

## ПРО ОДИН МЕТОД СИНТЕЗУ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ ДЛЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ПРИСТРОЯМИ РПН

Грабко В.В., Львов І.Ю.

Вінницький державний технічний університет

*On the bases of the voltage control law with the help of mathematical apparatus of sequency there had been syntesised the structural diagram of voltage regulator for power transformers with the control under loading devices.*

В електричних мережах для регулювання напруги застосовуються системи регулювання, які містять силові трансформатори з пристроями РПН [1].

В роботі [2] запропоновано удосконалення закону керування, реалізованого в регуляторі, що входить в систему регулювання напруги.

Новий закон дозволяє швидко відпрацьовувати системою значні відхилення напруги від номінального значення. Суть удосконалення закону керування заключається в тому, що в нього введена умова, яка передбачає перемикання пристрою РПН без значної затримки часу у випадку, коли контрольована напруга виходить за зону нечутливості, обумовлену якістю регульованої напруги.

Математичний вираз закону керування має вигляд:

$$u(t) = K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{\min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо} \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{or}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{при } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо} \begin{cases} u(t) \geq u_{в.3}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{or}}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$U(t) \xrightarrow{t_{\text{пер}} \rightarrow \min} U_{\text{НОМ}} \pm \Delta U, \quad \text{якщо} \begin{cases} u(t) > u_{в.31}; \\ u(t) < u_{н.31}. \end{cases}$$

де  $K_m$  – коефіцієнт трансформації трансформатора з РПН;  $u(t)$  – регульовальна дія, яка формується регулятором;  $u_{н.3}$ ,  $u_{в.3}$  – нижня і верхня границі його зони нечутливості, які задаються з умов надійності;  $U_y$  – уставка регулятора, яка відповідає номінальній напрузі  $U_{\text{НОМ}}$  на шинах підстанції;  $U(t)$  – поточне значення цієї напруги;  $I_{\min}$  – струм, що знімається з шин підстанції в режимі мінімуму навантаження;  $I(t)$  – поточне значення цього струму;  $U_{н.н}$  – напруга на шинах низької напруги трансформатора;  $U_i$  – напруга, що індукуються в обмотці високої напруги трансформатора при підключенні  $i$ -го відгалуження;  $K_1$  – коефіцієнт передачі блоку, що формує регульовальну дію, яка характеризує чутливість регулятора;  $K_2$  – коефіцієнт, який визначає нахил характеристики зустрічного регулювання;  $\tau_3$  – час затримки сигналу;  $\frac{dU_{or}}{dt}$  – похідна огинаючої контрольованої

напруги;  $\Delta U = U_{в.3} - U_{НОМ} = U_{НОМ} - U_{н.3}$ ;  $U_{в.3}$ ,  $U_{н.3}$  – напруга електричної мережі, яка відповідає верхній і нижній границям зони нечутливості регулятора, що задається з умов надійності;  $u_{в.31}$ ,  $u_{н.31}$  – верхня і нижня границі зони нечутливості, обумовленої якістю регулювання напруги;  $t_{\text{пер}}$  – час регулювання, на протязі якого значення напруги повертається в зону нечутливості, обумовлену надійністю роботи системи.

Оскільки реалізація базового регулятора системи регулювання напруги приведена в [3], синтезуємо структуру регулятора, яка реалізує удосконалення в законі регулювання (1).

Для синтезу структури застосуємо математичний апарат секвенцій [4].

Покажемо процес синтезу для системи регулювання напруги, яка містить силовий трансформатор з чотирма відгалуженнями.

Позначимо через  $y_1 - y_4$  вихідні змінні, які відповідають положенню пристрою РПН на відповідному відгалуженні силового трансформатора. Причому змінна  $y_1$  відповідає положенню пристрою РПН на кінцевому відгалуженні трансформатора при регулюванні напруги в сторону її збільшення, а змінна  $y_4$  - на кінцевому відгалуженні при регулюванні напруги в сторону її зменшення.

Змінним  $y_1 - y_4$  відповідають стани системи  $S_1 - S_4$ , кожен з яких запам'ятовується за допомогою відповідного тригера  $T_1 - T_4$ . В цих станах система знаходиться при відсутності відхилення напруги.

Оскільки законом регулювання (1) передбачено регулювання напруги з моменту, коли вона виходить за межі зони нечутливості  $u_{в.31}$  або  $u_{н.31}$ , і до моменту, коли значення напруги входить в зону нечутливості з границями  $u_{в.3}$  і  $u_{н.3}$ , то для запам'ятовування знаку відхилення напруги введемо ще два тригери  $T_5$  і  $T_6$ .

При виході напруги за межі зони нечутливості регулятора  $u_{в.31}$  або  $u_{н.31}$  перехід з одного з усталених станів  $S_1 - S_4$  в інший проводиться наступним чином.

Враховуючи те, що вихід контрольованої напруги за межі зони  $u_{в.31}$  або  $u_{н.31}$  передбачає перемикання пристрою РПН принаймні на два положення, то перше перемикання від усталеного значення необхідно виконувати через час  $\tau_1$ , обумовлений відстроюванням від короточасних стрибків напруги в електричній мережі, а кожне наступне перемикання пристрою РПН, поки напруга знаходиться за межами зони нечутливості  $u_{в.3}$  або  $u_{н.3}$ , необхідно проводити через час  $\tau_2$ , обумовлений часом закінчення перехідних процесів в електричній мережі при комутації відгалужень трансформатора пристроєм РПН. При досягненні пристроєм РПН кінцевого відгалуження трансформатора з'являється сигнал В (при регулюванні напруги в сторону її збільшення) або сигнал Н (при регулюванні напруги в сторону її зменшення), що забороняє подальше регулювання напруги у відповідну сторону.

Для переходу з одного усталеного стану в інший з врахуванням напрямку переходу вводимо додаткові проміжні стани  $S_5 - S_{10}$ .

З врахуванням наведених міркувань граф функціонування системи регулювання напруги має вигляд, представлений на рис. 1.

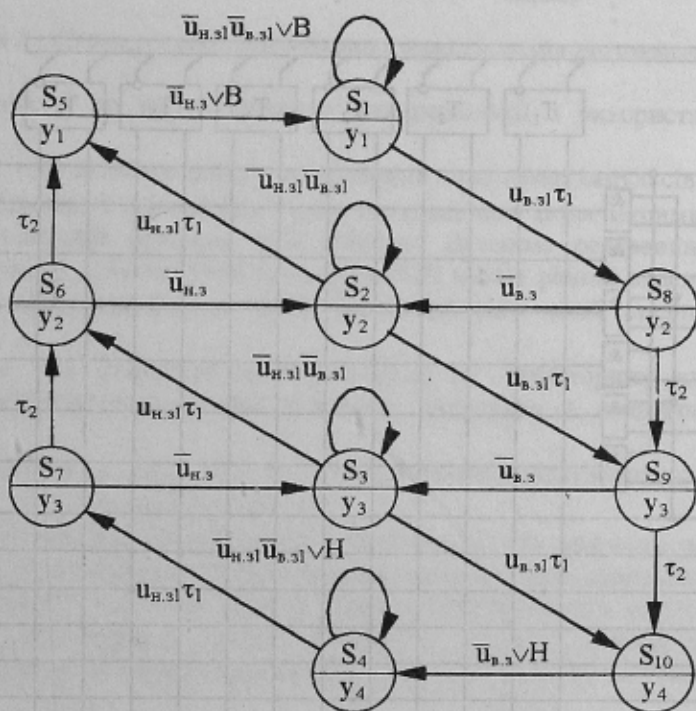


Рисунок 1 - Граф функціонування системи регулювання напруги

Аналітично функціонування системи регулювання напруги, яка виражена у вигляді графа, може бути описана наступною системою секвенцій:

$$\begin{aligned}
 (\bar{u}_{н.31} \bar{u}_{в.31} \vee B) S_1 &\vdash S_1; & \bar{u}_{в.3} S_9 &\vdash S_3; & u_{н.31} \tau_1 S_4 &\vdash S_7; \\
 (\bar{u}_{н.3} \vee B) S_5 &\vdash S_1; & (\bar{u}_{н.31} \bar{u}_{в.31} \vee H) S_4 &\vdash S_4; & u_{в.31} \tau_1 S_1 &\vdash S_8; \\
 \bar{u}_{н.31} \bar{u}_{в.31} S_2 &\vdash S_2; & (\bar{u}_{в.3} \vee H) S_{10} &\vdash S_4; & u_{в.31} \tau_1 S_2 &\vdash S_9; \\
 \bar{u}_{н.3} S_6 &\vdash S_2; & u_{н.31} \tau_1 S_2 &\vdash S_5; & \tau_2 S_8 &\vdash S_9; \\
 \bar{u}_{в.3} S_8 &\vdash S_2; & \tau_2 S_6 &\vdash S_5; & u_{в.31} \tau_1 S_3 &\vdash S_{10}; \\
 \bar{u}_{н.31} \bar{u}_{в.31} S_3 &\vdash S_3; & u_{н.31} \tau_1 S_3 &\vdash S_6; & \tau_2 S_9 &\vdash S_{10}; \\
 \bar{u}_{н.3} S_7 &\vdash S_3; & \tau_2 S_7 &\vdash S_6; & S_1 \vee S_5 &\vdash y_1; \\
 S_2 \vee S_6 \vee S_8 &\vdash y_2; & S_3 \vee S_7 \vee S_9 &\vdash y_3; & S_4 \vee S_{10} &\vdash y_4.
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 &\vdash S_1; & T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 &\vdash S_5; & \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 T_6 &\vdash S_9; \\
 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 &\vdash S_2; & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 &\vdash S_6; & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 &\vdash S_{10}. \\
 \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{T}_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 &\vdash S_3; & \bar{T}_1 \bar{T}_2 T_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 &\vdash S_7; & & \\
 \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 T_4 \bar{T}_5 \bar{T}_6 &\vdash S_4; & \bar{T}_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 T_5 \bar{T}_6 &\vdash S_8; & & 
 \end{aligned} \quad (3)$$

Після проведення перетворень та мінімізації секвенціальних виразів (3) отримуємо наступну систему секвенцій:

$$\begin{aligned}
 (T_6 \vee T_7) T_6 \tau_1 &\vdash T_1; & (T_6 \vee T_7) T_6 \tau_1 T_3 \tau_2 &\vdash T_4; & \bar{u}_{н.3} &\vdash \bar{T}_6; \\
 (T_6 \vee T_7) T_7 \tau_1 T_2 \tau_2 &\vdash \bar{T}_1; & (T_6 \vee T_7) T_7 \tau_1 &\vdash \bar{T}_4; & T_1 \bar{T}_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 &\vdash y_1; \\
 (T_6 \vee T_7) T_6 \tau_1 T_1 \tau_2 &\vdash T_2; & u_{в.31} &\vdash T_5; & T_2 \bar{T}_3 \bar{T}_4 &\vdash y_2; \\
 (T_6 \vee T_7) T_7 \tau_1 T_3 \tau_2 &\vdash \bar{T}_2; & \bar{u}_{в.3} &\vdash \bar{T}_5; & T_3 \bar{T}_4 &\vdash y_3; \\
 (T_6 \vee T_7) T_6 \tau_1 T_2 \tau_2 &\vdash T_3; & u_{н.31} &\vdash T_6; & T_4 &\vdash y_4. \\
 (T_6 \vee T_7) T_7 \tau_1 T_4 \tau_2 &\vdash \bar{T}_3; & & & & 
 \end{aligned} \quad (4)$$

Перший етап синтезу полягає в побудові структурної схеми, яка реалізує систему секвенціальних рівнянь (4). На рис. 2 зображена структурна схема системи регулювання напруги, синтезована на основі системи секвенцій (4).

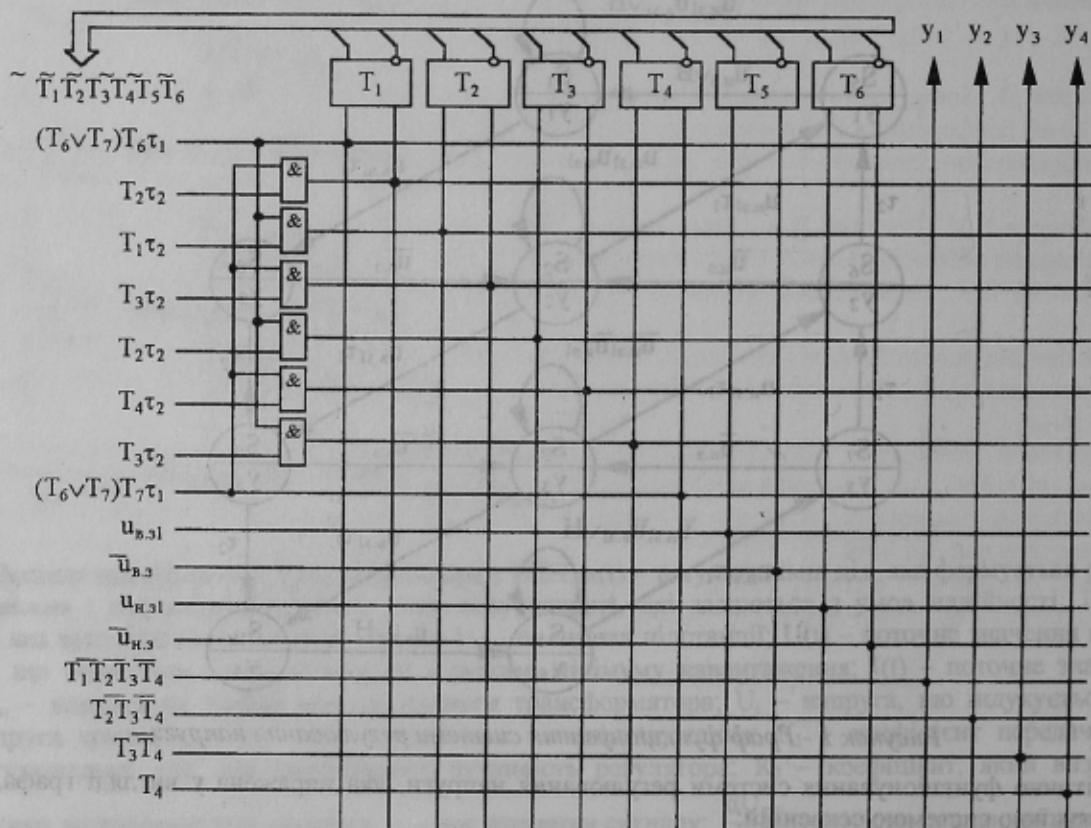


Рисунок 2 - Структурна схема системи регулювання напруги, побудована за секвенціальними виразами (4)

На другому етапі синтезу проводимо перетворення отриманої структурної схеми до зручного для реалізації у вибраній елементайній базі виду. Для цього попередньо перетворюємо схему, зображену на рис. 2, таким чином, щоб замінити з'єднання елементів через діодну матрицю безпосереднім під'єднанням. Отримана в результаті перетворень схема приведена на рис. 3.

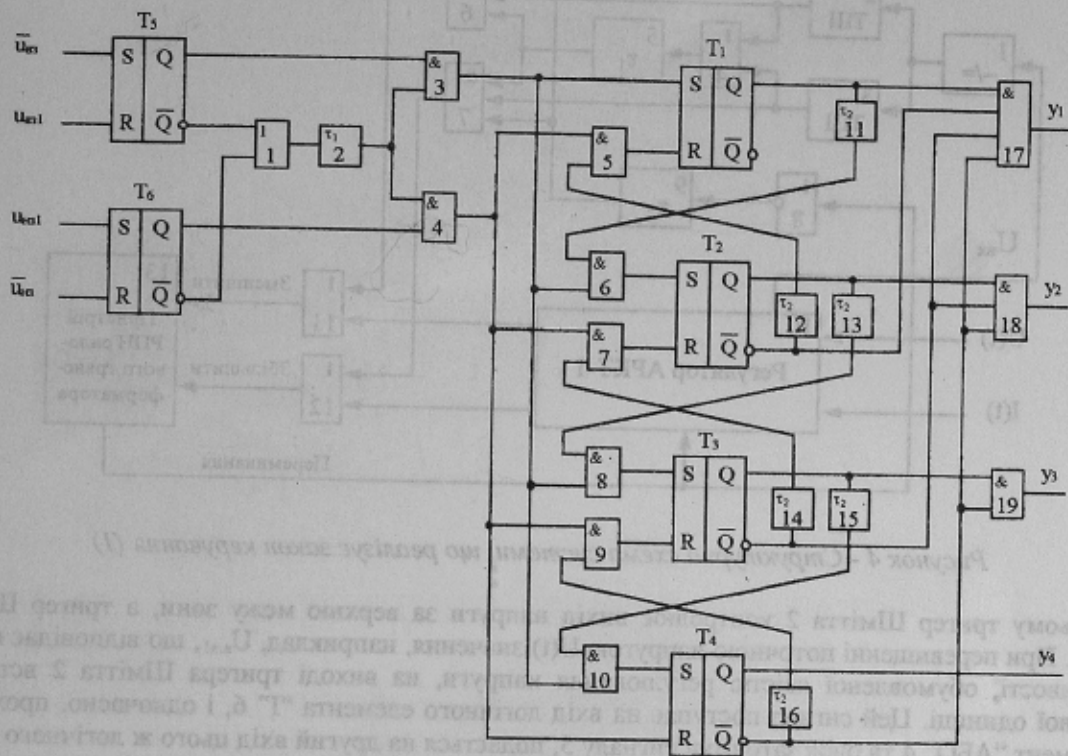


Рисунок 3 - Перетворена структурна схема системи регулювання напруги

Приведемо схему рис. 3 до виду, зручного для реалізації з використанням серійних стандартних елементів.

Елементи  $T_1 - T_4$ , 5 - 19 являють собою реверсивний лічильник імпульсів з дешифратором, швидкість переходу якого з одного усталеного положення в інше визначається часом затримки сигналу  $\tau_2$ . В даній системі регулювання напруги механічний пристрій РПН виконує функцію реверсивного лічильника імпульсів з дешифратором. Враховуючи те, що різні типи пристроїв РПН мають різний власний час перемикавання з одного відгалуження на інше, в них передбачено формування сигналу, який свідчить про тривалість процесу перемикавання.

Слід зазначити, що при реалізації пристрою РПН на симісторних ключах в структурі системи регулювання напруги вказаний реверсивний лічильник імпульсів з дешифратором був би обов'язково присутнім.

Для отримання сигналів  $\bar{u}_{в.з}$ ,  $\bar{u}_{н.з}$ ,  $u_{в.з1}$ ,  $u_{н.з1}$  використаємо компаратори напруги, які разом з тригерами  $T_5$  і  $T_6$  відповідно являють собою тригери Шмітта. [5].

Враховуючи те, що більшості функцій закону керування (1) реалізована в регуляторі АРКТ-1 [6], то для сумісної роботи його і синтезованого регулятора вихідні сигнали з них необхідно подавати на пристрій РПН через логічні елементи "АБО", сигнал на тригери Шмітта синтезованого регулятора необхідно подавати з регулятора АРКТ-1 через перетворювач змінної напруги в постійну, а блок затримки сигналу на час  $\tau_2$  перехідних процесів в електричній мережі при кожній комутації пристроєм РПН повинен спрацьовувати від сигналу пристрою РПН.

З врахуванням зазначених зауважень на рис. 4 представлена структурна схема системи, що реалізує закон керування (1).

На схемі: 1 - перетворювач змінної напруги в постійну; 2, 3 - тригер Шмітта; 4, 11, 12 - логічний елемент "АБО"; 5, 9 - блок затримки сигналу; 6, 7 - логічний елемент "І"; 8 - логічний елемент "НІ"; 10 - регулятор АРКТ-1 [6]; 13 - пристрій РПН силового трансформатора.

Працює запропонована система наступним чином. З регулятора АРКТ-1 контролювана напруга  $U_{вх}$ , пропорційна вхідним сигналам системи  $U(t)$  і  $I(t)$ , поступає на перетворювач змінної напруги в постійну 1, з виходу якого подається на тригери Шмітта 2, 3, які виконують роль порогових елементів і задають ширину зони нечутливості, обумовлену допустимою якістю регулювання напруги.

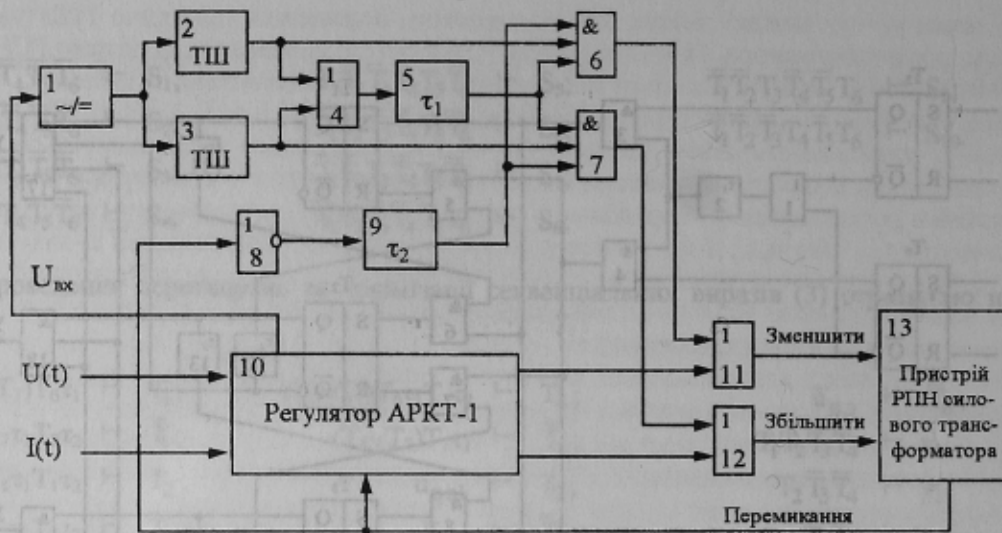


Рисунок 4 - Структурна схема системи, що реалізує закон керування (1)

При цьому тригер Шмітта 2 контролює вихід напруги за верхню межу зони, а тригер Шмітта 3 – за нижню межу. При перевищенні поточною напругою  $U(t)$  значення, наприклад,  $U_{н.з.1}$ , що відповідає верхній межі зони нечутливості, обумовленої якістю регулювання напруги, на виході тригера Шмітта 2 встановлюється сигнал логічної одиниці. Цей сигнал поступає на вхід логічного елемента “І” 6, і одночасно, проходячи через логічний елемент “АБО” 4 та блок затримки сигналу 5, подається на другий вхід цього ж логічного елемента “І” 6. Затримка сигналу блоком 5 необхідна для запобігання запуску пристрою РПН при короткочасних коливаннях напруги. Якщо пристрій РПН не заходиться в процесі перемикання, то на вході логічного елемента “НІ” 8 присутній сигнал логічного нуля, а на третьому вході логічного елемента “І” 6 – сигнал логічної одиниці. Таким чином, на виході логічного елемента “І” 6 сигнал логічної одиниці з’являється тоді, коли значення контрольованої напруги перевищує  $U_{н.з.1}$  на протязі часу не меншого  $\tau_1$  і нерухомому електроприводі пристрою РПН силового трансформатора. Цей сигнал, проходячи через логічний елемент “АБО” 11, запускає пристрій РПН на перемикання відгалуження в сторону зменшення напруги вторинної обмотки силового трансформатора. Коли електропривод пристрою РПН починає рух, на вході логічного елемента “НІ” 8 з’являється сигнал логічної одиниці “Перемикання”, а на вході блоку затримки сигналу 9 – сигнал логічного нуля, який без затримки поступає вхід логічного елемента “І” 6 і закриває його. По закінченні перемикання на вході логічного елемента “НІ” 8 з’являється сигнал логічного нуля, а на вході блоку затримки сигналу 9 – сигнал логічної одиниці, який через час  $\tau_2$  подається на вхід логічного елемента “І” 6, що дозволяє подальше перемикання пристрою РПН. Коли в результаті серії перемикань напруга на вторинній обмотці силового трансформатора заходить в зону нечутливості регулятора АРКТ-1, на виході тригера Шмітта 2 з’являється сигнал логічного нуля, який подається на вхід логічного елемента “І” 6 і закриває його.

#### ВИСНОВКИ

1. Запропоновано метод синтезу структури регулятора напруги для силового трансформатора з пристроєм РПН.
2. Синтезована структурна схема регулятора напруги.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов І.Ю. До питання підвищення ефективності регулювання напруги в електричних мережах // Вісник ВПІ. – 1999. – №3. – С. 32 – 35.
3. А.с. 1140094 СССР, МКИ G 05 B 11/01. Регулятор напряжения для силовых трансформаторов/ Б.И. Мокин, Н.А. Головатюк, А.Г. Маладыка (СССР). №3529866/24-24; Заявлено 24.12.82; Опубл. 15.02.85, Бюл. №6. – 9с.
4. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью. – М.: Энергия, 1975. – 136 с., ил.
5. Щербаков В.И., Грездов Т.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. – К.: Техника, 1983. – 213 с.
6. Мокін Б.И., Выговский Ю.Ф. Автоматические регуляторы в электрических сетях. – К.: Техніка, 1985. – 104 с.