Грабко В.В.,
Ковальчук В.П.

Україна
Вінниця

Вінницький національний технічний університет

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ РОЗРЯДНИКІВ

Вступ. Пошкодження ізоляції електрообладнання підстанцій і ліній електропередач може відбуватися внаслідок дії перенапруг, які виникають під час грозових розрядів, перемикань в мережі або аварійних режимів та пов'язаних з ними перехідних процесів, що призводить до припинення подачі електроенергії споживачам. В зв'язку з цим необхідно використовувати різноманітне захисне обладнання, зокрема розрядники [1].

В процесі експлуатації розрядників їх технічний стан погіршується від дії природних умов (часу, температури, вологості, сейсмічної активності та ін.) і кількості спрацювань. Тому важливою технічною задачею є якомога точніше визначити функціональний стан розрядника для своєчасного виведення з експлуатації, запобігши аварійним ситуаціям і матеріальним збиткам, а також якомога повніше використати його ресурс [2].

Існують різні методи (вимірювання опору розрядників мегомметром, вимірювання струмів провідності і витоку при підвищеній випрямленій напрузі, вимірювання пробивної напруги при промисловій частоті, перевірка герметичності розрядника і перевірка запасу пропускної здатності дисків нелінійного послідовного резистора) та засоби (регістратори, імітатори) діагностування технічного стану розрядників, проте більшість з них не об'єднані в один комплекс або потребують відключення розрядника з електромережі, що збільшує матеріальні та людські затрати [2].

Постановка завдань дослідження. В роботі [3] запропонована математична модель для контролю робочого ресурсу розрядника, яка дозволяє контролювати витрачання його ресурсу по значенню і тривалості струму, що протікає через розрядник в момент комутації та рівню залишкової напруги. На підставі цієї моделі необхідно синтезувати структуру системи для технічного діагностування високовольтних розрядників

Матеріали дослідження. Відповідно до математичної моделі [3] здійснимо синтез системи за допомогою математичного апарату секвенцій [4].

Система контролю повинна містити сенсори струму, напруги та нормуючі перетворювачі. Як приклад, покажемо процес синтезу системи лише для трьох значень комутованого струму і напруги. Позначимо символами I_1, I_2, I_3, та U_1, U_2, U_3, знаходження значення імпульсного струму та напруги в першому, другому та третьому діапазонах, а $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$ та $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$ значення струму і напруги, що не входять у відповідні діапазони. Для фіксування трьох різних діапазонів струму та напруги використаємо порогові елементи і тригери T_2, T_3, T_4 і T_{15}, T_{16}, T_{17} відповідно. Для визначення тривалості імпульсу струму введемо тригери T_5, T_6, T_7, якими моделюється лічильник імпульсів, та тригер T_1 для реалізації генератора імпульсів з часовими затримками τ_1 і τ_2 , причому $\tau_1 < \tau_2$. Для моделювання лічильника імпульсів залишкового ресурсу розрядника використаємо тригери T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13} та тригер T_8 для генератора імпульсів з затримкою часу τ_3 і τ_4 , причому $\tau_3 < \tau_4$. Для повернення усіх тригерів у вихідний стан по закінченню циклу визначення стану розрядника введемо тригер T_9 з затримкою часу τ_3 та тригер T_{18}. Тригер T_{14} використаємо для дозволу на вимірювання рівня напруги. З метою обнулення всіх тригерів і підготовки їх до робочого циклу в систему необхідно ввести сигнал R.

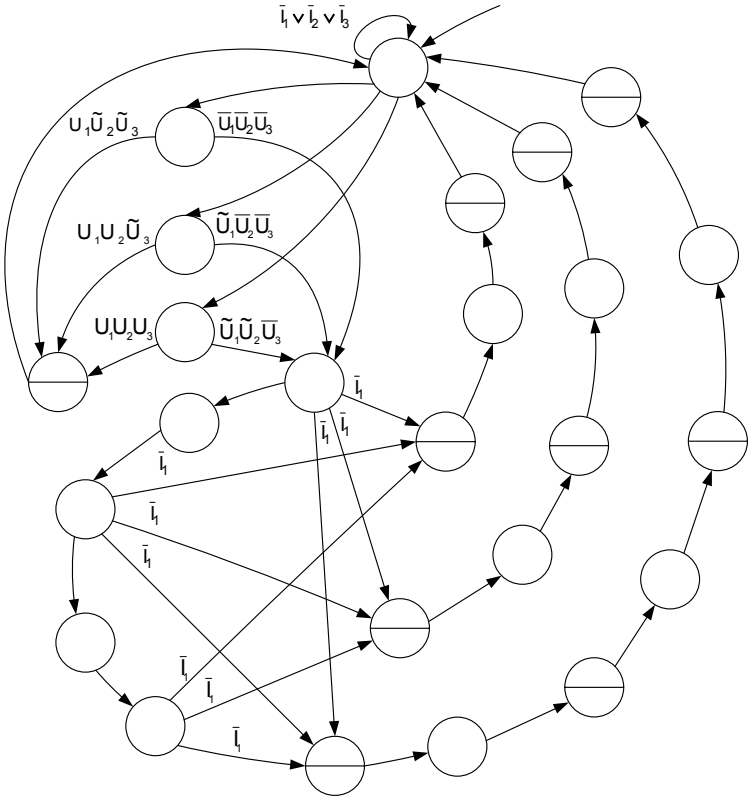

Рис. 1. Граф функціонування пристрою для технічного діагностування високовольтних розрядників

З врахуванням викладених зауважень граф функціонуванням системи технічного діагностування розрядника має вигляд, приведений на рис. 1. Аналітично функціонування системи описується згідно графа системою секвенцій:

$$\begin{cases} U_1U_2U_3S_3|{-}S_4; & I_3S_0|{-}S_3; & \bar{I}_1S_5|{-}S_{22}; & \bar{I}_1S_9|{-}S_{17}; & \tau_4S_{18}|{-}S_{19}; & \tau_3S_{12}|{-}S_{13}; & R_0|{-}S_0; \\ \widetilde{U}_1\overline{U}_2\overline{U}_3S_2|{-}S_5; & I_2S_0|{-}S_2; & \bar{I}_1S_5|{-}S_{17}; & \bar{I}_1S_9|{-}S_{10}; & \tau_3S_{19}|{-}S_{20}; & \tau_4S_{13}|{-}S_{14}; & I_1S_0|{-}S_1; \\ U_1\widetilde{U}_2\widetilde{U}_3S_1|{-}S_4; & \bar{I}_1\bar{I}_2\bar{I}_3|{-}S_0; & \bar{I}_1S_5|{-}S_{10}; & \tau_3S_{22}|{-}S_{23}; & \tau_4S_{20}|{-}S_{21}; & \tau_3S_{14}|{-}S_{15}; & \tau_1S_8|{-}S_9; \\ \overline{U}_1\overline{U}_2\overline{U}_3S_1|{-}S_5; & \tau_2S_5|{-}S_6; & \bar{I}_1S_7|{-}S_{22}; & \tau_4S_{23}|{-}S_{24}; & \tau_3S_{10}|{-}S_{11}; & \tau_4S_{15}|{-}S_{16}; & \bar{I}_1S_9|{-}S_{22}; \\ \widetilde{U}_1\widetilde{U}_2\overline{U}_3S_3|{-}S_5; & \tau_1S_6|{-}S_7; & \bar{I}_1S_7|{-}S_{17}; & \tau_3S_{24}|{-}S_0; & \tau_4S_{11}|{-}S_{12}; & \tau_1S_4|{-}S_0; & \tau_3S_{21}|{-}S_0; \\ U_1U_2\widetilde{U}_3S_2|{-}S_4; & \tau_2S_7|{-}S_8; & \bar{I}_1S_7|{-}S_{10}; & \tau_3S_{17}|{-}S_{18}; & \tau_3S_{16}|{-}S_0; & & \\ S_4|{-}Y_1; & S_{10}\vee S_{12}\vee S_{14}\vee S_{16}\vee S_{17}\vee S_{19}\vee S_{21}\vee S_{22}\vee S_{24}|{-}Y_2. & & & & & \end{cases} \quad (1)$$

за умови, що

$$\begin{cases} \overline{T}_1\overline{T}_2\overline{T}_3\overline{T}_4\overline{T}_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}\overline{T}_{14}\overline{T}_{15}\overline{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_0; & \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7\overline{T}_8T_9T_{10}T_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{13}; \\ T_1\overline{T}_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}\overline{T}_{14}\overline{T}_{15}\overline{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_1; & \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}T_{11}T_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{14}; \\ T_1T_2T_3\overline{T}_4T_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}\overline{T}_{14}\overline{T}_{15}\overline{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_2; & \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7\overline{T}_8T_9T_{10}T_{11}T_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{15}; \\ T_1T_2T_3T_4T_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}\overline{T}_{14}\overline{T}_{15}\overline{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_3; & \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}T_{11}T_{12}T_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{16}; \\ T_1T_2\widetilde{T}_3\widetilde{T}_4T_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}T_{15}\widetilde{T}_{16}\widetilde{T}_{17}T_{18}|{-}S_4; & \overline{T}_1T_2T_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{17}; \\ \overline{T}_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}\overline{T}_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_5; & \overline{T}_1T_2T_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7\overline{T}_8T_9T_{10}T_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{18}; \\ T_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5\overline{T}_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_6; & \overline{T}_1T_2T_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}T_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{19}; \\ \overline{T}_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5T_6\overline{T}_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_7; & \overline{T}_1T_2T_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7\overline{T}_8T_9T_{10}T_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{20}; \\ T_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5T_6T_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_8; & \overline{T}_1T_2T_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}T_{11}T_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{21}; \\ \overline{T}_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4\overline{T}_5T_6T_7\overline{T}_8\overline{T}_9\overline{T}_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_9; & \overline{T}_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{22}; \\ \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{10}; & \overline{T}_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7\overline{T}_8T_9T_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{23}; \\ \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7\overline{T}_8T_9T_{10}\overline{T}_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{11}; & \overline{T}_1T_2\overline{T}_3\overline{T}_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}T_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{24}. \\ \overline{T}_1T_2T_3T_4T_5\widetilde{T}_6\widetilde{T}_7T_8T_9T_{10}T_{11}\overline{T}_{12}\overline{T}_{13}T_{14}\widetilde{T}_{15}\widetilde{T}_{16}\overline{T}_{17}\overline{T}_{18}|{-}S_{12}; & \end{cases} \quad (2)$$

Застосуємо до (1) і (2) привила мінімізації секвенцій згідно [4], отримаємо

$$\begin{cases} T_1|{-}T_5; & R|{-}\overline{T}_{18}; & 1|{-}T_{15}; & \tau_1T_1|{-}\overline{T}_1; & T_8T_{10}|{-}T_{11}; & T_2T_{15}\vee T_3T_{16}\vee T_4T_{17}|{-}T_{18}; \\ T_8|{-}T_{10}; & I_2|{-}T_3; & U_2|{-}T_{16}; & T_{18}|{-}Y_1; & \tau_3\overline{T}_9|{-}T_9; & R\vee T_{18}\vee T_9|{-}\overline{T}_2\overline{T}_3\overline{T}_4\overline{T}_5\overline{T}_6\overline{T}_7; \\ T_2|{-}T_{14}; & T_9|{-}Y_2; & U_3|{-}T_{17}; & T_1T_6|{-}T_7; & \tau_2I_1\overline{T}_1|{-}T_1; & T_8T_{10}T_{11}T_{12}|{-}T_{13}; \\ \bar{I}_1|{-}\overline{T}_{14}; & I_3|{-}T_4; & I_1|{-}T_2; & T_1T_5|{-}T_6; & \tau_3T_8|{-}T_8; & T_8T_{10}T_{11}|{-}T_{12}; \\ \tau_4\overline{T}_8\bar{I}_1T_2T_5T_{10}T_{11}\vee\tau_4\overline{T}_8\bar{I}_1T_2T_5T_{10}T_{11}\times & & & & & \\ \quad\times(T_6\vee T_6T_7\vee T_3T_{12}\vee T_3T_6T_{12}\vee T_3T_6T_7T_{12}\vee T_3T_4T_{12}T_{13}\vee T_3T_4T_6T_{12}T_{13}\vee T_3T_4T_6T_7T_{12}T_{13})|{-}T_8; & & & & & \\ T_2T_5T_{10}T_{11}\vee T_2T_5T_{10}T_{11}\times & & & & & \\ \quad\times(T_6\vee T_6T_7\vee T_3T_{12}\vee T_3T_6T_{12}\vee T_3T_6T_7T_{12}\vee T_3T_4T_{12}T_{13}\vee TT_4T_6T_{12}T_{13}\vee T_3T_4T_6T_7T_{12}T_{13})|{-}\overline{T}_9. & & & & & \end{cases} \quad (3)$$

Здійснивши процедуру перетворення мінімізованих секвенціальних виразів в структурну схему з врахуванням промислової елементної бази отримаємо пристрій для технічного діагностування високовольтних розрядників (рис. 2). На схемі: 1, 22 – сенсори струму (СС) і напруги (СН); 2 - 4 – порогові елементи (ПЕ); 5 - 7, 23 – тригери (Т); 8 – шифратор (Ш); 9, 13 – генератори імпульсів (ГІ); 10, 14 – елементи І; 11, 18, 19 – лічильники імпульсів (ЛІ); 12 – елемент НІ; 15 – блок установки нуля (БУН), 16 – елемент АБО; 17 – формувач сигналу (ФС); 20, 25 – функціональні перетворювачі (ФП); 21, 26 – цифрові компаратори (ЦК); 24 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 27 – блок індикації (БІ).

Пристрій працює так. При подачі напруги живлення на схему БУН 15 коротким імпульсом через елемент АБО 16 встановлює Т 5 - 7 та ЛІ 11, 19 в нульовий стан. Також в нульовий стан встановиться Т 23, оскільки логічний нуль з виходу ПЕ 2 перетвориться в одиничку через елемент НІ 12 поступить на R-вхід Т 23. Одночасно ГІ 9 і 13 починають формувати відповідні послідовності імпульсів.

У разі спрацьовування розрядника при появі в електричній мережі імпульсу, викликаного грозовими або комутаційними перенапругами, на виході СС 1 з'являється сигнал постійної напруги, пропорційний комутованому струму, який подається на входи ПЕ 2 – 4. В залежності від значення сигналу на виході СС 1 спрацьовують один або декілька ПЕ та відповідні їм Т встановлюються в одиничне положення, вихідні логічні сигнали яких через Ш 8 поступають у вигляді цифрового коду на А-вхід ЦК 21 та ФП 25, в якому записано нормоване значення залишкової напруги в залежності від величини комутованого струму. Одночасно при спрацьовуванні

ПЕ 2 сигнал логічної одиниці подається на елемент І 10, НІ 12. З виходу елемента І 10 на вхід ЛІ 11 від ГІ 9 поступає послідовність імпульсів, пропорційна тривалості імпульсу комутованого розрядником струму. Одночасно при спрацюванні Т 5 спрацьовує Т 23, який запускає АЦП 24, що вимірює значення залишкової напруги з СН 22 та надсилає відповідний цифровий код на В-вхід ЦК 26 і якщо він рівний або більший цифрового коду на А-вході, то на виході ЦК з'явиться сигнал логічної одиниці і спрацює БІ 27, що свідчитиме про збільшення залишкової напруги розрядника відносно допустимого значення, та обнулить Т 5 – 7 і ЛІ 11, 19.

По закінченні роботи розрядника хвиля перенапруги зрізується і протікання струму через розрядник припиняється. При цьому на виході СС 1 значення сигналу зменшується до нуля, на всіх виходах ПЕ встановлюється сигнал логічного нуля. Подача імпульсів в ЛІ 11 закінчується, а підраховані цим лічильником імпульси, свідчать про певну тривалість хвилі струму розрядника. Вимірювання залишкової напруги припиняється, оскільки переходить в нульовий стан Т 23, який зупиняє роботу АЦП 24. Вихідний цифровий код ЛІ 11 подається на один вхід ФП 20 і, оскільки на його другому вході присутній нульовий код з виходу ЛІ 19, то і на його виході присутній нульовий цифровий код. Тому на виході ЦК 21 присутній сигнал логічної одиниці, оскільки цифровий код, що подається на А-вхід, відмінний від нуля.

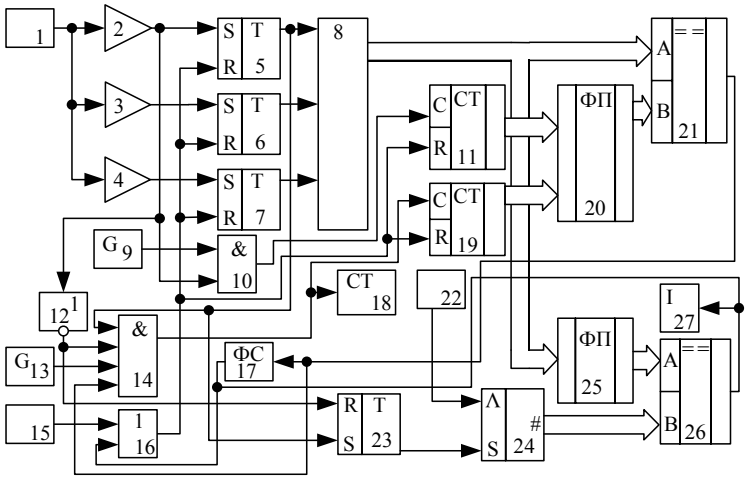

Рис. 2. Структурна схема пристрою для технічного діагностування високовольтних розрядників

Після закінчення роботи розрядника при появі на виході ПЕ 2 сигналу логічного нуля елемент І 14 відкривається, так як на його другий вхід надходить одиничний сигнал з елемента НІ 12 і імпульси від ГІ 13 поступають на вхід ЛІ 18 та на вхід ЛІ 19 до тих пір, поки його вихідний цифровий код, що подається на вхід ФП 20, не викличе на його виході появи цифрового коду, який подається на В-вхід ЦК 21 і співпадає з кодом, що подається на А-вхід. При цьому на виході ЦК 21 встановлюється сигнал логічного нуля і подача імпульсів в ЛІ 19 припиняється. Одночасно на виході формувача сигналу 17 з'являється короткий імпульс, яким обнуляються Т 5 - 7, ЛІ 11, 19.

Цикл роботи пристрою на цьому закінчується.

ФП 20 реалізований таким чином, що кожному значенню комутованого розрядником струму відповідає певний ваговий коефіцієнт, значення якого вибирається в залежності від тривалості імпульсу комутованого струму вихідним сигналом ЛІ 11, а в залежності від величини комутованого струму – вихідним сигналом ЛІ 19.

В процесі роботи пристрою відповідна кількість імпульсів, яка характеризує спрацювання робочого ресурсу розрядника в залежності від значення комутованого струму в перерахунку на мінімальне вибране значення комутованого струму з врахуванням його тривалості, була занесена в ЛІ 18, що показує, як зменшився залишковий робочий ресурс розрядника після комутації імпульсу струму. Коефіцієнти перерахунку комутованого струму в мінімальне значення цього струму записані в ФП 20, а вибір тієї чи іншої сукупності цих коефіцієнтів здійснюється вихідним кодом ЛІ 11, значення якого залежить від тривалості хвилі струму розрядника. Інтенсивність старіння розрядника сигналізуватиме БІ 27, який свідчить про збільшення залишкової напруги відносно нормованого значення.

Висновки. Здійснено синтез структури пристрою для технічного діагностування високовольтних розрядників, що дозволяє, не виводячи його з експлуатації, визначати залишковий робочий ресурс, враховуючи величину і тривалість імпульсного струму та рівень залишкової напруги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: / Александр Адольфович Чунихин – Изд. 2-е, перер. и допол. – Москва: Энергия, 1975. – 648 с.

2. Засоби захисту від перенапруг у електроустановках 6-750 кВ: ГКД 34.35.512: 2002. – вид. офіц. – Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України. 2002. – 140 с. – (Галузевий керівний документ Об'єднаних енергетичних підприємств. Інструкція з монтажу та експлуатації).

3. Ковальчук В. П. Визначення залишкового ресурсу високовольтних розрядників / В.П. Ковальчук В.П. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010 - №4. – С. 126-129.

4. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью: / В.Н. Захаров – М.: «Энергия», 1975. – 136с.