

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ, ПРИСТРОЇВ ЇХ ЗАХИСТУ Й АВТОМАТИКИ

О.М. Равлик

Національний університет "Львівська політехніка", каф. ЕСМ

The comprehensive approach to creation of mathematical models of units of electrical networks, devices of their guard and automation on the basis of the developed base models in a method of boundary co-ordinates is observed. The generalised mathematical model with usage of a one-step implicit method of integration is formed.

Відповідно до системного підходу узагальнена математична модель для аналізу процесів в електричних мережах, пристроях їх захисту й автоматики (ЕМ і ПЗА) у вигляді системи рівнянь [1,2]

$$L_{eK} \, di_{eK} / dt = \Gamma (e - R i - u_c, \theta); \quad (1)$$

$$i_e = \Gamma_t i_{eK}; \quad (2)$$

$$C \, du_c / dt = i, \quad (3)$$

де $L_{eK} = \Gamma L_e \Gamma_t = \Gamma \begin{vmatrix} L & M_{eM} \\ M_{eM} & L_{eM} \end{vmatrix} \Gamma_t$ – матриця контурних параметрів;

$i_e = (i, i_{eM})$ – узагальнений вектор еквівалентних струмів для електричних і магнітних кіл,

формується на основі математичних моделей базових елементів згідно створеної розрахункової схеми. Вибір базових елементів визначається особливостями схем і вимогами до аналізу процесів в ЕМ і ПЗА, сформульованими на основі багаторічного практичного досвіду. Така система рівнянь потребує набагато простіших алгоритмів з точки зору формування і реалізації її у вигляді ЦМ.

Еквівалентна система рівнянь (1)–(3) описує стаціонарний стан ЕМ і ПЗА. Для відтворення зміни стану у загальному випадку цю систему необхідно доповнити рівняннями:

$$e = \begin{cases} \text{const}; \\ f(\omega, t); \\ f(i, di/dt, u, du/dt, t); \end{cases} \quad (4)$$

$$R = \begin{cases} \text{const}; \\ f(i, u, du/di, t); \end{cases} \quad (5)$$

$$L_e = \begin{cases} \text{const}; \\ f(i_e, di_e/dt, t); \end{cases} \quad (6)$$

$$C = \begin{cases} \text{const}; \\ f(u_c, du_c/dt, i, t); \end{cases} \quad (7)$$

які відтворюють зміну е.р.с. і параметрів елементів ЕМ і ПЗА від координат режиму та їх похідних і в часі. Отже система рівнянь (1)–(7) є більш повною і дозволяє відтворити не тільки стаціонарний стан ЕМ і ПЗА, але можливі зміни цього стану як у нормальному, так і в аварійних режимах.

Виходячи з цього, встановимо наступний список базових елементів для формування розрахункових схем ЕМ і ПЗА:

1. Електрична вітка, яка в свою чергу може складатись з наступних елементів:

- послідовного з'єднання е.р.с., активного опору, індуктивності та ємності;
- нелінійного динамічного опору;
- нелінійної індуктивності;
- некерованого (діода) або керованого (тиристора) вентилятного елемента;

ПЗА;

- контактів реле;

- комутаційного елемента для відтворення зміни стану іскрового проміжку;
- найпростіших реле струму, напруги, часу та сигнальних реле;
- 2. Електрична шина – елемент об'єднання декількох електричних віток;
- 3. Взаємний зв'язок між електричними вітками, в свою чергу поділяється на:
 - односторонній і двосторонній електромагнітний зв'язок між вітками з індуктивностями;
 - односторонній зв'язок зміни струмом або напругою параметрів е.р.с. чи зміни стану іскрового проміжку (пробиття або відновлення);
- 4. Заземлення (точка нульового потенціалу) – встановлює номерам вузлів віток значення нуля;
- 5. Пристрій вимірювання і розкладу в гармонічний ряд струмів або напруг відповідних віток;
- 6. Елемент керування за часом – у відповідний момент часу змінює R, L, C – параметри вітки;
- 7. Елемент керування за струмом – після встановленого часу за відповідної величини струму змінює R, L, C – параметри вітки;
- 8. Пристрій формування імпульсів – формує імпульси на відкриття керованих вентильних елементів (тиристорів);
- 9. Синхронна машина – для моделювання процесів з синхронним генератором чи двигуном навантаження;
- 10. Асинхронна машина – для моделювання процесів з асинхронним генератором чи двигуном навантаження;
- 11. Функція керування – для відтворення алгебро–логічних і інтегральних функцій ПЗА;
- 12. Пристрій ручного керування – змінює параметри елементів розрахункової схеми за графічно заданим законом.

Відповідно до перерахованого списку на рис.1 приведені зображення всієї сукупності базових елементів для моделювання ЕМ і ПЗА, а також окремі варіанти їх застосування.

Слід відмітити, що окремим базовим елементам для формування розрахункових схем на відміну від зовнішнього зображення можуть відповідати подібні математичні моделі, які можуть різнитися тільки вхідними або вихідними параметрами. І навпаки, наприклад базовому елементу “електрична вітка” відповідатиме декілька абсолютно різних математичних моделей на основі сформованого списку елементів, які можуть утворювати її зображення.

Не треба забувати ще і ту особливість, що реалізація математичних моделей в значній мірі залежить від вибраного методу інтегрування. Для інтегрування системи рівнянь (1)-(7) використано неявний однокроковий метод, запропонований в [3]. Основна сутність усіх неявних методів полягає у апроксимації похідних на k+1-му кроці інтегрування за рахунок невідомих координат і координат та їх похідних з попередніх кроків. Для нашого випадку похідні векторів струмів віток $(d\mathbf{i}_e / dt)_{k+1}^{(n)}$ і напруг на ємностях $(d\mathbf{u}_c / dt)_{k+1}^{(n)}$ визначаються згідно [3] для n-го порядку методу за виразами:

$$(d\mathbf{i}_e / dt)_{k+1}^{(n)} = a_0 (\mathbf{i}_{e, k+1}^{(n)} - \mathbf{i}_{e, k}^{(n)}); \quad (8)$$

$$(d\mathbf{u}_c / dt)_{k+1}^{(n)} = a_0 (\mathbf{u}_{c, k+1}^{(n)} - \mathbf{u}_{c, k}^{(n)}), \quad (9)$$

де $a_0 = 4/3 h^{-1}$ – коефіцієнт інтегрування.

Вектори $\mathbf{i}_{e, k}^{(n)}$ і $\mathbf{u}_{c, k}^{(n)}$ визначимо як:

$$\mathbf{i}_{e, k}^{(n)} = \mathbf{i}_{e, k}^{(n-1)} + \Delta \mathbf{i}_{e, k}^{(n-1)}; \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_{c, k}^{(n)} = \mathbf{u}_{c, k}^{(n-1)} + \Delta \mathbf{u}_{c, k}^{(n-1)}, \quad (11)$$

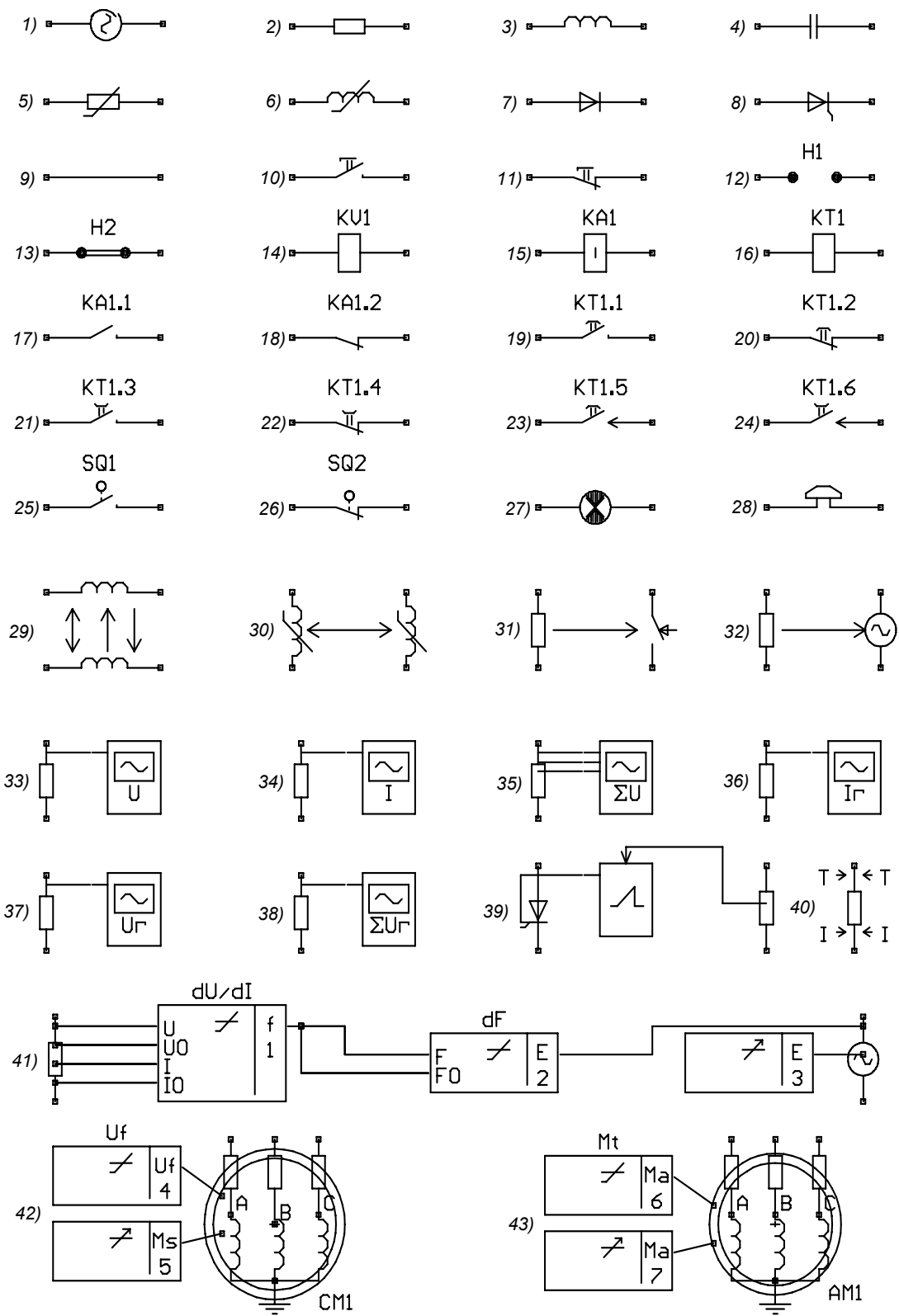


Рисунок 1 - Базові елементи для моделювання процесів в ЕМ і ПЗА

$$\Delta \mathbf{i}_{e,k}^{(n)} = \begin{cases} \frac{h}{4} (\mathbf{di}_e / dt)_k, & n = 1; \\ -\frac{h}{4} \left[(\mathbf{di}_e / dt)_{k+1}^{(n-1)} - (\mathbf{di}_e / dt)_k \right], & n = 2; \\ \frac{h}{12} \left[(\mathbf{di}_e / dt)_{k+1}^{(n-1)} - (\mathbf{di}_e / dt)_{k+1}^{(n-2)} \right], & n = 3; \\ -\frac{9h}{2} \left[(\mathbf{di}_e / dt)_{k+1}^{(n-1)} - (\mathbf{di}_e / dt)_{k+1}^{(n-2)} \right], & n = 4; \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{c,k}^{(n)} = \begin{cases} \frac{h}{4} (\mathbf{du}_c / dt)_k, & n = 1; \\ -\frac{h}{4} \left[(\mathbf{du}_c / dt)_{k+1}^{(n-1)} - (\mathbf{du}_c / dt)_k \right], & n = 2; \\ \frac{h}{12} \left[(\mathbf{du}_c / dt)_{k+1}^{(n-1)} - (\mathbf{du}_c / dt)_{k+1}^{(n-2)} \right], & n = 3; \\ -\frac{9h}{2} \left[(\mathbf{du}_c / dt)_{k+1}^{(n-1)} - (\mathbf{du}_c / dt)_{k+1}^{(n-2)} \right], & n = 4. \end{cases} \quad (13)$$

Підставивши (8) і (9) в (1) – (3), отримаємо:

$$\Gamma \begin{Bmatrix} \mathbf{R} + a_0 \mathbf{L} + (a_0 \mathbf{C})^{-1} & a_0 \mathbf{M}_{eM} \\ a_0 \mathbf{M}_{eMt} & a_0 \mathbf{L}_{eM} \end{Bmatrix}_{k+1} \Gamma_t \mathbf{i}_{eK, k+1}^{(n)} = \Gamma (\mathbf{e}_{k+1} + a_0 \mathbf{L}_{k+1} \mathbf{i}_k^{(n)} - \mathbf{u}_{c, k}^{(n)}, \mathbf{0}); \quad (14)$$

$$\mathbf{i}_{e, k+1}^{(n)} = \Gamma_t \mathbf{i}_{eK, k+1}^{(n)}; \quad (15)$$

$$\mathbf{u}_{c, k+1}^{(n)} = (a_0 \mathbf{C}_{k+1})^{-1} \mathbf{i}_{k+1}^{(n)} + \mathbf{u}_{c, k}^{(n)}. \quad (16)$$

Система рівнянь (4)–(7), (10)–(16) утворює математичну модель ЕМ і ПЗА для неявного однокрокового методу n -го порядку і на $k+1$ -му кроці інтегрування може розв'язуватись декілька раз у відповідності до встановленого максимального порядку методу. Спочатку встановлюється порядок $n=1$, потім – $n=2$ і т.д. Однак, якщо для n -го порядку вектори локальних похибок обчислення контурних струмів і напруг на ємностях стануть меншими за задану максимальну похибку, розрахунок зупиняється і встановлюється наступний крок інтегрування. Якщо для максимального порядку методу максимальна локальна похибка буде більша за $\delta_{зад}$, крок інтегрування h зменшується за виразом

$$h_{new} = 0.9h \left(\frac{\delta_{зад}}{\left\| \tilde{\delta}_{л(k+1)}^{(n)} \right\|} \right)^{\frac{1}{n+1}},$$

де $\tilde{\delta}_{л(k+1)}^{(n)}$ визначається за виразами, приведеними у [3], і процес розрахунку повторюється.

На основі комплексного підходу до моделювання, розроблених математичних моделей базових елементів і неявного однокрокового методу інтегрування сформований універсальний цифровий комплекс для аналізу процесів в ЕМ і ПЗА, який широко використовується в навчальних і науково дослідних роботах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ravlyk A., Gretchyn T. Digital complex for modelling of transient processes in electric circuits // III Symp. Proc. "Metody matematyczne w elektroenergetyce". Zakopane. – 1993. –Р. 17– 20.
2. Равлик О.М., Гречин Т.М., Іваноньків В.Й. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики, // Вісник ДУ "ЛП", Електроенергетичні та електромеханічні системи.- 1997.-№340.-С.96-101..
3. Равлик О.М. Методи розв'язування диференційно-інтегрально-скінчених рівнянь перехідних процесів електротехнічних систем // Вісн. Нац.ун-ту "Львівська політехніка", Електроенергетичні та електромеханічні системи. –2005. –№544. –С.122-126..

Рекомендовано д.т.н. Гребченко М.В.