

УДК 621.713.13: 621.313

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.)¹,
А.П. НІКІФОРОВ (д-р техн. наук, доц.)²

¹Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», ²Національний університет біоресурсів і природокористування України, Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики і енергозбереження

¹svf1934@gmail.com, ²a.p.nikiforov@i.ua

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ МОРФОЛОГІЧНОГО РІВНЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ СМАРТ-ГРИД. ЧАСТИНА 2. МОДЕЛЮВАННЯ

У Частині 1 розроблена узагальнена еквівалентна схема інформаційних датчиків пристроїв релейного захисту та автоматики. Розробку вдалось виповнити послідовно від верхнього ієрархічного рівня обробки інформації в системі до нижнього в пристрої. Складено ієрархічну систематизацію Ψ -структур відомих і нових інформаційних датчиків, що дозволяє оцінити відносну ефективність їх структур. В Частині 2 виповнено моделювання за допомогою послідовності розроблених схем проходження конкретної інформаційної сигнальної складової від точки формування в розподільній електромережі 6–35 кВ до виходу, наприклад, в системі SCADA. Оцінюється різниця формування селективності і блокування схем, тобто на самому початковому рівні структури пристрою. Цей рівень реалізується спільно на одних і тих же структурних елементах. Виявлено, що деякі відомі алгоритми пристроїв і терміналів, слід віднести до початкового морфологічного рівня обробки інформації. Тоді вони стають ефективними смарт-датчиками. Показана необхідність побудови смарт-датчиків. Ілюструється різниця в способах підвищення селективності і якості блокування між морфологічним і іншими ієрархічними рівнями.

Ключові слова: *смарт-грид, релейний захист та автоматика, захист від однофазних замикань на землю, структурно-інформаційний метод, смисловий сигнал, розпізнавання образів, моделювання.*

Вдосконалення відомих датчиків si-методом. Наводиться приклад опису трьох з Ψ -структур TS пристроїв RPA (Табл. 1.1). Опис складається з результатів моделювання, синтезу та вдосконалення, що виконані в САПР. Використані САПР «OrCAD» для аналого-імпульсної реалізації пристроїв RPA та середовище «Matlab» для цифрової і імпульсної реалізації. Досягнуто мінімізації інерції фільтрів.

В-структура TS. «Час-імпульсний критерій». Відноситься до групи TS «Блокування» або до правил PB «Проти». Критерій роботи «При перевищенні сигналом деякого амплітудного значення спрацьовування вихідного порога p_N відбудеться при збігу тривалості перевищення сигналу над тривалістю відсутності». Критерій дозволяє ефективно усувати більш високочастотні коливання в сигналі, імпульсні короточасні події. Задіється в схемі GES_{TS} на увазі його ефективності при правильному налаштуванні часових параметрів. Для формування час-імпульсного критерію в схему GES_{TS} введені структурні елементи з правилами PB3–PB4, що знаходяться перед пороговим елементом p_N (рис. 1.1–1.2).

Короткий опис структурної схеми TS. Складається з вхідного смугового фільтру, порогового амплітудного формувача для час-імпульсного критерію, порогового детектора із гістерезисом і елементом зміщення для забезпечення високої чутливості до спрацьовування порога p_N . Компаратор PB3 перетворює амплітуду вхідного сигналу в ШИМ-сигнал з подальшою демодуляцією фільтром PB4, а також правилом PB5 вихідного порога p_N . Реалізовано, наприклад, в реле РТЗ-51, призначеного для завдання про пошук пошкодженого приєднання мережі при ОЗЗ (рис. 2.1–2.2). Видно, що після завершення часу спрацювання $T_{СП}$ робота часозадаючого ланцюжка триває, тобто при наступних пробоях ОЗЗ час $T_{СП}$ буде скорочуватися. Це критично при смисловій ситуації SN «Зміна приєднань ОЗЗ», «Зміна SN з перешкодою ОЗЗ». Показано сигнали тієї ж SN в стислому масштабі у вікнах на рисунках для пошкодженого і неушкодженого ділянок ОСР. У вікнах показана зміна фазових співвідношень ВЧС–СЧС по відношенню до НЧС на зворотну (рис. 2.3–2.4). Це призводить до затягування роботи часозадаючого ланцюжка на пошкодженому приєднанні до наступного напівперіоду ОСР. Тоді розрахований позитивний вплив правила PB зменшується. При тривалій дії SN «Перешкодова» можливо помилкове спрацьовування TS. Для усунення цього ефекту роботу RC-ланцюжка також слід обнулювати після спрацьовування TS.

На рис. 2.3 показана робота TS для неушкодженого приєднання ОСР. Видно, що при ВЧС–СЧС на початку ОЗЗ відбувається спрацьовування компаратора. Час їх дії короточасний і правило PB «Час-імпульсний критерій» не дозволяє TS спрацювати хибно. Однак, при складних, тривалих SN «Пробой ОЗЗ на кожному періоді», «Зміна SN» можлива помилкова робота TS. Для усунення цього ефекту слід задіяти PB «Вікно

селективності». «Вікно» відкривається після дії ВЧС–СЧС і закривається після спрацювання TS і по зниженню $3_{\text{ио}}$.

I-структура TS. Спрямований смарт-TS «Один ТТНП $3_{\text{ио}}$ із додатковою обмоткою $3_{\text{ио}}$ спільно із реле РТЗ-51». Датчик відноситься до групи TS «Селективність». Використовується метод синхронного детектування, при якому синхронний детектор частково реалізований на двох ТТНП. Синхронізуючим є сигнал $3_{\text{ио}}$, зміщений на невеликий кут. Конструктивна реалізація TS виявляється рознесеною і розділеною на дві частини — перша знаходиться поруч з ТТНП, формує імпульсний більший сигнал і передає в контролюючу частину реле. Може застосовуватися одинарна і подвійна схеми синхронного детектора.

Критерій роботи «Збільшення обсягу інформації для селективного пошуку задіянням властивостей і параметрів двох вимірювальних трансформаторів струму ТТНП». Амплітуда і площа сформованого імпульсу має більший обсяг інформації. Формується більш виражений направлений селективний сигнал із наявної сукупності складових і перешкод. В результаті вихідний сигнал синхронного детектора виявляється у вигляді більш чітко вираженого імпульсу, полярність якого визначає пошкоджену ділянку ОСР.

Такий TS не має правил блокування РВ. Для додавання РВ можна застосувати час-імпульсний критерій. Так для реалізації час-імпульсного критерію з накопичувальним алгоритмом СЧС-датчика $3_{\text{ио}}$ можна використовувати реле РТЗ-51 без вбудованого трансреактора. Схема TS сформована і досліджена в САПР «OrCAD». Розрядні і зарядні складові відфільтровуються.

J-структура TS. Спрямований смарт-TS «Два ТТНП $3_{\text{ио}}$ із додатковою обмоткою $3_{\text{ио}}$ спільно із реле РТЗ-51». Є розвитком I-структури TS. Одним з варіантів схеми TS може бути принципова схема, побудована на трансформаторах з датчиком Холла. Реалізована за схемою балансного детектора з формувачем виходу U_s (рис. 2.1). Вхідні сигнали U_1 , U_2 представлені в узагальненому вигляді.

Дія «+» реалізована на елементах R_{73} , R_{74} , R_{15} . Коливальна складова усувається RC-фільтром R_{73} , R_{74} , R_{16} . Таким чином, два джерела сигналів результуючий сигнал, якщо один з джерел видає сигнал, при цьому інше джерело сигнал не видає. Видача джерелом сигналу залежить від фазіровки вхідних обмоток трансформатора струму. Так обмотка $3_{\text{ио}}$ включена зустрічно по відношенню до обмотки $3_{\text{ио}}$ на різних трансформаторах K_1 , K_2 .

Модель датчика Холла в САПР сформована на основі моделі трансформатора. Датчик має вбудовану схему посилення. У моделі це реалізовано операційним підсилювачем, що знаходиться між двома моделями трансформатора. Диференціальна схема формування вихідного сигналу TS із джерелом живлення, реалізована також на фізичній моделі мережі. Виготовлена фізична модель такого пристрою. Однак схема TS має намотувальні елементи, що робить схему більш трудомісткою у виготовленні та відносно громіздкою, що вимагає джерела живлення. Однак інші елементи гальванічної розв'язки (датчики Холла, сигнальні трансформатори, трансреактори) також мають обмотки. Елементи «постійної» складової « $\sin(\alpha)$ », реалізовані на елементах — вихідні обмотки датчиків Холла K_1 , K_2 , мости, випрямні, навантаження R_{15} , R_{29} .

Отримані загальні результати. Для подальшої реалізації інформаційних датчиків TS пристроїв RPA на МК-основі використовуються послідовність двох схем GES_{TS} (рис. 1.8) і GES_{RPA} [1.4]. Структура ОСР описується граматики G розпізнавання алгоритмів пристроїв RPA та датчиків TS. Обрані Ψ -структури TS (Табл. 1.1, Табл. в [1.1, 1.4]) для контролю ряду контурів ОСР згідно із схемою $GES_{ОСР}$. Для реалізації додаткових TS в морфологічному автоматі схеми GES_{RPA} обрана J2-структура TS. Ця структура ефективніше Z-структури TS (Табл. 1.1). Це сталося завдяки залученню селективних елементів схеми GES_{TS} кілька разів, а саме для Z-структури TS коефіцієнт ефективності $K_{EFF}=1$ при сумарному коефіцієнті $K_{\Sigma}=604$ і число правил $P_{\Sigma}=7$. Для J2-структури TS коефіцієнт $K_{EFF}=1.03$ при сумарному коефіцієнті $K_{\Sigma}=622$.

Для порівняння ефективності запропонованих рішень візьмемо широко відоме реле РТЗ-51. Порівняння виконується для схем GES_{TS} та GES_{RPA} по (Табл. 1.1 і рис. 1.8). У кожній таблиці Ψ -структур TS, RPA та SCADA [1.1, 1.4] приведена структура реле РТЗ-51. Це стало можливо через те, що структуру РТЗ-51 можна інтерпретувати як «просте» реле або в якості амплітудного додаткового TS. Структура РТЗ-51 відповідає В-структурі TS (Табл. 1.1). Її ефективність складається із сумарних вагових коефіцієнтів $K_{\Sigma}=357$, коефіцієнта $K_{EFF}=0.59$ і числа правил $P_{\Sigma}=7$. Додатково в порівнянні із запропонованою в цій роботі J2-структурою TS, у якій коефіцієнт ефективності $K_{EFF}=1.03$ при сумарному ваговому коефіцієнті $K_{\Sigma}=622$. Тобто запропонована J2-структура TS на $1-0.59=0.41$ плюс 3% або на 44% ефективніше реле РТЗ-51. Структура РТЗ-51 відповідає G7-структурі RPA (Табл. 1.1).

Ефективність двох G7- і Z-структур RPA становить G7-структура RPA з $K_{\Sigma}=309$, $K_{EFF}=0.18$, $P_{\Sigma}=9$, а Z-структура RPA $K_{\Sigma}=1672$, $K_{EFF}=1$, $P_{\Sigma}=42$. Тобто запропонована в [1.4] Z-структура RPA на $1-0.18=0.82$ або на 82% ефективніше реле РТЗ-51.

При розробці нових алгоритмів чи пристроїв RPA та систем аналогічно вибирається Ψ -структура TS для морфологічного автомата схеми GES_{RPA} в [1.1, 1.4]. Вибір повторюється для всіх важливих контурів ОСР (рис. 1.6). Так для СЧС-контур ОСР спільна робота J2-структури TS і Z-структури RPA буде виконувати двічі множення $3_{\text{ио}}$ і $3_{\text{ио}}$. Один раз в схемі TS, другий раз в схемі RPA. У пристрої можна реалізувати спільну роботу J2-структури TS і Z-структури RPA для НЧС-контур ОСР. Моделювання такої послідовності багатократного синхронного детектування запропонованих структур показує, що якість формування спрямованого селективного сигналу зростає при поліпшенні відмінності сигналів для пошкодженої ділянки ОСР від сигналів непошкоджених ділянок. Тоді обсяг селективної інформації зростає.

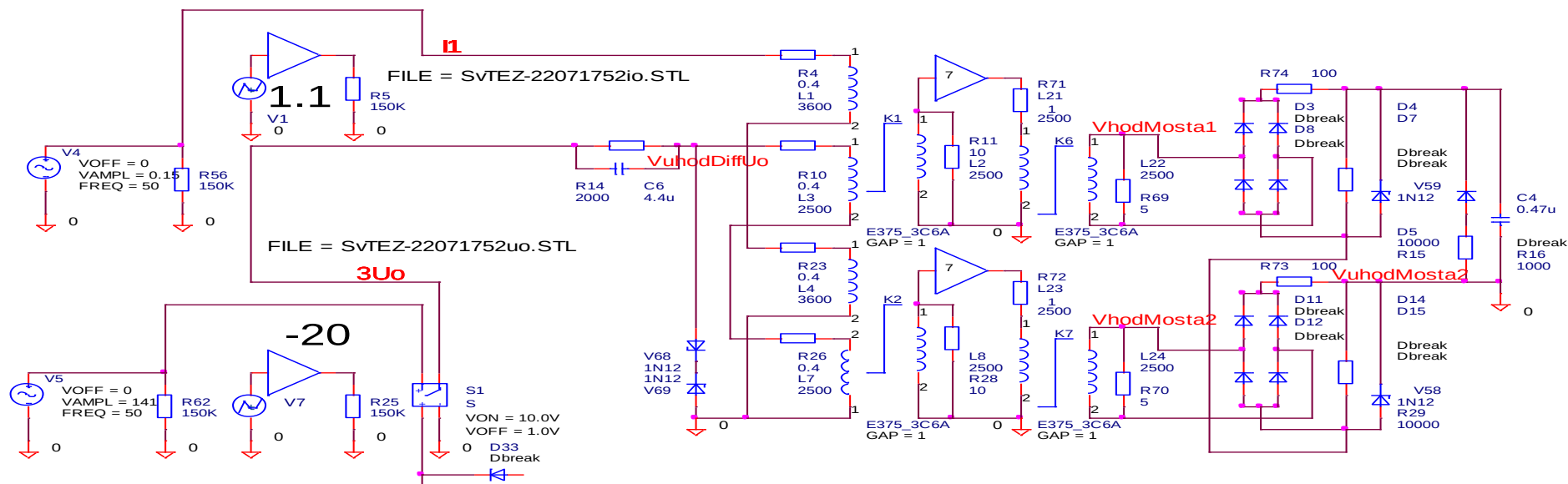


Рисунок 2.1 – *I-, J-структура TS. Направлений смарт-TS «1 і 2 ТТНП 3іо з додатковою обмоткою 3іо без реле» з параметрами для промислової частоти*

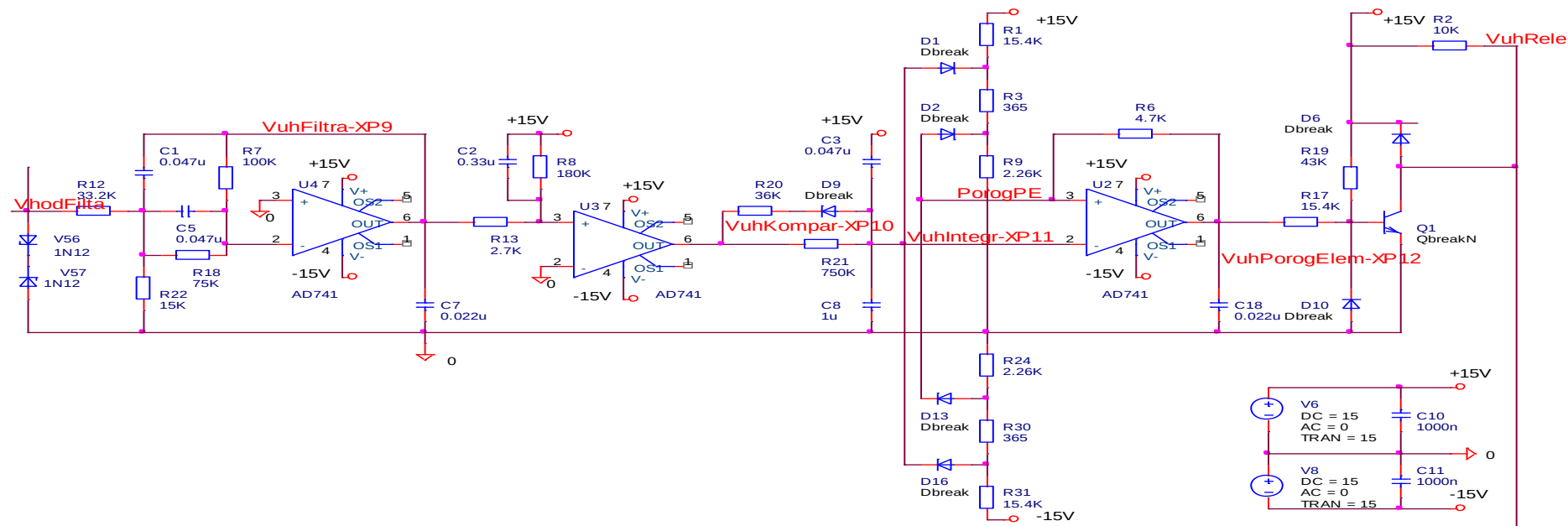


Рисунок 2.2 – *B-структура TS. Ненаправлений TS «Час-імпульсний критерій». Принципова схема реле PTZ-51 з новими параметрами для промислової частоти*

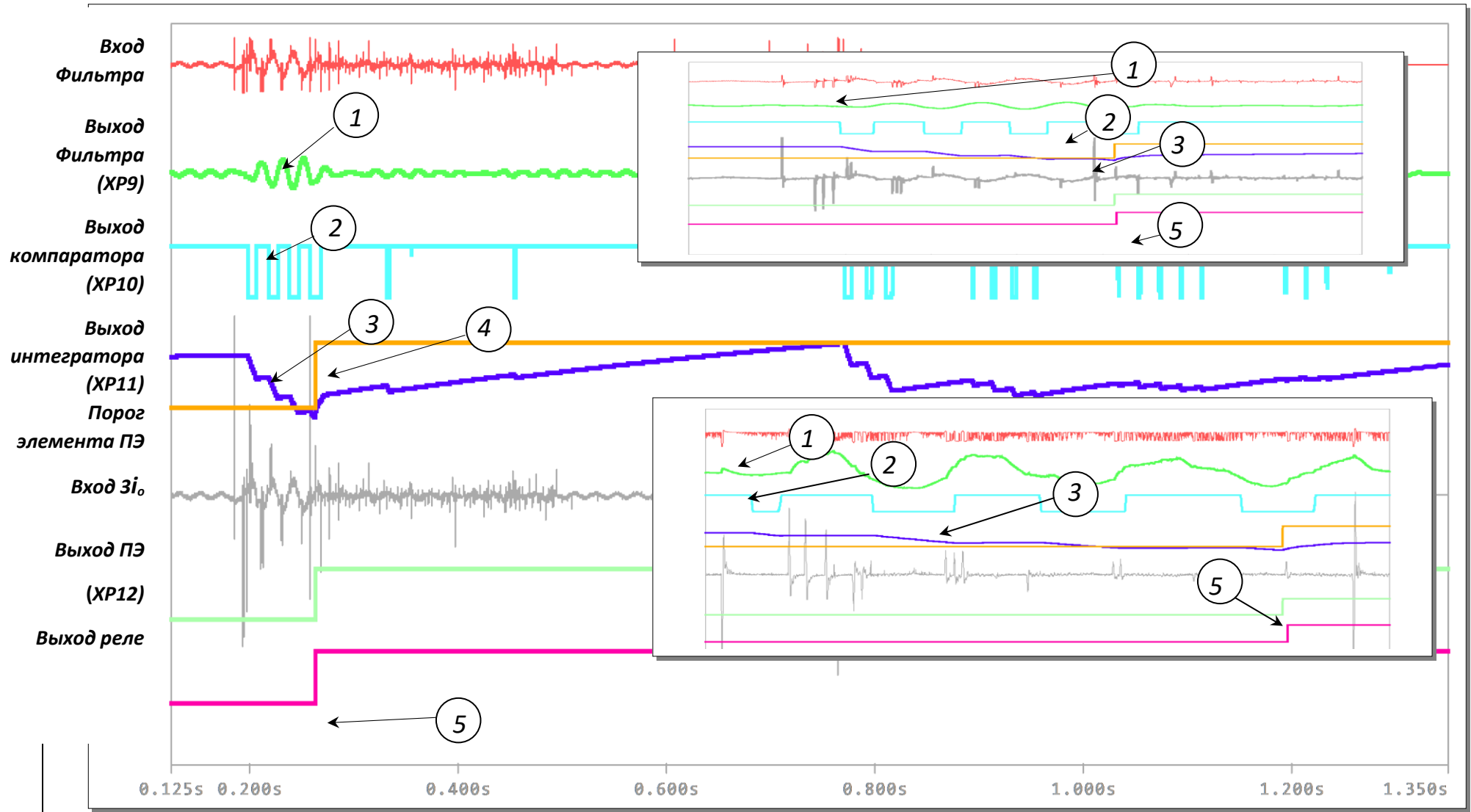


Рисунок 2.3 – Кар'єрна мережа, $I_c=4A$. «Короткочасне металеве ОЗЗ». Моделювання роботи датчика для J-структури TS з реле PT3-51. Для реального сигналу смислової SN «Короткочасне металеве ОЗЗ». Сигнали для пошкодженої ділянки мережі. Моделювання роботи реле з новими параметрами для промислової частоти. Сигнали пошкодженого ($K_u = 0.000127$) і неушкодженого приєднань ($K_u = 0.005$) мережі. Ефективна фільтрація ВЧС Zi_o (див. Т1). Селективне Зведення реле (див. Т2). Час контролю часо-імпульсного критерію роботи реле (див. Т3). Селективне спрацювання порога pN (див. Т4). Правильна видача сигналу про спрацювання реле (див. Т5)

Застосування. Теоретичні результати роботи, що отримані можливо використати для задач реалізації аутсорсингових робочих місць, впроваджувальних підприємств, підвищення ефективності роботи експертів, вдосконалення та розвиток електротехнологій, застосування у навчальному процесі університетів. Практичні результати можна використати для модернізації існуючих реле та вдосконалення і розробки нових алгоритмів мікропроцесорних терміналів. Вдосконалення пристроїв для задач розпізнавання перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю на єдиному інформаційному полі системи SCADA. Для побудови смарт-датчиків, вдосконалюємих пристроїв «П-ВЦР-СП» або «P-VCR-SP» захисту від однофазних замикань на землю з функціями височастотного реєстратора і селективного пошуку пошкодженої ділянки мережі 6–35 кВ, обрані найбільш ефективна J2-структура TS із Z-структурою RPA. Графічне представлення інформації може бути реалізовано на основі віджета «B-KHPC» або «W-LZSC» — віконного уявлення роботи терміналу «T-KHPC-APK» або «T-LZSC-ARC» та системи ASNOM «KHPC» на дисплеї комп'ютера АСУ ТП «ГЩУ» [1.1–1.4].

Висновки по частині 2

1. Моделювання в САПР показує, що «прості» пристрої RPA не обробляють увесь обсяг інформації, що є на їх входах. Це одна з причин нестійкості роботи пристроїв RPA. Усунути малу ефективність можна на основі аналізу отриманих таблиць Ψ -структур TS і RPA. Аналіз виявив, що структури RPA, які знаходяться на початку таблиці повинні бути доповнені логічними правилами обробки інформації, але при їх перенесенні в таблицю Ψ -структур TS вони стають найбільш ефективними смарт-датчиками TS. Логічні правила при цьому будуть реалізовані всією схемою GES_{RPA} . Показано, що найбільш якісними Ψ -структурами TS є смарт-датчики відносної (синхронної) дії. Структурні схеми таких датчиків наближаються до «простих» пристроїв RPA. У цій роботі таблиця Ψ -структур TS використовується для аналізу і синтезу смарт-датчиків TS.

2. На основі моделювання роботи схем GES_{TS} і аналізу таблиці Ψ -структур TS показано, що TS, в тому числі і смарт-TS, часто виявляються не основними, а додатковими селективними датчиками TS. Це відбувається через обмеженість числа правил PS , PB в їх структурі, отже, недостатності вихідної інформації для стійкої роботи TS і пристроїв RPA. Запропоновані схема GES_{TS} і таблиця Ψ -структур TS стають доказовою базою одного з висновків SI-методу. Цей висновок показує необхідність застосування якомога більшого числа TS різної дії і способів отримання вихідної інформації про роботу розподільчої мережі.

3. Наведено приклад опису структур ряду TS, а також результатів їх математичного моделювання роботи в мережі, що отримані в САПР «OrCAD», «Matlab». Призначені для селективних пристроїв RPA захисту від ОЗЗ в розподільній мережі 6–35 кВ. Найбільш ефективна структура отримана на основі аналізу сигналів реальних ПП в мережі. Показані сигнали ПП з коментарями до їх змін в контрольних точках TS. Вказані переваги і недоліки. Складено «Вікна селективності» роботи таких смарт-TS.

4. Виконано синтез структури алгоритму TS і RPA для подальшої реалізації на мікроконтролерній основі. Вибір найбільш ефективних Ψ -структур виконувався згідно з таблицями для TS, RPA, SCADA. Для додаткових TS морфологічного автомата схеми GES_{RPA} обрана J2-структура TS. Ця структура ефективніше Z-структури TS. Для наскрізного порівняння рішень взято широко відоме реле РТЗ-51. Структура реле РТЗ-51 наведена в кожній таблиці Ψ -структур. J2-структура TS на 44% ефективніше реле РТЗ-51, а Z-структура RPA на 82% ефективніше РТЗ-51.

5. Практичні результати, отримані при моделюванні, можуть бути використані для усунення зазначених ефектів в пристроях RPA. Наприклад, для модернізації струмових реле з часо-імпульсним критерієм, що реалізований у статичних реле РТЗ-51, РТ-11–РТ-15, а також сучасних програмних алгоритмах терміналів RPA, в яких такий алгоритм роботи застосовується. Адже відомо, що алгоритми деяких терміналів RPA реалізують алгоритми відомих реле, отже, і успадковують недоліки їх роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ПО ЧАСТИНІ 2

- 2.1 Ates, Y., Boynuegri, A., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtaci, R., Erdinc, O., Paterakis, N., Catalão, J. (2016) *Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation*, Energies, Vol. 9, No. 378, pp. 5. DOI: 10.3390/EN9050378.
- 2.2 Jones, D., Kumm, J. (2013) *Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements*, Rural Electric Power Conference (REPC), IEEE, pp. 6, DOI: 10.1109/REPCon.2013.6681853.
- 2.3 Huchel, L., Zeineldin, H. (2016) *Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG*. IEEE Trans. Smart Grid, Power, Energy Society General Meeting (PESGM), 7(3), pp. 1642-1649, Boston, USA.
- 2.4 Santos, T., Pavão, R., Homma, F., Chumbinho, R. (2013) *Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids*, 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), № 1443, p. 4, Stockholm, Sweden.
- 2.5 El-Zonkoly, A. (2011) *Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation*, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 81, Iss. 7, pp. 1482-1490.

REFERENCES (PART 2)

- 2.1 Ates, Y., Boynuegri, A., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtaci, R., Erdinc, O., Paterakis, N., Catalão, J. (2016) *Additive protection scheme for a distribution system considering grid-connected and islanded modes of operation*, Energies, Vol. 9, No. 378, pp. 5. DOI: 10.3390/EN9050378.
- 2.2 Jones, D., Kumm, J. (2013) *Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements*, Rural Electric Power Conference (REPC), IEEE, pp. 6, DOI: 10.1109/REPCon.2013.6681853.
- 2.3 Huchel, L., Zeineldin, H. (2016) *Planning the Coordination of Directional Overcurrent Relays for Distribution Systems Considering DG*. IEEE Trans. Smart Grid, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 7(3), pp. 1642-1649, Boston, USA.
- 2.4 Santos, T., Pavão, R., Homma, F., Chumbinho, R. (2013) *Fault identification using multiple information sources in smart distribution grids*, 22nd Int. Conference on Electricity Distribution (CIRED), № 1443, p. 4, Stockholm, Sweden.
- 2.5 El-Zonkoly, A. (2011) *Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation*, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 81, Iss. 7, pp. 1482-1490.

Надійшла до редколегії 30.11.2018

Рецензент: д.т.н., професор Сивокобиленко В.Ф.

В.Ф.СИВОКОБЫЛЕНКО¹, А.П. НИКИФОРОВ²,

¹Донецкий национальный технический университет

²Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Учебно-научный институт энергетики, автоматики и энергосбережения

Разработка обобщенной эквивалентной схемы морфологического уровня распознавания переходных процессов в распределительной электросети смарт-грид. В Части 1 разработана обобщенная эквивалентная схема информационных датчиков устройств релейной защиты и автоматики. Разработку удалось выполнить последовательно от верхнего иерархического уровня обработки информации в системе до нижнего в устройстве. Составлена иерархическая систематизация Ψ -структур известных и новых информационных датчиков, позволяет оценить относительную эффективность их структур. В Части 2 выполнено моделирование с помощью последовательности разработанных схем прохождения конкретной информационной сигнальной составляющей от точки формирования в распределительной электросети 6–35 кВ до выхода, например, в системе SCADA. Оценивается разница формирования селективности и блокировки схем на самом начальном уровне структуры устройства. Этот уровень реализуется совместно на одних и тех же структурных элементах. Обнаружено, что некоторые известные алгоритмы устройств и терминалов, следует отнести к начальному морфологическому уровню обработки информации. Тогда они становятся эффективными смарт-датчиками. Показана необходимость построения смарт-датчиков. Иллюстрируется разница в способах повышения селективности и качества блокировки между морфологическим и другими иерархическими уровнями.

Ключевые слова: *смарт-грид, релейная защита и автоматика, защита от однофазных замыканий на землю, структурно-информационный метод, смысловой сигнал, распознавание образов, моделирование.*

V.F. SYVOKOBYLENKO¹, A.P. NIKIFOROV²,

¹Donetsk National Technical University

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Educational and Scientific Institute of Power Engineering, Automation and Energy Saving

Development of generalized equivalent scheme of the morphological level of recognition of transient processes in the distribution smart-grid. Part 2. Modelling. In Part 1, a generalized equivalent circuit of information sensors of devices for relay protection and automation is developed. The development was able to be performed sequentially from the upper hierarchical level of information processing in the system to the lower in the device. A hierarchical systematization of the Ψ -structures of known and new information sensors has been compiled, which makes it possible to evaluate the relative effectiveness of their structures. In Part 2 modeling was performed using a sequence of developed schemes for passing a specific information signal component from the point of formation in a 6–35 kV distribution network to output, for example, in a SCADA system. Estimated difference in the formation of selectivity and blocking circuits at the very initial level of the structure of the device. This level is implemented jointly on the same structural elements. Found that some well-known algorithms of devices and terminals should be attributed to the initial morphological level of information processing. Then they become effective smart sensors. The necessity of building smart sensors is shown as well. The difference in ways of increasing the selectivity and quality of blocking between the morphological and other hierarchical levels is also illustrated.

Keywords: *smart grid, relay protection and automatics, earth fault protection, structure-tour-information method, cordial signal, pattern recognition, simulation.*