

УДК 621.713.13: 621.313

**В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО** (д-р техн. наук, проф.)<sup>1</sup>,  
**А.П. НІКІФОРОВ** (д-р техн. наук, доц.)<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>[svf1934@gmail.com](mailto:svf1934@gmail.com), <sup>2</sup>[a.p.nikiforov@i.ua](mailto:a.p.nikiforov@i.ua)

## РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ МОРФОЛОГІЧНОГО РІВНЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ СМАРТ-ГРИД. ЧАСТИНА 1. СИНТЕЗ

*Реалізація сучасних концепцій розвитку мереж, а саме «Смарт-грид», «Цифрова підстанція», «Цифрова комірка», «Аутсорсинг служб» має на увазі передачу та осмислення великої кількості інформації про процеси, що відбуваються в електромережі. Дослідження показують, що для стійкості роботи деяких алгоритмів пристроїв релейного захисту та автоматики в розподільних електромережах напругою 6–35 кВ недостатньо обсягу вхідної інформації. Заповнення нестачі обсягу черпається із можливостей інтелектуальних, пошукових алгоритмів розпізнавання образів, які здатні виділяти смислові стани із сигналів процесів, що відбуваються в мережах. Сформована узагальнена еквівалентна структурна схема інформаційних датчиків, що складає морфологічний автомат на початковому рівні структури пристрою. Пропонується спосіб отримання додаткової інформації на основі послідовності кроків, а саме структурованого поділу інформації, контролю проходження елементарних інформаційних складових по структурним схемам об'єкта управління і захисту, далі пристроїв релейного захисту та автоматики, та на вихід системи управління SCADA. Складена порівняльна таблиця структур датчиків.*

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

**Постановка проблеми.** Дослідження [1.1–1.5] виявили ряд причин, що не дозволили реалізувати пристрої RPA, які б досягли стійкості роботи, необхідної для практики [2.1–2.5]. Для визначення подальшого поля роботи визначимо межі цієї проблеми рядом причин, що обмежують стійкість роботи пристроїв релейного захисту і автоматики (RPA). Перетворимо рис. 1.1 щодо початкового морфологічного рівня (рис. 1.3) відносно смислової ситуації SN. Під ситуацією SN розуміється динамічна зміна виходу  $S_{OCP}(t)$  як реакція структурної схеми OCP на появу зміни в будь-якій координаті OCP (вхідній або внутрішній). Тобто SN модулює сигнали промислової частоти на виході об'єкта контролю і захисту (OCP) (рис. 1.2–1.3). Це формує зміни в сигналах перехідних процесів (ПП).

Одна з причин — недостатній обсяг інформації для розпізнавання смислових ситуацій SN. Заповнити недолік обсягу інформації можна за рахунок нових способів отримання інформації, додаткових датчиків TS, підвищення їх якості роботи (рис. 1.4). Для заповнення загального обсягу інформації при складних ситуаціях SN необхідна наявність TS для всіх параметрів вхідних сигналів — частота, фаза, час проходження, співвідношення особливих моментів в сигналах ПП. Таке уявлення використовується, наприклад, в системах SCADA (рис. 1.1), коли вся інформація про OCP передається відразу на верхній рівень системи або для аналізу спостерігачами в аутсорсингових підприємствах.

Ще причина — збіг двох смислових станів. А саме відсутність селективної інформації в OCP збігається із відсутністю роботи пристроїв при неправильній або неякісній обробці інформації чи відмови елементів. В цьому випадку можна застосувати тестування OCP ситуаціями SN (рис. 1.1) розпізнаванням первинних символів TS інформації для селективного пошуку пошкодженої ділянки мережі.

Ще одна причина — компромісна мінімізація структурної частини і конструктивної реалізації. Це призвело до мінімізації алгоритмічної частини пристроїв. В даний час розвиток електронної бази (мікроконтролер МК, ПЛІС, операційний підсилювач) не вносить помітних обмежень в конструктивну реалізацію пристроїв. Звідси випливає, що для досягнення заданої глибини розпізнавання та стійкості роботи пристроїв і системи RPA можна синтезувати та реалізувати в їх конструкції всі необхідні алгоритми отримання інформації, обробки, прийняття рішень.

**Мета роботи.** Визначити найбільш ефективні структури інтелектуальних інформаційних датчиків для розробки пристроїв RPA та систем SCADA в рамках сучасних концепцій розвитку мереж. Синтез смарт-TS виповнити на прикладі контуру нульової послідовності електромережі (КНПМ) напругою 6–35 кВ.

**Вихідні теоретичні положення.** Згідно структурно-інформаційному (SI) методу [1.1–1.4], аналіз перехідних

процесів (ПП) в електроенергетичних мережах різних класів напруги ведеться за допомогою динамічного подання процесів, які можна представити внутрішніми інформаційними складовими узагальненої структурної схеми (GES) пристроїв і терміналів RPA. Якість обробки динамічних потоків інформації в системах RPA енергомереж контролюється смисловим сигналом  $S(t)$  (рис. 1.1). Такий сигнал формується на кожному ієрархічному рівні обробки загального обсягу інформації в системі — морфологічному, синтаксичному, семантичному. Обсяг інформації про стан ОСП виділяється пристроями RPA на основі демодуляції ПП. В опублікованих роботах [1.1, 1.4] для ієрархічних рівнів пристрою, терміналу підстанції і в цілому всієї системи SCADA складені узагальнені еквівалентні структурні схеми автоматів розпізнавання сенсу. Ці схеми дозволяють одноманітно описати відомі та нові пристрої в рамках концепцій розвитку мереж.

Синтез TS реалізується в такий спосіб. Все різноманіття, «складність» сигналів реальних мереж контролюється за допомогою високочастотних аварійних файлів ПП реєстраторів. Реєстратори розташовуються в пристроях RPA і поставляють аварійні файли для аналізу в режимі аутсорсингу. Для усунення причин будемо далі використовувати спосіб динамічного синтезу TS в САПР з контролем алгоритмів реального часу при використанні презентабельної вибірки сигналів аварійних файлів ОСП. При синтезі і розробці в САПР пристроїв RPA використовуються реальні принципи схеми датчиків TS. Контролюється фізична реалізація завдань в режимі послідовного вдосконалення від «простого» до «необхідного» в САПР. Робота технологічного та інших процесів в мережі розглядається далі згідно ланцюжку SCADA—ОСП (рис. 1.1). Під обсягом інформації мається на увазі площа сигналу  $S_{SMART}(t)$  (рис. 1.2). Під стійкістю роботи мається на увазі якість розпізнавання смислових ситуацій  $SN$  в сигналах ПП в ОСП. Сигнал  $S_{SMART}(t)$  відображає зміни смислової інформації в ОСП і в системі автоматичної стабілізації нормального режиму роботи (АСНОР або ASNOM) мережі (рис. 1.1–1.3)

$$S_{SMART}(t) = 3a(t) - Прому(t) = Fix[\beta \times K_{SB} \times (S_S(t) - S_B(t))] = Fix[\beta \times K_{SB} \times f(\sum KSN(t) - \sum KBM(t))], \quad (1)$$

де  $N=1, 2, \dots$ ;  $M=1, 2, \dots$ ;  $\Sigma$  — сума всіх вагових коефіцієнтів  $KSN$  або  $KBM$ , які встановлюють значимість правил  $PS$ ,  $PB$  автомата SyntA, ваговий коефіцієнт  $K_{SB}$  результуючого кореневого правила  $P_{SB}$  автомата SemA,  $\beta$  — загально масштабуючий коефіцієнт. Функція  $Fix$  описує роботу блоку фіксації, в якому при розвитку ПП запам'ятовуються активовані правила  $PS$ ,  $PB$  на певний час для накопичення значення  $S_{SMART}(t)$ . Цей сигнал може змінюватися в діапазоні «0%» і «100%» (рис. 1.6). Функція  $Fix$  аналогічна роботі аварійного реєстратора і діє при появі «активуючого» TS, що задається в настройках пристрою RPA. Такий TS звичайно відомий для ОСП. Схема GES математично описується переліком — граматикою  $G$  (2)

$$G_O \rightarrow (TSSN, TSBM, NTSSN, NTSBM, PSN, PBM, P_S, P_B, P_{SB}), \quad (2)$$

де  $O$  — об'єкти, наприклад, ОСП, GES, TS, RPA, ASNOM, SCADA,  $PS$  і  $PB$  — правила зв'язків TS та вторинних NTS,  $P_{SB}$  — результуюче кореневе правило схеми GES. Виконавчими органами (EU) системи ASNOM (рис. 1.1) є виходи алгоритмів RPA, об'єднані блоком експертної системи ExS. У ExS формуються кінцеві смислові висновки, приймаються рішення про автоматичне усунення відхилень від р1 «NM» нормального режиму (NM) роботи ОСП.

Згідно із SI-методом контролюється вся наявна інформація про ОСП. Перш за все, ОСП замінюється коливальними контурами з відповідними частотними складовими (ЧС), тобто від високочастотної ВЧС до супер-НЧС (рис. 1.6). До коливальних відносяться також низько добротні контури, в яких розвивається тільки одна полу хвиля коливання. Структура ОСП представляється схемою  $GES_{OSP}$  на загальному полі інформаційних датчиків TS (рис. 1.1–1.7), які розпізнають ситуації  $SN$ . Кожна  $SN$  розділяється на елементарні складові — нетермінальні складові NTS (рис. 1.7). Завдання забезпечення повноти обсягу інформації може вирішуватися встановленням відповідності кожної елементарної складової в  $SN$ . Контроль ПП стає логічним критерієм зміни виходів TS. Це зменшує їх взаємозалежність від параметрів в ОСП, часу, тривалості та моментів виникнення. Наприклад, амплітудні параметри сигналів контурів ОСП контролюються і представляються відповідними TS. Кожен коливальний контур ОСП контролюється пристроями RPA, встановленими на приєднаннях ділянки ОСП. Пристрої на морфологічному ієрархічному рівні далі будемо представляти схемою  $GES_{TS}$  з граматикою  $G_{TS}$  (рис. 1.8).

**ОБГРУНТУВАННЯ НАЯВНОСТІ СУПЕР-НИЗЬКОЧАСТОТНИХ (ІНФОРМАЦІЙНИХ) КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ В ОСП.** Відомо, що в пристроях RPA, SCADA, АСКОВЕ вхідна інформація дискретизується за часом у блоці АЦП. Частота дискретизації АЦП вибирається виходячи з наявності в ОСП самої високочастотної складової ВЧС. Наприклад, дискретизація може становити 20 точок на період ВЧС, яка може дорівнювати 10 кГц для розподільної мережі 6–35 кВ. Отже, блоком АЦП будуть свідомо зафіксовані у вхідному сигналі всі складові з меншою власною частотою (тобто всі НЧС). Так відомо операторний опис ОСП

$$y(t) = W(D)x(t), \quad W(D) = \frac{R(D)}{Q(D)} = \frac{b_m D^m + \dots + b_2 D^2 + b_1 D + b_0}{a_n D^n + \dots + a_2 D^2 + a_1 D + a_0}, \quad (4)$$

де  $D = d/dt$ ,  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ ,  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$  — константи;  $m \leq n < \infty$ .

Константи в (4) з індексами  $n$  і  $m$  описують найбільші частоти, з якими можливі рухи в ОСП. Покладемо далі, що для АЦП ці константи  $a_n, b_m$  будуть початковими  $a_0, b_0$  з якими змінюється інформація в ОСП. Тоді щодо



площу, а не миттєві значення сигналів в ПП в ОСР що застосовується при детектуванні. Тобто в цій роботі введено новий смисловий сигнал  $S_{TS}(t)$ . Тоді контроль ПП інтерпретується логічним осмисленням зміни виходів TS. При достатньо великому числі TS зменшується їх взаємозалежність від інших параметрів в ОСР, часу, тривалості та моментів виникнення. Наприклад, амплітудні параметри сигналів контурів ОСР контролюються і представляються відповідними TS. Таким чином, структуру ОСР можна описати сукупністю схем  $GES_{RPA}$  (рис. 1.3–1.4) згідно з рис. 1.8, що беруть участь в управлінні ОСР, тобто сукупністю їх грамастик  $G$ , а саме

$$G_{OCP} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{TS} = \Sigma G_{RPA} = G_{SCADA}, \text{ де } \Sigma \text{ — сума складових.} \quad (3).$$

### ФОРМУВАННЯ СМИСЛОВОГО СИГНАЛУ В МОРФОЛОГІЧНОМУ АВТОМАТІ ПРИСТРОЇВ.

Виповнимо послідовне застосування до датчиків TS принципу опису схем автоматів розпізнавання SyntA і SemA, розробленого раніше в SI-методі. Ці автомати знаходяться на ієрархічно вищих рівнях обробки інформації. Будемо вважати, що аналогічно автоматом SyntA і SemA, в структурі автомата MorphA формування інформації також поділяється на дві структурні складові — «За» видачу TS («Селективність») та «Проти» неправильної видачі TS («Блокування»). Це дозволить контролювати якість роботи TS за смисловим сигналом  $S_{TS}(t)$  аналогічно виділені раніше сигналам  $S_{RPA}(t)$ ,  $S_{ASNOM}(t)$ ,  $S_{SCADA}(t)$  (рис. 1.6–1.8). Будемо орієнтуватись на розробку цифрових інформаційних смарт-датчиків TS із схемою  $GES_{TS}$  і грамастикою  $G_{TS}$  (3) для схеми  $GES_{RPA}$  (рис. 1.3). Датчики TS можуть брати участь в безпосередньому інформаційному забезпеченні схем  $GES_{ASNOM}$ ,  $GES_{SCADA}$  згідно (3) (рис. 1.1, 1.4–1.5), а саме  $G_{OCP} \approx G_{SCADA} = \Sigma G_{TS}$ . З цього потоку інформації можна виділити окремий випадок отримання додаткової інформації в ланцюжку ОСР–RPA–Термінал для забезпечення вдосконалення алгоритмів розпізнавання складних ситуацій SN та реалізації їх в пристроях захисту від ОЗЗ і терміналу «Т-КНПС».

**ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СМАРТ-ДАТЧИКІВ.** Схема  $GES_{TS}$  датчиків TS застосовується в узагальненій структурній схемі пристроїв RPA. На рис. 1.1 та 1.5 показано, поділ елементів схеми RPA на ієрархічно підлеглі автомати MorphA, SyntA, SemA. Видно, що схему RPA вдається явно розділити на автомати SyntA, SemA по відношенню до формування сигналу  $S(t)$ . Але на морфологічному рівні поділ елементів не однозначний (рис. 1.8). Це пов'язано з необхідністю поділу одного й того ж реле  $K$ , існуючого в реальній мережі, на дві частини вхідну (інформаційну) і вихідну (контакти). Те ж відноситься до порогового елементу  $\rho N$  із гістерезисом і вихідними рівнями спрацювало–неспрацювало.

Відходячи з моделі ОСР і SN (рис. 1.6–1.8), що представлені в формі БІХ-фільтра, походять передумови до формування інформаційного сигналу  $S(t) = 3a(t) - \text{Проти}(t)$  в автоматі MorphA і його елементах. Виділимо елементи схеми  $GES_{TS}$ , що відповідають за ці дві частини. На морфологічному рівні або в автоматі MorphA також застосовуються правила «За», «Проти» для формування різницевого сигналу  $S_{TS}(t)$ , необхідні для розпізнавання та для формування виходу TS. Правилами  $PS$  «За» описується зона пропускання вхідного сигналу фільтром і ширина петлі гістерезису порогового елемента  $\rho N$ . Правилами  $PB$  «Проти» описуються зона не пропускання фільтра, рівень порогу спрацювання елемента  $\rho N$ . Вхідна частина виділяє селективну інформацію і відфільтровує вихідну інформацію, не допускає самоходу.

Сукупність структурних елементів схеми  $GES_{TS}$  показана на рис. 1.8. У схемі  $GES_{TS}$  реалізується на одних структурних елементах ряд важливих частин схеми. Такими частинами є — гальванічна розв'язка, що перетворює сигнал на виході вимірювального трансформатора в потенційний сигнал для подальшої обробки в TS, перетворювач диференціального сигналу в вихідний сигнал TS із загальним потенційним виходом (аналогова земля). Схема включає цифрові фільтри, пороговий елемент  $\rho N$ , час-імпульсний критерій для фільтрації короточасних подій, витримку часу для узгодження з іншими TS, об'єднавчий елемент 1 для реалізації кореневого символу.

Вхідні сигнали  $U1$ ,  $U2$  рис. 1.8 представляються в узагальненому вигляді

$$U1 = A \sin(\alpha), U2 = B \cos(\beta), \text{ де } \alpha = \omega t, \beta = \omega t + \varphi.$$

Згідно з правилами тригонометрії порівняння  $U1$ ,  $U2$  можна виконувати будь-яким з математичних дій «–», «×»

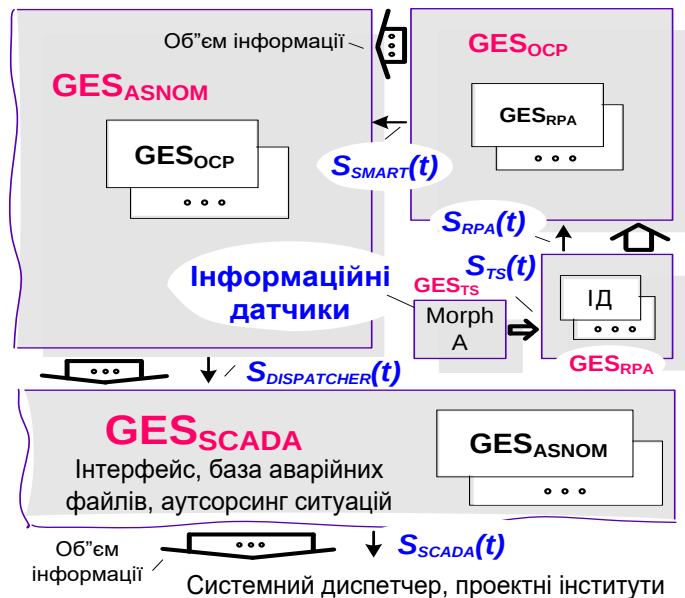


Рисунок 1.5 – Ілюстрація порівняння фіксованого обсягу сигналу  $S(t)$  із наростанням обсягу в SCADA

$$U_S = U_1 \times U_2 = K_{AB} [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$$

при  $\varphi = 0^\circ$  або

(4)

$$U_S = U_1 - U_2 = K_{AB} [\sin(\alpha - \beta)/2 + \cos(\alpha + \beta)/2]$$

при  $\varphi = -90^\circ$ .

Можна порівняти схеми GES наступним чином. Схема GES<sub>TS</sub> відрізняється від схеми GES<sub>RPA</sub> тим, що формування сигналу  $S(t)$  та правил  $PS$ ,  $PB$  відбувається в схемі динамічно і переважно послідовно. У схемі GES<sub>RPA</sub> правила  $PS$ ,  $PB$  формуються динамічно і переважно паралельно. Величини вагових коефіцієнтів  $KS$ ,  $KB$  правил  $PS$ ,  $PB$  можуть вибиратися достатньо довільно з початкового базового значення, наприклад  $KS=5$ . Величина вагового коефіцієнта  $K_{SB}$  кореневого символу  $PsSB$  може бути будь-якою, оскільки при розрахунку коефіцієнта ефективності  $K_{EFF} = K_S/K_Z$  його вплив самоусувається. Узагальнену схему GES<sub>TS</sub> можна застосувати для синтезу TS, аналогічно розробленим в попередніх роботах схемах GES<sub>RPA</sub>, GES<sub>ASNOM</sub>, GES<sub>SCADA</sub>. Схеми GES можна розглядати як «навігаційні» карти проходження сигнальної інформації або інформаційних складових. Так в залежності від завдання сигнали (4) замінюються на інформаційні складові відповідно до (3).

**ВИМОГИ ДО СМАРТ-TS.** Відомі алгоритми TS можна розділити умовно на «прості» і «складні», виходячи із завдань, цілей, способу отримання результатуючої інформації. Наприклад, алгоритми амплітудного детектування є найбільш «простими» TS, а алгоритми фазового детектування відносно дії з синхронним детектуванням «складними» TS. Під «складними» слід розуміти інтелектуальність алгоритмів. Далі будемо вирішувати завдання розвитку інтелектуальності алгоритму формування TS, як необхідні якості для досягнення стійкості роботи TS та якості розпізнавання ситуацій  $SN$ . Тому на перший план виходять вимоги до смарт-TS і завдання їх синтезу.

Вимоги до смарт-TS формуються виходячи з отримання кінцевого результату, яким може бути забезпечення повноти і якості перетворення вхідної інформації для роботи схем GES<sub>RPA</sub>, GES<sub>ASNOM</sub> и GES<sub>SCADA</sub> — 1. Підвищення обсягу селективної і блокуючої інформації; 2. Підвищення інтелектуальності та якості формування TS; 3. Організація якості зняття первинної інформації із вимірювальних трансформаторів; 4. Реалізація вимог ПУЕ; 5. Єдині способи отримання інформації в різних каналах; 6. Мінімум конструктивних зв'язків. 7. Захист від перешкоджаючих складних ситуацій  $SN$ .

**ЗАВДАННЯ ДО СИНТЕЗУ СМАРТ-TS.** Слід зазначити, що якість перетворення інформації в TS походить із загально технічних завдань і реалізується, в тому числі, вбудованими в МК та ПЛІС апаратними блоками і визначається їх обчислювальною потужністю. КІХ-фільтри характеризуються відсутністю власних коливань, а також лінійність фазо-частотної характеристики. Дозволяють працювати з переривчастими, різко змінюваними сигналами при ОЗЗ, горінні дуги в місці ОЗЗ, КЗ, зміні ситуацій при розвитку ПП в ОСР. До завдань синтезу смарт-TS відносяться —

1) Пошук способів поділу загального обсягу інформації на складові, наприклад, багатоканальні TS «Знак спрямованості змінного вхідного сигналу»; 2) Удосконалення TS загального призначення для задіяння інформації на більш високих рівнях обробки інформації пристроїв RPA; 3) Розробка алгоритмів смарт-TS, в тому числі більш високого рівня обробки інформації (датчики екстремумів, частот, фаз, синхронізовані алгоритми обробки і ін.); 4) Використання відомих і розробка нових правил блокування  $PB$  «Проти» для підвищення якості розпізнавання певних TS; 5) Залучення накопичувальних алгоритмів для використання рідкісних, переривчастих інформаційних складових; 6) Реалізація цифрових дискретних датчиків прямого отримання виходу TS на основі задіяння певних тимчасових точок в послідовності КІХ-фільтрації; 7) Вибір відповідності діапазону амплітудних складових коливальних контурів ОСР згідно розрядності АЦП та необхідної точності для КІХ-фільтра; 8) Можлива організація ліній затримки сигналу TS для суміщення часів появи TS різних контурів при достовірності ресурсів МК; 9) Вибір параметрів цифрового фільтра (частота дискретизації, КІХ-фільтрів, число коефіцієнтів цифрового фільтра, форми АЧХ); 10) Інерція формування та власні коливальні процеси (тимчасова затримка в КІХ-фільтрах формування сигналів TS згідно загальній динаміці розвитку ПП в ОСР.

**СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ВІДОМИХ ДАТЧИКІВ TS ТА НОВИХ СМАРТ-TS.** Виходячи із SI-методу, далі встановлюється відповідність різних інформаційних датчиків структурній схемі TS для В попередніх роботах єдність схем GES вдалося встановити для синтаксичного і семантичного рівнів пристроїв RPA, SCADA. Складається таблиця  $\Psi$ -структур TS. Для цього розглядаються алгоритми роботи відомих та нових інформаційних датчиків TS в пристроях RPA як результат моделювання в САПР та макетування, виконаних за допомогою SI-методу. Робота кожного TS розглядається у відповідному «Вікні селективності», яке формується автоматом блокування. Автомат блокування бере інформацію від інших коливальних контурів ОСР, а саме від більш і менш швидких (рис. 1.6). Це дозволяє віднести їх до схеми GES<sub>TS</sub> і вдосконалювати в цих рамках. В якості автомата блокування тут мається на увазі два варіанти. Перший знаходиться в схемі GES<sub>RPA</sub> і є правилами блокування  $PB$  (рис. 1.1). Другий знаходиться в GES<sub>TS</sub> і теж є  $PB$  (рис. 1.8). Схеми GES<sub>TS</sub> та GES<sub>RPA</sub> знаходяться на різних ієрархічних рівнях. Такий поділ проявляється як послідовне формування структури сигналу  $S(t)$  (рис. 1.5).



Для одновхідних структур, тобто тих, які мають тільки інформаційний вхід ( $PS1, PS8, PS2$ ), а опорний сигнал ( $PS3, PS9, PS4$ ) дорівнює 1 або 0 в залежності від реалізації порівнює елемента ( $PS5, PS7$ ). Повторення елементів в загальному алгоритмі TS, вказується перерахуванням з відповідним множителем.

Далі приведені порівняльні параметри  $\Psi$ -структур TS, де  $A < \Psi < Z$  та згруповані в Табл. 1.1. Узагальнений еквівалентний структурний схемі  $GES_{TS}$  відповідає Z-структура TS (рис. 1.8).

1. **A-структура TS.** Датчики «Знаки полухвиль струму  $3i_o$ , напруги  $3u_o$ ». Елементарні, основні, амплітудні ненаправлені TS. Застосовується для правил  $PS$  спрямованого критерію схеми  $GES_{RPA}$ . Граматика  $G_A$  і ефективність TS

$$G_A = (PS1, PS8, PsSB, PB2, PB5, PsSB), \\ P_\Sigma = PSN + PBN = 5, K_\Sigma = \Sigma KSN + \Sigma KBN = 107 + 182 = 289, K_{EFF} = K_\Sigma / K_Z = 289 / 604 = 0.47;$$

2. **B-структура TS.** Датчик «Час-імпульсний критерій». Широко застосовується, наприклад, РТЗ-51. G10-структура RPA. Ненаправлений, амплітудний датчик. Використовуються для формування правил  $PB$ . Граматика  $G_B$  і ефективність TS

$$G_B = (PS1, PS8, PsSB, PB3, PB4, PB5, PB7, PsSB), P_\Sigma = 7, K_\Sigma = 107 + 250 = 357, K_{EFF} = 357 / 604 = 0.59;$$

3. **C-структура TS.** Датчики «Загального призначення від  $PBЦ$ » (фазних напруг мінімуму, максимуму, момент наростання-спадання по різниці двох точок, ін.). Граматика  $G_C$  і ефективність TS

$$G_C = (PS1, PS8, PsSB, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PsSB), P_\Sigma = 8, K_\Sigma = 107 + 267 = 374, K_{EFF} = 374 / 604 = 0.62;$$

4. **D-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «НЧС  $3u_o15B, 30B$ » темп наростання НЧС  $3u_o$ . Датчик для формування «Вікна селективності». Контролюються порогами послідовного появи двох точок  $3u_o$  за час тривалості «Вікна». Граматика  $G_D$  і ефективність TS

$$G_D = (PS1, PS7, PS8, PsSB, PB2, PB3, PB5, PB6, PB7, PsSB), P_\Sigma = 9, K_\Sigma = 177 + 229 = 406, K_{EFF} = 406 / 604 = 0.67;$$

5. **E-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Коливальний контур для  $3i_o$  з пам'яттю-забування». З урахуванням чотирьох варіантів, наприклад, з резонансним контуром і ін. Граматика  $G_E$  і ефективність TS

$$G_E = (PS1, PS2, PS7, PsSB, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PsSB), P_\Sigma = 9, K_\Sigma = 172 + 274 = 466, K_{EFF} = 466 / 604 = 0.74;$$

6. **F-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Температура нагріву шунта» для сигналу  $3i_o$ . Відносного порівняння або площі сигналу ВЧС-СЧС  $3i_o$  або потужності сигналу ВЧС-СЧС  $3i_o$ . Застосовується для правил  $PS$ .  $G_F = (PS1, PS2, PS6, PS7, PS8, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB7, PsSB), P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 237 + 270 = 507, K_{EFF} = 507 / 604 = 0.84;$

**G-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Послідовна різницю амплітуд ВЧС-СЧС  $3i_o$  і НЧС  $3u_o$  у «Вікні селективності». Застосовується для правил  $PS$ .  $P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 237 + 297 = 534, K_{EFF} = 534 / 604 = 0.88;$

$$G_G = (PS1, PS2, PS6, PS7, PS8, PsSB, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PsSB),$$

7. **H-структура TS.** Смарт-TS. Датчики «Розсинхронізація між складовими», наприклад, СЧС  $3i_o$ , НЧС  $3u_o$ , ВЧС-СЧС  $3i_o$ , СЧС  $3i_o$  і ВЧС перешкод. Граматика  $G_H$  і ефективність TS

$$G_H = (PS1, PS3, PS5, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB2, PB5, PB6, PB7, PB8, PsSB),$$

$$P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 237 + 204 = 441, K_{EFF} = 441 / 604 = 0.73;$$

8. **I-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Один ТТНП з додатковою обмоткою  $3u_o$  і реле РТЗ-51». Спрямованої дії за рахунок датчика, АЗ-структура RPA, СЧС, НЧС  $3i_o$  складова. Граматика  $G_I$  і ефективність TS

$$G_I = (PS1, PS3, PS5, PS7, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PsSB), P_\Sigma = 11, K_\Sigma = 207 + 265 = 472, K_{EFF} = 472 / 604 = 0.78;$$

9. **J-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Два ТТНП з додатковою обмоткою  $3u_o$  і реле РТЗ-51». Спрямований синхронний, бруківці для різних частотних складових (СЧС, НЧС), зовнішньої попередньої обробки інформації на основі спільної роботи двох трансформаторів струму  $3i_o$ . Розвиток I-структури TS. Два варіанти граматики  $G_J$  і ефективність TS

$$P_\Sigma = 18, K_\Sigma = 297 + 275 = 572, K_{EFF} = 572 / 604 = 0.95;$$

$$G_{J1} = (2 * \{PS1, PS2, PS8\}, PS3, PS4, PS6, PS7, PS9, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB7, PB8, PsSB),$$

$$G_{J2} = (2 * \{PS1, PS8, PS2\}, 2 * \{PS3, PS9, PS4\}, PS5, PS7, PsSB, 2 * \{PB3, PB8, PB2\}, PB3, PB4, PB5, PsSB),$$

$$P_\Sigma = 24, K_\Sigma = 317 + 305 = 662, K_{EFF} = 662 / 604 = 1.03;$$

10. **K-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Спрямований датчик НЧС-СП», М-структура RPA. Граматика  $G_K$  і ефективність TS

$$G_K = (PS1, PS3, PS4, PS5, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB7, PB8, PsSB),$$

$$P_\Sigma = 14, K_\Sigma = 247 + 275 = 522, K_{EFF} = 522 / 604 = 0.86;$$

11. **L-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Двуфазне КЗ через землю», G-структура RPA. Розвиток K-структури TS. Граматика  $G_L$  і ефективність TS

$$P_\Sigma = 15, K_\Sigma = 247 + 292 = 539, K_{EFF} = 539 / 604 = 0.89;$$

$$G_L = (PS1, PS3, PS4, PS5, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PB8, PsSB),$$

12. **Z-структура TS.** Смарт-TS. Датчик «Узагальнена структура TS». Граматика  $G_Z$  і ефективність TS

$$G_Z = (PS1, PS2, PS3, PS4, PS5, PS6, PS7, PS8, PS9, PsSB, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PB8, PsSB),$$

$$P_\Sigma = PSN + PBN = 18, K_\Sigma = 307 + 297 = 604, K_{EFF} = K_\Sigma / K_Z = 604 / 604 = 1.0.$$

Аналіз таблиці (Табл. 1.1) показує, що порівняно з іншими  $\Psi$ -структурами RPA, SCADA  $\Psi$ -структури TS мають відносно малі відмінності значень сумарних коефіцієнтів селективності і блокування  $\Sigma KSN, \Sigma KBN$  між різними  $\Psi$ -структурами TS. Це відбувається через малий обсяг інформації, яким оперує TS. Для розрахунків при рішенні задач слід задіяти послідовне з'єднання схем  $GES_{OCP}$  і  $GES_{TS}$  згідно рис. 1.1 і 1.3. І далі контролювати розпізнавання типових смислових ситуацій SN згідно послідовності з'єднання рис. 1.1—1.6—1.4—1.7—1.3—1.8. Тобто, контролюється проходження елементарних інформаційних складових ситуацій SN на виході TS морфологічного автомата MorphA. Також послідовність дозволяє відстежувати проходження

конкретної інформаційної складової від точки формування в  $GES_{OCP}$  до виходу, наприклад, в системі  $GES_{ASNOM}$  по  $GES_{SCADA}$ .

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз  $\Psi$ -структур датчиків TS

| Блокування («Against», $\Sigma KBM$ ) | Селективність («За», «For», $\Sigma KSN$ ) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                       | 107                                        | 172 | 177 | 207 | 237 | 247 | 267 | 297 | 307 | 317 |
|                                       | 182                                        | A   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                                       | 204                                        |     |     |     | H   |     |     |     |     |     |
|                                       | 229                                        |     | D   |     |     |     |     |     |     |     |
|                                       | 250                                        | B   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                                       | 265                                        |     |     | I   |     |     |     |     |     |     |
|                                       | 267                                        | C   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                                       | 270                                        |     |     |     | F   |     |     |     |     |     |
|                                       | 274                                        |     | E   |     |     |     |     |     |     |     |
|                                       | 275                                        |     |     |     |     | K   |     | J1  |     |     |
|                                       | 292                                        |     |     |     |     | L   |     |     |     |     |
|                                       | 297                                        |     |     |     | G   |     |     |     | Z   |     |
|                                       | 305                                        |     |     |     |     |     |     |     |     | J2  |

понад-повільні супер-НЧС контури, які за своєю суттю є інформаційними смисловими контурами. Супер-НЧС доповнюють об'єм смислових складових при розпізнаванні аналогічно високочастотним ВЧС. Пропонується модель ОСР, що дозволяє оперувати тільки смисловими складовими при вирішенні задач RPA. Смисловими складовими доцільно оперувати в рамках сучасних концепцій побудови розподільних електромереж різного класу напруги.

2. Запропоновано узагальнену структурну схему  $GES_{TS}$  для опису інформаційних датчиків TS в автоматі MorphA пристроїв RPA. Схема  $GES_{TS}$  отримана аналогічно схемам  $GES_{RPA}$  пристроїв RPA і  $GES_{ASNOM}$ ,  $GES_{SCADA}$  що знаходяться на більш високих рівнях обробки інформації. Схема  $GES_{TS}$  доповнює цей ряд, представлений в попередніх публікаціях. Дозволяє описувати структуру простих і смарт-датчиків пристроїв RPA. Такий опис структури автомата MorphA є послідовним розвитком SI-методу.

3. Показано, що якість і обсяг оброблюваної інформації в датчиках TS контролюється за допомогою смислового сигналу  $S_{TS}(t)$  і є результатом роботи складових морфологічного автомата MorphA пристроїв RPA. Тобто, при вирішенні задач аналізу, синтезу, конструювання в системі RPA, потрібно оперувати наявністю селективної і блокуючої частин в структурі TS або, те ж саме, правилами PS «За» і PB «Проти» формування результату спрацювання TS.

4. Складена схема  $GES_{TS}$  для інтелектуальних смарт-TS автомата MorphA. Вони необхідні для доповнення обсягу інформації в схемі  $GES_{RPA}$  у випадках «складних» смислових ситуацій SN. Для деяких алгоритмів RPA смарт-TS беруть участь як основні. В їх структурі виявляється синхронний смарт-детектор, що доповнює синхронний детектор схеми  $GES_{RPA}$ . Послідовне багатократне синхронне детектування виявилось ефективним одночасно по селективності і блокувочі. Смарт-TS можуть бути не тільки відносною, а і абсолютної дії, тобто одноканальним детектором. Структура відомого одноканального алгоритму часо-імпульсного критерію слід віднести до морфологічного ієрархічного рівня обробки інформації.

5. Наведено таблицю ієрархічної систематизації  $\Psi$ -структур інформаційних датчиків TS, де А– $\Psi$ –Z. Таблиця отримана, аналогічно таблицям  $\Psi$ -структур пристроїв RPA, ASNOM, SCADA, які були раніше складені SI-методом. Вона дозволяє виконувати порівняння характеристик відомих і запропонованих  $\Psi$ -структур TS, цілеспрямований розрахунок змін, що вводяться для досягнення заданих показників стійкості роботи TS. Реалізується принцип вдосконалення структури пристроїв від «найбільш простого» до «відповідного задачі», що вирішується.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ ПО ЧАСТИНІ 1

1.1 Nikiforov A. (2015) *Unified smart-detector for electrical power smart grid networks*, 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Cambridge, UK: 1032-1039, IEEE: CFP15INI-15, ISBN: 978-1-4799-6648-6/15, DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487.

1.2 Никифоров А. П. (2010) *Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты*, Научно-производственный журнал «Техническая электродинамика» и Материалы 10 науч.-техн. конференц. «ПЕ-2010». НАН Украины. Институт электродинамики, – Киев, – С.73-76, ISSN 1607-7970. URL: [http://lib.nmu.org.ua/catalog/site/view.html?doc\\_id=407519](http://lib.nmu.org.ua/catalog/site/view.html?doc_id=407519). DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921.

1.3 Nikiforov, A. P. (2017) *Application of the Theorem of 'About the Unity of the Structural Description of RPA Devices' for the Simulation of a Power Network Smart-Grid*, 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017, ISSN: 2180-1843, e-ISSN: 2289-8131, <http://journal.utem.edu.my/index.php/jtec/article/view/1831>.

1.4 Сивокобыленко В.Ф., Никифоров А.П., Колларов О.Ю., Кардаш Д.О. (2017) *Совершенствование токовой защиты от коротких замыканий в сети смарт-грид 6-35 кВ структурно-информационным методом. Часть 1. Анализ* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – №1(18). – С. 5–15. ISSN 2074-2630, DOI: 10.13140/RG.2.1.4106.2806, URL: [http://elin.donntu.edu.ua/department/collection/Zbirnyk\\_1\(18\)2017.pdf](http://elin.donntu.edu.ua/department/collection/Zbirnyk_1(18)2017.pdf)

1.5 Lysenko, V. (2017) *Feedback on installed experience with digital signal processing petersen coil regulator*. IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk m.ostrogradskyi national university, pp. 384-387, Ukraine. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248939.

1.6 Javadian, S., Massaeli, M. (2011) *An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network*. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 11, pp. 1438-1445.

## REFERENCES (PART 1)

1.1 Nikiforov A. (2015) Unified smart-detector for electrical power smart grid networks, 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Cambridge, UK: 1032-1039, IEEE: CFP15INI-15, ISBN: 978-1-4799-6648-6/15, DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487.

1.2 Nikiforov, A. P. (2010) Theorem on the existence of semantic signal in relay protection systems, Zhurnal «Tekhnichna Elektrodynamika», PPE-2010, pp. 73-76, Kiev, Ukraine, DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921.

1.3 Nikiforov, A. P. (2017) Application of the Theorem of ‘About the Unity of the Structural Description of RPA Devices’ for the Simulation of a Power Network Smart-Grid, 3rd Renewable Energy and Green Technology International Conference (REEGETECH), Jakarta, Indonesia, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9, No. 1-5, pp. 39-48, 2017, ISSN: 2180-1843, e-ISSN: 2289-8131.

1.4 Thamilvalluvan, B., Aswini, P., AntoBennet, M., Dhiviya, K., Revathi, R., Steffi, T. (2016) A novel relay used for fault detection and isolation in distribution networks containing of several DGs, Int. Conf. ICEEOT, pp. 3574-3580, Tamil Nadu, India.

1.5 Lysenko, V. (2017) *Feedback on installed experience with digital signal processing petersen coil regulator*. IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk m.ostrogradskyi national university, pp. 384-387, Ukraine. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248939.

1.6 Javadian, S., Massaeli, M. (2011) An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks including DG using distribution automation system and its implementation on a real distribution network. Indian Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 11, pp. 1438-1445.

Надійшла до редколегії 27.11.2018

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

В.Ф.СИВОКОБЫЛЕНКО<sup>1</sup>, А.П. НИКИФОРОВ<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет

<sup>2</sup>Национальный 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.** Реализация современных концепций развития сетей, а именно «Смарт-грид», «Цифровая подстанция», «Цифровая ячейка», «Аутсорсинг служб» подразумевает передачу и осмысление большого количества информации о процессах, происходящих в электросети. Исследования показывают, что для устойчивости работы алгоритмов устройств релейной защиты и автоматики в распределительных сетях напряжением 6–35 кВ недостаточно объема входной информации. Восполнение недостатка объема черпается из возможностей интеллектуальных, поисковых алгоритмов распознавания, которые способны выделять смысловые состояния из сигналов процессов, происходящих в сетях. Сформирована обобщенная эквивалентная структурная схема информационных датчиков, описывающая морфологический автомат на начальном уровне структуры устройства. Предлагается способ получения дополнительной информации на основе последовательности шагов, а именно структурированного разделения информации, контроля прохождения элементарных информационных составляющих по структурным схемам объекта управления и защиты, далее устройств релейной защиты и автоматики, и на выход системы управления SCADA. Составлена сравнительная таблица структур датчиков.

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

V.F. SYVOKOBYLENKO<sup>1</sup>, A.P. NIKIFOROV<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University

<sup>2</sup>National 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.** The implementation of modern concepts of network development, namely “*Smart Grid*”, “*Digital Substation*”, “*Digital Cell*”, “*Outsourcing Services*” implies the transfer and understanding of a large amount of information about the processes occurring in the power grid. Studies show that for the stability of the algorithms of devices of relay protection and automation in distribution networks with voltage of 6–35 kV there is not enough amount of input information. Filling up the lack of volume is derived from the capabilities of intelligent, search-based recognition algorithms that are able to separate semantic states from process signals occurring in networks. A generalized equivalent block diagram of information sensors has been formed, describing the morphological automaton at the initial level of the device structure. A method for obtaining additional information based on the sequence of steps, namely, structured separation of information, control of the passage of elementary information components according to block diagrams of the control and protection object, then relay protection and automation devices, and the output of the SCADA control system is proposed. A comparative table of sensor structures has been compiled.

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