглядають. Крім того, за останні десятиліття прогрес в області матеріалів досягнуто не менший, чим прогрес в області мікроелектроніки. З іншого боку, не все є так райдужно зі старінням електронних компо-

ментів, широко використовуваних у МПРЗ. Так, навіть високоякісні електролітичні конденсатори японського виробництва починають змінювати свої параметри через 7-10 років роботи у високочастотних імпульсних джерелах живлення, застосовуваних у МПРЗ. У результаті зміни параметрів всього лише одного з таких конденсаторів, повністю перестають функціонувати, джерела живлення. Ще однією проблемою є прагнення виробників до мініатюризації МПРЗ за всяку ціну, що приводить до використання в МПРЗ електронних елементів, що працюють із перевантаженням і розсіюють підвищену кількість тепла, що аж ніяк не сприяє підвищенню їхньої надійності й зменшенню старіння. Особливо актуальна ця проблема для ланцюгів цифрових входів, на які подається напруга до 250 В. Багатошарові друковані плати МПРЗ припускають величезну кількість контактних переходів (перемичок) між шарами. Відомі випадки неправильних дій МПРЗ внаслідок зростання перехідного опору цих переходів. Конструкція багатьох типів МПРЗ припускає наявність материнської друкованої плати із багато-контактними роз'ємами й функціональними друкованими платами з відповідними розніманнями, що зчленовуються з материнською платою. Замість материнської плати іноді використовуються гнучкі багатожилеві шини із численними контактними роз'ємами, що з'єднують між собою окремі друковані плати. Далеко не завжди всі ці контактні з'єднання забезпечують надійну передачу слабкострумових сигналів [4-8].

Разом з тим на даний час виробляються нові високопродуктивні, перешкодостійкі з наднизьким енергоспоживанням 8-ми і 16-ти розрядні однокристалні мікроконтролери зі зменшеними габаритами, які можна достатньо легко вмонтувати в МПРЗ і надійно захистити від впливу небажаних наведених вище факторів [2,3].

**Висновок.** На основі докладного аналізу із залученням великої кількості літературних джерел показано, що ЕМРЗ перебувають в експлуатації енергосистем по 30-40 років і що насправді надійність МПРЗ на даний час нижче надійності електромеханічних і електронних реле захисту виконаних на дискретних елементах.

Для підвищення надійності МПРЗ в них доцільно застосовувати сучасні високопродуктивні, перешкодостійкі з наднизьким енергоспоживанням 8-ми і 16-ти розрядні однокристалні мікроконтролери, відповідно, фірми SiLabs сімейств C8051F060/61/62/63/64, C8051F330/331 та фірми Texas Instruments MSP430F з потужною за складом високочастотною аналоговою і цифровою периферією.

**Список літератури:** 1. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты. / В. В. Михайлов, Е. В. Кириевский, Е. В. Кириевский, Е. М. Ульяницкий и др. / Под ред. В. П. Морозкина. – М.: Энергоатомиздат, 1988.– 240 с. 2. Грищук Ю. С., Кузнецов А. И., Ржевский А. Н., Грищук С. Ю. Применение микроконтроллеров в схемах автоматизированного управления испытаниями электрических аппаратов. // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – Вип. 35. – С. 63-68. 3. Грищук Ю. С. Микропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 348 с. 4. Гуревич В.И. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты. Мифы и реальность // Вести в электроэнергетике. – 2008. – № 4. – С. 29-37. 5. Коновалова Е. В. Основные результаты эксплуатации устройств РЗА энергосистем Российской Федерации: Сб. докладов XV науч.-техн. конф. "Релейная защита и автоматика энергосистем", Москва, 2002. 6. Белотелов А. К. Научно-техническая политика РАО "ЕС России" в развитии систем релейной защиты и автоматики / Сб. докладов XV науч. техн. конф. "Релейная защита и автоматика энергосистем", Москва, 2002. 7. Гуревич В. И. Как нам обустроить релейную защиту: мнения российских специалистов и взгляд со стороны // Вести в электроэнергетике. – 2007. – № 2. 8. Микропроцессорные реле защиты: альтернативный взгляд // Электроинфо. – 2006. – № 4.



**Тимошенко Руслан Фаритович**, магістрант кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з дослідженням електричних апаратів з мікроконтролерним керуванням.



**Грищук Юрій Степанович**, канд. техн. наук, професор кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з використанням методів мікроконтролерного керування в електричних апаратах і електропобутовій техніці, автоматизацією їх випробувань та досліджень, розробкою математичних моделей на основі теорії планування експериментів.

*Поступила в редколегію 31.03.2010*