

УДК 621.314

В. В. Грабко, д. т. н., проф.;

С. М. Левицький, к. т. н.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

Запропоновано інтелектуальний регулятор системи керування трансформаторами, який відрізняється від відомих врахуванням ресурсу пристроїв регулювання під навантаженням трансформаторів та варіативною затримкою на проведення перемикання, що дозволяє збільшити надійність систем керування трансформаторами.

Постановка проблеми

Надійність роботи систем автоматичного керування (САК), в тому числі в електроенергетиці, визначається роботою найненадійнішої ланки всієї системи. На етапі розподілення електроенергії між підстанціями споживачів такі САК виконують функцію регулювання напруги за допомогою трансформаторів, оснащених пристроями регулювання під навантаженням (РПН). Вказані пристрої є найненадійнішими ланками систем, характеризуються низьким ресурсом зносостійкості, тому їх експлуатують лише за крайніх умов, що призводить до відхилень напруги на вводах споживачів [1, 2]. Сьогодні стан силової електроенергетики такий, що більшість пристроїв вичерпали свій ресурс зносостійкості, а заміна проводиться в поодиноких випадках. Отже, існує *проблема* побудови таких САК трансформаторами, які враховують ресурс власних РПН та мають належні показники якості регулювання.

Аналіз останніх досліджень

В роботах [3, 4] висвітлена методика діагностування пристроїв РПН та іншого трансформаторного обладнання з нечіткою логікою, але власне діагностування є пасивною дією, рішення про подальшу експлуатацію чи виведення з неї приймає оперативний персонал. В роботі [5] проведено оцінку регульовальної здатності трансформаторів з РПН з врахуванням їх ресурсу, однак відсутні розробки та пропозиції щодо подальшого застосування оцінки як в системах діагностування, так і в САК. Дослідження моделі САК трансформатора із РПН та аналіз шляхів підвищення якості напруги на вводах споживачів здійснено в роботі [6], але в досліджуваній моделі до уваги не взято вплив ресурсу роботи пристрою РПН на надійність системи керування.

Постановка завдання

У роботі [1] запропоновано апаратну та програмну реалізацію САК трансформаторами із пристроями РПН з покращеним алгоритмом формування сигналу перемикання, однак для її вдосконалення *потрібно* розробити закон регулювання напруги, який враховуватиме ресурс пристроїв РПН і дозволить збільшити надійність САК.

Матеріали дослідження

Закон регулювання напруги в САК трансформаторами із пристроями РПН, розроблений в [1, 2] має вигляд:

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

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

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

де K_m — коефіцієнт трансформації трансформатора із РПН; $u(t)$ — приведена напруга на шинах підстанції з урахуванням струмової компенсації; $u_{н.3}$, $u_{в.3}$ — нижня і верхня границі 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; $I_{\text{мін}}$ — 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 індукується в обмотці високої напруги трансформатора в разі підключення i -го відгалуження; K_1 — коефіцієнт, який характеризує чутливість регулятора; K_2 — коефіцієнт, який визначає нахил характеристики зустрічного регулювання; τ_3 — час затримки сигналу; dU_o/dt — похідна обвідної контрольованої напруги; $\Delta U = u_{в.3} - U_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - u_{н.31}$, $u_{н.31}$, $u_{в.31}$ — верхня і нижня границі зони нечутливості, обумовленої якістю регулювання напруги; $t_{\text{пер}}$ — час регулювання, протягом якого значення напруги повертається в зону нечутливості, обумовлену надійністю роботи системи.

У законі (1) здійснена спроба керування пристроєм РПН з двома затримками — звичайною τ_3 та мінімальною ($t_{\text{пер}} \rightarrow \min$). Автоматичним регулятором відпрацьовується один з варіантів в залежності від фактичного значення напруги порівняно з двома уставками регулятора: за надійністю (внутрішня зона нечутливості) та якістю (зовнішня зона нечутливості). Очевидно, що для пристроїв РПН, які відпрацьовали (відпрацьовують) свій залишковий ресурс, перемикання потрібно проводити рідше, ніж для тих, які щойно введені в експлуатацію. Чіткої залежності між тривалістю експлуатації та категоріями, наприклад, «нового» та «зношеного» пристроїв РПН, не існує, оскільки це враховується низкою параметрів, які аналізуються в роботі [4].

Таким чином, в законі регулювання напруги (1) величину часу затримки сигналу τ_3 варто розглядати як одну з основних змінних (поряд з зоною нечутливості ΔU), яка з одного боку визначатиметься ресурсом пристрою РПН, а з іншого — однозначно впливатиме на якість електроенергії на вводах споживачів (тривалість і величину провалів напруги, флікерів, перенапруг і т. д.). Зону нечутливості регулятора слід встановити такою, що відповідає допустимим відхиленням напруги ($\Delta U = \text{const}$). Її зменшення буде призводити до зайвих перемикань, а збільшення — до недопустимих відхилень напруги на вводах споживачів.

Отже, для формування залежності часу затримки в системі керування трансформатором від ресурсу пристрою РПН скористаємось апаратом нечітких множин та визначеними вхідними величинами в роботі [3]. Вхідні величини, які визначають (або впливають) на залишковий ресурс пристроїв РПН і використовуються під час їх діагностування такі: струм електродвигуна приводу (I), тангенс кута діелектричних втрат трансформаторного масла ($\text{tg } \delta$), вміст вологи в маслі (W), ємність масла (C), вміст розчинених газів CO_2 , C_2H_4 , C_2H_2 (найбільше змінюється вміст в процесі зносу пристрою РПН) та перехідний опір контактів (R). Лінгвістична оцінка вказаних величин наведена в табл. 1.

Вхідні параметри каналу визначення стану РПН та їх лінгвістична оцінка

Параметри	Назва	Діапазон значень	Терми
X_1	Струм електродвигуна приводу, А	1,0...2,5	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X_2	Тангенс кута діелектричних втраг, %	2,0...4,2	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X_3	Вміст вологи в маслі, г/т	10...25	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X_4	Ємність масла, пФ	8...16	Низька (Н), середня (С), велика (В)
X_5	Вміст розчиненого CO ₂ , мкл/л	1800...4000	Низький (Н), середній (С), великий (В)
X_6	Вміст розчинених вуглеводнів, мкл/л	45...180	Низький (Н), середній (С), вище середнього (ВС), великий (В)
X_7	Перехідний опір контактів, мкОм	16...20	Низький (Н), середній (С), великий (В)

Задача полягає в тому, щоб кожній комбінації вхідних параметрів поставити у відповідність одне із значень затримки часу в САК трансформатором d_j ($j = \overline{1,6}$), яким враховується ресурс пристрою РПН. Отже, вихідною величиною $Y = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ є затримка часу, що приймає значення в межах від 0,5 до 3 с з кроком в 0,5 с (для швидкохідних приводних механізмів з тривалістю перемикавання на сусіднє відгалуження 5...8 с). Користуючись введеними термами, створюємо нечітку базу знань, фрагмент якої наведений в табл. 2.

Таблиця 2

Фрагмент нечіткої бази знань

Входи							Вихід
X_1 (I)	X_2 (tg δ)	X_3 (W)	X_4 (C)	X_5 (CO ₂)	X_6 (C _n H _m)	X_7 (R)	Y
Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	d_1
Н	Н	С	Н	Н	С	Н	
С	Н	С	Н	Н	С	Н	d_2
С	С	С	Н	С	С	С	d_3
ВС	С	С	С	С	ВС	С	d_4
ВС	ВС	ВС	С	С	ВС	С	d_5
В	ВС	ВС	В	В	В	С	d_6
В	В	В	В	В	В	В	

Для аналітичного запису термів використовуємо функції належності (ФН) Гауса (2), що відповідає нормальному закону розподілу належності вхідної величини до вибраних терм згідно з центральною граничною теоремою [7]:

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x - b)^2}{2 \cdot c^2}\right), \tag{2}$$

де b — координата максимуму; c — коефіцієнт концентрації-розтягу.

На основі бази знань і ФН термів складаємо нечіткі логічні рівняння, що описують цю модель. Рівняння, що відповідають табл. 2, наведені в системі (3).

$$\left\{ \begin{aligned} \mu^{d_1}(d) &= \left[\mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^H(X_5) \cdot \mu^H(X_6) \cdot \mu^H(X_7) \right] \vee \\ &\vee \left[\mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^H(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^H(X_7) \right]; \\ \mu^{d_2}(d) &= \left[\mu^C(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^H(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^H(X_7) \right]; \\ \mu^{d_3}(d) &= \left[\mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^C(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\ \mu^{d_4}(d) &= \left[\mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^{BC}(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\ \mu^{d_5}(d) &= \left[\mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^{BC}(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^C(X_4) \cdot \mu^C(X_5) \cdot \mu^{BC}(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right]; \\ \mu^{d_6}(d) &= \left[\mu^B(X_1) \cdot \mu^{BC}(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \cdot \mu^B(X_4) \cdot \mu^B(X_5) \cdot \mu^B(X_6) \cdot \mu^C(X_7) \right] \vee \\ &\vee \left[\mu^B(X_1) \cdot \mu^B(X_2) \cdot \mu^B(X_3) \cdot \mu^B(X_4) \cdot \mu^B(X_5) \cdot \mu^B(X_6) \cdot \mu^B(X_7) \right]. \end{aligned} \right. \tag{3}$$

Отриманий вираз нечіткого логічного висновку щодо встановлення часу затримки в САК у вигляді множини Y включається в закон регулювання напруги у вигляді додаткової умови на формування значення затримки часу τ_3 . Закон регулювання напруги з керованою затримкою часу матиме вигляд системи (4).

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

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_o}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, \text{ якщо } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.3}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.3}; \\ \frac{dU_o}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_3 = \text{fuzzy} \left(I, \text{tg } \delta, W, C, CO_2, C_n H_m, R \right),$$

де *fuzzy* — оператор нечіткого логічного висновку, що описується системою (3).

Структура САК трансформатором, яка функціонує у відповідності до розробленого закону керування показана на рис. 1.

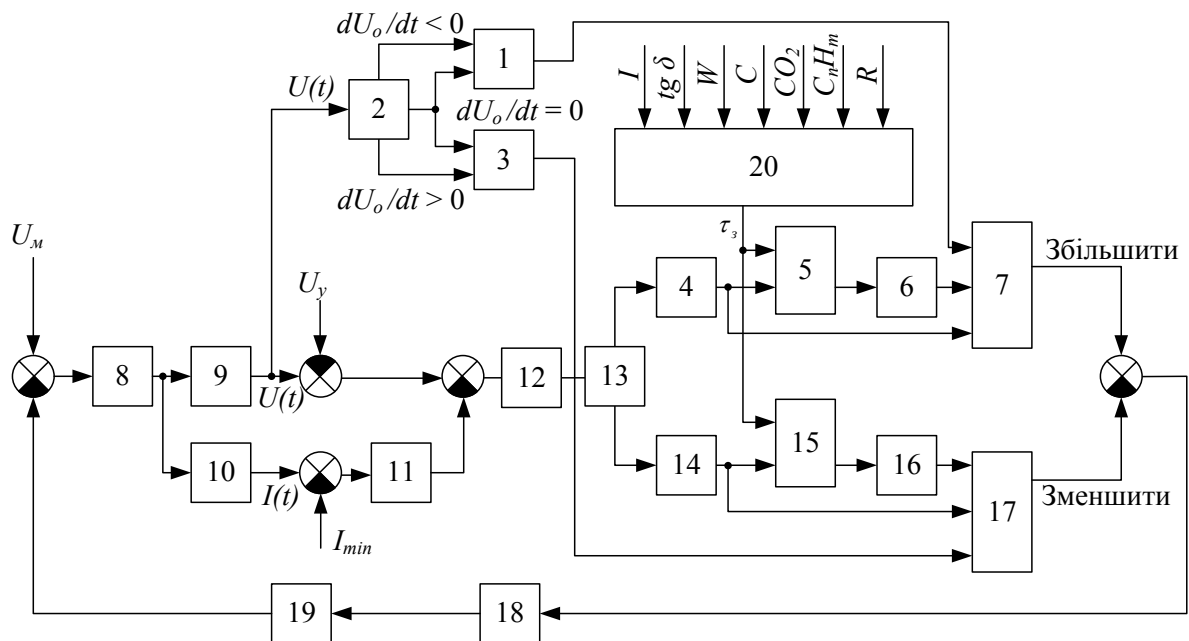


Рис. 1. Структурна схема САК трансформатором з керованою затримкою сигналу.

1, 3 — елементи АБО; 2 — блок визначення знаку похідної обвідної напруги на навантаженні; 4, 14 — перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний; 5, 15 — блоки часової затримки; 6, 16 — імпульсні елементи; 7, 17 — елементи І; 8 — електрична мережа; 9 — вимірювальний канал напруги на вводах споживачів; 10 — вимірювальний канал струму навантаження підстанції; 11 — масштабувальний підсилювач; 12 — підсилювач; 13 — пороговий блок; 18 — електропривод пристрою перемикання відгалужень ТПР; 19 — перемикаючий пристрій; 20 — *fuzzy*-контролер

Слід зазначити, що апаратна реалізація блока часової затримки з неперервним керуванням від

зовнішнього аналогового сигналу досить складна. Однак її програмна реалізація з використанням мікропроцесорного контролера як регулювального пристрою САК (наприклад, Twido LMDA20DTK [8]) достатньо зручна — для цього варто використати функцію керованого таймера, в значення затримки сигналу якого записувати дані відповідного нечіткого висновку, отриманого за результатами розв'язання системи (3).

Висновки

1. Запропоновано математичну модель автоматичного регулятора САК трансформатором з РПН, що відрізняється від відомих керованою затримкою на перемикання в функції стану зношеності пристрою РПН і дозволяє покращити надійність САК та якість електроенергії на вводах споживачів.

2. Розроблена структурна схема автоматичного регулятора САК трансформатором, яка передбачає формування варіативної затримки сигналу перемикання на підставі нечіткого логічного висновку з оцінки параметрів стану РПН і дозволяє реалізувати регулятор на базі мікропроцесорного контролера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : моног. / Володимир Віталійович Грабко. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 109 с. — ISBN 966-641-115-6.
2. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.
3. Прогнозування якості функціонування пристроїв регулювання під напругою трансформаторів в умовах нечітких результатів випробувань / Ю. О. Карпов, П. Д. Лежнюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 2. — С. 61—65.
4. Рубаненко О. Є. Нейро-нечітке моделювання в задачах оперативного діагностування електрообладнання [Електронний ресурс] / О. Є. Рубаненко // Вид-во Львівської політехніки. — 2007. — № 597. — С. 14—19. — Режим доступу : http://vlp.com.ua/files/03_12.pdf.
5. Калюжный Д. Н. Оценка регулировочной способности двухобмоточных трансформаторов с регулированием под нагрузкой / Д. Н. Калюжный // Світлотехніка та електроенергетика. — 2006. — № 7—8. — С. 65—69.
6. Жорняк Л. Б. Моделирование системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН / Л. Б. Жорняк, В. И. Осинская, И. В. Тарасовская // Електротехніка та електроенергетика. — 2006. — № 1. — С. 79—86.
7. Тутубалин Валерий Николаевич. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пос. / В. Н. Тутубалин. — М. : Изд-во МГУ, 1992. — 400 с. — ISBN 5-211-02264-5.
8. Twido. Программируемые контроллеры. Справочное руководство по программному обеспечению. — Schneider Electric. — Telemecanique. — TWDUSE10AF ver 2.1 — 2004. — 478 с.

Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Надійшла до редакції 13.10.10
Рекомендована до друку 4.11.10

Грабко Володимир Віталійович — завідувач кафедри, **Левицький Сергій Михайлович** — доцент.

Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, Вінницький національний технічний університет