

тому потрібно враховувати, що швидкість вітру не є сталою, а змінюється. Як наслідок буде змінюватись величина виробленої потужності, що може бути причиною порушень в роботі системи.

Для забезпечення безпечної роботи системи необхідно передбачити резерв потужності в системі (наприклад, на звичайних електростанціях) для покриття дефіциту потужності у разі раптового відімкнення потужної вітрової станції або нездатності вітрової станції генерувати потужність у зв'язку з кліматичними умовами.

1. *EU Directive 2001/77/EC on the promotion of the electricity produced from renewable energy source in the internal electricity market.* [Online]. Available: [http://europa.eu.int/comm/energy/res/legislation/electricity\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/energy/res/legislation/electricity_en.htm). 2. *Reza M., Schavemaker P.H., Kling W.L., Van der Sluis L.A. Research program on intelligent power systems: self-controlling and self-adapting power systems equipped to deal with the structural changes in the generation and the way of consumption // 17th International Conference on Electricity Distribution Barcelona, 12–15 May 2003. – P. 123–128.* 3. *Діалоговий Автоматизований Комплекс Аналізу Режимів (ДАКАР).* [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [www.dakar.eleks.com](http://www.dakar.eleks.com). 4. *Коновал В.С. ДАКАР – комплекс програм для дослідження режимів роботи інтелектуальних енергетичних систем / В.С. Коновал, А.Б. Козовий, О.І. Скрипник, Т.О. Товстяк // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. – К., 2011. – С. 56–64.* 5. *Janusz Brozek, Piotr Jedynak. Wybrane problemy wspolpracy farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym // XIX Seminarium «Zastosowanie komputerow w nauce i technice» 2009». – Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, ISSN 1425-24 5766, Nr 26/2009. – P. 21–24.* 6. *R.R. Londero, C.M. Affonso, M.V.A. Nunes. Impact of Distributed Generation in Steady State, Voltage and Transient Stability – Real Case 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th – July 2nd, Bucharest, Romania. – P. 34–37.*

УДК 621.313.333

А.С. Куцик, Р.Р. Курка, В.С. Ішкеєв

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

Національний лісотехнічний університет України,  
кафедра АВПЕТ

## РЕАЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ

© Куцик А.С., Курка Р.Р., Ішкеєв В.С., 2012

**Описано застосування методу середньокрокових напруг для формування цифрових динамічних моделей елементів електромеханічних систем (на прикладі двигуна постійного струму) та їх реалізацію на мікроконтролері.**

**Ключові слова:** *цифрова модель, електромеханічна система, мікроконтролер.*

**The application of method of middle-step voltages for forming of digital dynamic models of elements of the electromechanics systems (on the example of d.c. motor) and their realization on a microcontroller is described in the article.**

**Key words:** *digital model, electromechanical system, microcontroller.*

### Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень

Більшість сучасних систем керування реалізуються в цифровому вигляді на базі мікроконтролерів, сигнальних мікропроцесорів чи програмованих логічних контролерів. У своїй

роботі такі системи керування використовують цифрові моделі для реалізації естиматорів, спостерігачів, проведення діагностування та самодіагностування. Основними вимогами, які висувають до таких моделей, є висока швидкодія та числова стійкість, мінімальна кількість обчислень. Ці вимоги пояснюються обмеженим ресурсом відповідної цифрової техніки щодо швидкодії та обсягу пам'яті.

Відтак, актуальним є завдання розробки методів та моделей, які давали би змогу за мінімальної кількості обчислень забезпечити високу швидкодію розрахунку та точність отриманих результатів. Одним з таких методів може бути запропонований в роботі [1] метод середньокрокових напруг для математичного моделювання електротехнічних систем.

### Завдання дослідження

Завданням дослідження є перевірка та обґрунтування застосування нового методу середньокрокових напруг для реалізації на базі мікроконтролерів цифрових динамічних моделей реального часу елементів електромеханічних систем, які можуть бути представлені з'єднанням динамічних ланок різного виду.

### Метод середньокрокових напруг. Загальні принципи

Цей метод ґрунтується на описі вітки електричного кола, до якої прикладено напругу  $u$ , та яка містить ЕРС, конденсатор, індуктивність і активний опір, рівнянням вигляду:

$$\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (u + e - u_R - u_C - u_L) dt = U + E - U_R - U_C - U_L = 0. \quad (1)$$

У рівнянні (1) малими літерами позначено миттєві значення напруг на елементах електричного кола та ЕРС, а великими – їх середні на кроці чисельного інтегрування значення (середньокрокові).

З застосуванням розкладу змінних у ряд Тейлора, в роботі [1] отримано таке рівняння електричної вітки:

$$\begin{aligned} & U + E - u_{R0} - u_{C0} + \\ & + \left( \frac{R}{m+1} + \frac{\Delta t}{C} \cdot \frac{2 - (m+1)(m+2)}{2(m+1)(m+2)} + \frac{L_0}{\Delta t} \right) i_0 - \\ & - \sum_{k=1}^{m-1} \left( \frac{R \Delta t^k}{(k+1)!} \cdot \frac{m-k}{m+1} + \frac{\Delta t^{k+1}}{C(k+2)!} \cdot \frac{(m+1)(m+2) - (k+1)(k+2)}{(m+1)(m+2)} \right) \frac{d^{(k)} i_0}{dt^{(k)}} - \\ & - \left( \frac{R}{m+1} + \frac{\Delta t}{C(m+1)(m+2)} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) i_1 = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $i$  – струм вітки,  $C$  – ємність конденсатора,  $L$  – індуктивність,  $R$  – активний опір,  $m$  – порядок полінома, яким апроксимується струм на кроці чисельного інтегрування, індекси 0 та 1 позначають значення змінних на початку та в кінці кроку  $\Delta t$ .

З рівняння (1) можна отримати рекурентні вирази для знаходження струму вітки  $i_1$  в кінці кроку чисельного інтегрування з застосуванням різних порядків полінома, який апроксимує цей струм, за відомими початковими умовами ( $i_0$ ,  $u_{C0}$ ,  $u_{R0}$ ), параметрами вітки, середньокроковими значеннями прикладеної напруги ( $U$ ) та ЕРС ( $E$ ). Наприклад, з допущенням, що струм вітки на кроці чисельного інтегрування змінюється лінійно (метод першого порядку), отримуємо рівняння:

$$U + E - u_{R0} - u_{C0} + \left( \frac{R}{2} - \frac{\Delta t}{3C} + \frac{L_0}{\Delta t} \right) i_0 - \left( \frac{R}{2} + \frac{\Delta t}{6C} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) i_1 = 0. \quad (3)$$

Метод першого порядку є привабливим для реалізації цифрових моделей на базі мікроконтролерів з огляду на простоту отриманих виразів та мінімальну порівняно з методом вищого порядку кількість обчислень.

### Побудова динамічної моделі на прикладі двигуна постійного струму

Рівняння (3) можна застосувати для створення моделей різних типів електричних віток, які математично описуються різними динамічними ланками, наприклад: RL-вітка – аперіодичною

ланкою, L-вітка – інтегратором тощо. Причому входами ланок будуть напруги, прикладені до віток, а виходами – струми віток. Створені таким чином моделі динамічних ланок можна застосувати для опису об'єктів різної природи.

Розглянемо приклад побудови цифрової моделі двигуна постійного струму незалежного збудження. Математична модель якірного кола як RL-ланки згідно з виразом (3) матиме вигляд:

$$U + E - R_a i_0 + R_a \left( \frac{1}{2} + \frac{T_a}{\Delta t} \right) i_0 - R_a \left( \frac{1}{2} + \frac{T_a}{\Delta t} \right) i_1 = 0, \quad (4)$$

де:  $R_a$ ,  $T_a$  – активний опір та стала часу якірного кола,  $E$  – середньокрокова ЕРС якоря,  $U$  – середньокрокова напруга живлення якоря.

Рівняння механічної рівноваги

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{m_e - m_c}{J}, \quad (5)$$

де  $m_e$  – електромагнітний момент двигуна,  $m_c$  – зовнішній момент на валу.

Проінтегрувавши рівняння (5) в межах кроку чисельного інтегрування, отримаємо

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{1}{J} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} m_e dt - \frac{1}{J} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} m_c dt. \quad (6)$$

З допущенням, що електромагнітний момент двигуна при постійному магнітному потоці є прямо пропорційним струму якоря  $m_e = c i$  та змінюється на кроці лінійно, а момент навантаження на кроці є незмінним, отримаємо

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta t}{2J} (m_{e0} + m_{e1}) - \frac{\Delta t}{J} m_c. \quad (7)$$

Рівняння (7) можна переписати в такій формі:

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta t}{J} (M_e - M_c), \quad (8)$$

де  $M_e = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} m_e dt = \frac{m_{e0} + m_{e1}}{2}$  – середнє на кроці значення електромагнітного моменту

(середньокроковий момент),  $M_c$  – середнє на кроці значення моменту навантаження.

Рівняння (8) є рівнянням інтегратора, де входом є середньокроковий динамічний момент  $M_e - M_c$ , виходом – швидкість, а в якості сталої інтегрування виступає сумарний момент інерції механічної частини. Це рівняння може бути отримане безпосередньо з рівняння (3) для вітки з індуктивністю заміною прикладеної до вітки напруги  $U$  на середньокроковий динамічний момент, струму на швидкість, а індуктивності на момент інерції.

Середньокрокове значення ЕРС якоря двигуна  $E$  визначимо як:

$$E = -c \left( \omega_0 + \frac{\Delta \omega}{2} \right) = -c \omega_0 - \frac{c^2 \Delta t}{4J} i_0 - \frac{c^2 \Delta t}{4J} i_1 + \frac{c \Delta t}{2J} M_c \quad (9)$$

Підставивши рівняння (9) в рівняння (4) та провівши необхідні перетворення, отримаємо вираз для обчислення струму якоря двигуна:

$$i_1 = \frac{\frac{U - c \omega_0}{R_a} - i_0 \left( 0.5 + \frac{c^2 \Delta t}{4J R_a} - \frac{T_a}{\Delta t} \right) + \frac{c \Delta t}{2J R_a} M_c}{0.5 + \frac{c^2 \Delta t}{4J R_a} + \frac{T_a}{\Delta t}}, \quad m_{e1} = \frac{c \frac{U - c \omega_0}{R_a} - m_{e0} \left( 0.5 + \frac{c^2 \Delta t}{4J R_a} - \frac{T_a}{\Delta t} \right) + \frac{c^2 \Delta t}{2J R_a} M_c}{0.5 + \frac{c^2 \Delta t}{4J R_a} + \frac{T_a}{\Delta t}} \quad (10)$$

Рівняння (10) та (7) є цифровою моделлю двигуна постійного струму з незалежним збудженням і постійним магнітним потоком.

Для перевірки ефективності запропонованої динамічної моделі порівняємо результати моделювання режиму запуску двигуна при номінальній напрузі і навантаженні з результатами,

отриманими застосуванням відомих методів Ейлера, Рунге-Кутта другого порядку та Адамса третього порядку. Ці методи вибрано з огляду на притаманну їм малу кількість обчислень на кроці чисельного інтегрування, що важливо з огляду реалізації моделей на мікроконтролерах.

Параметри ДПС НЗ, які використовувалися під час розрахунків: потужність 9 кВт; напруга двигуна 230 В; струм 46 А; частота обертання 2300 об/хв.; конструктивна стала двигуна 0,903; опір якірного кола 0,27 Ом; електромагнітна стала часу 0,023 с; момент інерції 0,1 кг·м<sup>2</sup>; номінальний момент 41,538 Н·м.

У випадку розрахунку з малими кроками чисельного інтегрування (на порядок менші за електромагнітну сталу часу) всі методи дають практично однаковий результат, який можна прийняти за ешелонний.

На рис. 1 показані результати розрахунку струму якоря і кутової швидкості з кроком, що дорівнює значенню електромагнітної (найменшої) сталої часу  $T_a$ . Середнє значення похибок розрахунку за час перехідного процесу зведено в таблицю. Метод Ейлера в цьому є непрацездатним (нестійким).

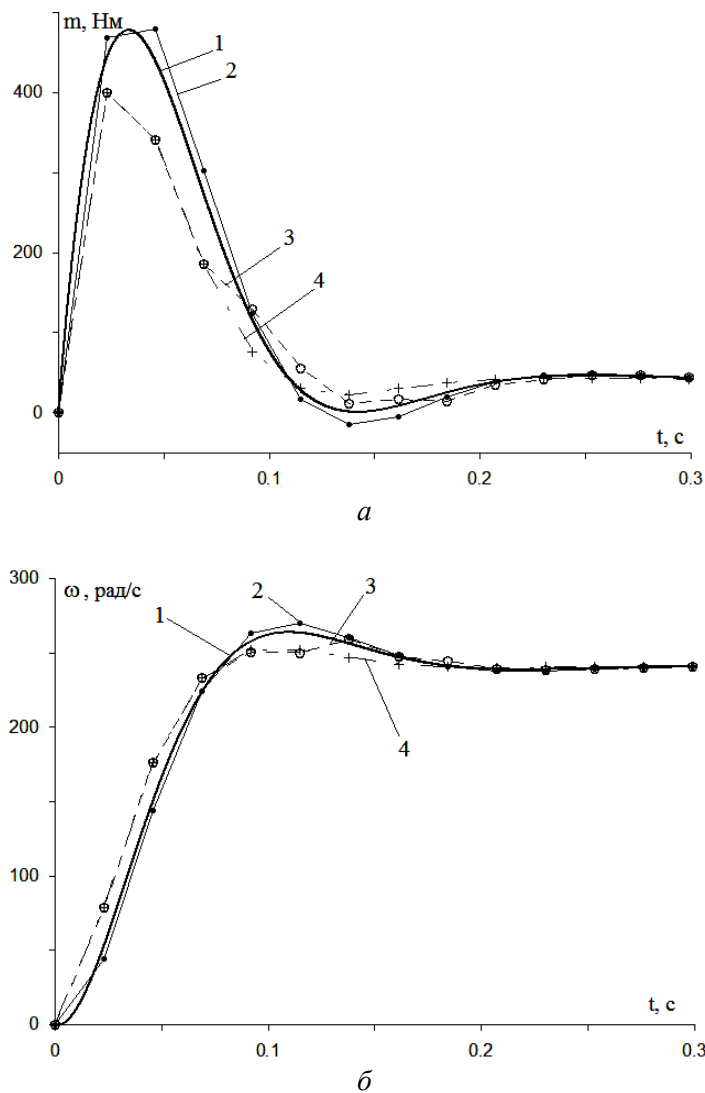


Рис. 3. Електромагнітний момент (а) і кутова швидкість (б) ДПС НЗ розраховані з кроком числового інтегрування 0,023 с (що дорівнює  $T_a$ ):

1 – еталонний розв'язок, 2 – методом середньокрокових напруг першого порядку, 3 – для методу Адамса третього порядку, 4 – для методу Рунге-Кутта другого порядку

Отримані результати доводять, що методи Рунге-Кутта другого порядку і Адамса третього порядку при такому кроці числового інтегрування є працездатними (стійкими), але дають значну

похибку під час розрахунку струму якоря. Крім цього, слід зауважити, що метод Адамса вимагає інформації з попередніх кроків, які на початку розрахунку відсутні (тому перші три точки, в цьому випадку, розраховано методом Рунге-Кутта). Відмінності між результатами, отриманими методом середньокрокових напруг другого порядку та еталонними, можна вважати допустимими.

### Середні значення похибок розрахунку режиму запуску двигуна, в %

Змінна	Середньокрокових напруг	Рунге-Кутта 2-го пор.	Адамса 3-го пор.
Електромагн. момент	13	27,5	36
Швидкість	3,25	13,2	13,7

При кроці інтегрування 0,046 с ( $2T_{\alpha}$ ) методи Рунге-Кутта другого порядку і Адамса четвертого порядку втрачають працездатність, а метод середньокрокових напруг другого порядку продовжує працювати з середнім значенням відносно похибки впродовж перехідного процесу 25 % при розрахунку струму якоря і 11 % при розрахунку швидкості. Однак, при таких значних кроках чисельного інтегрування втрачається інформація про миттєві значення змінних впродовж перехідного процесу.

З метою дослідження швидкодії обраних методів, проведено розрахунок з кроком чисельного інтегрування  $\Delta t = 2,3 \times 10^{-6}$  с. За результатами чисельного експерименту найбільшу швидкодію має метод середньокрокових напруг (час розрахунку 2,5 с), а в методах Рунге-Кутта другого порядку і Адамса третього порядку час виконання алгоритму становить відповідно 2,9 і 3,5 с.

### Реалізація цифрової моделі на мікроконтролері

Розроблена модель двигуна постійного струму була реалізована на мікроконтролері AVR Atmega128. Апаратно-програмна реалізація моделі дозволяє верифікувати результати отримані вище програмним способом та оцінити швидкодію окремих частин програмного коду. Робота таймерів та периферійних засобів зв'язку [2] чітко стандартизована та прив'язана до тактової частоти мікроконтролера. Тому отримані результати моделювання із внесеними поправками на час передачі інформації дають чітке уявлення про швидкодію запропонованих алгоритмів розрахунку. В запропонованому варіанті імітатора застосовано сучасний 8-бітовий КМОН-мікроконтролер Atmega1281, продуктивністю близько 8 MIPS при тактовій частоті 8 МГц. Серед його характеристик слід виділити:

- Ø 128Кб Flash-пам'яті;
- Ø 32 восьмирозрядних робочих реєстри загального призначення, а також реєстри керування вбудованими пристроями;
- Ø апаратний пристрій множення;
- Ø 4 таймери-лічильники: 2x8 та 2x16 розрядних;
- Ø 2 канали програмованого послідовного інтерфейсу USART;
- Ø 8 каналний 10 розрядний АЦП;
- Ø таймер реального часу з окремим генератором.

Функціональна схема апаратно-програмного модуля побудованого на базі мікроконтролера Atmega1281 зображена на рис. 2.

Команда на початок моделювання отримується з ПК і результати обчислення передаються для реєстрації на ПЕОМ. Мікроконтролер пов'язаний з комп'ютером через послідовний інтерфейс UART через модуль узгодження з інтерфейсом USB, який дозволяє використовувати розроблений комплекс без власного блока живлення. Мікроконтролер працює на тактовій частоті 7,3728 МГц, що дозволяє встановити швидкість передачі 115200 біт/с без часових спотворень. Програма для мікроконтролера створена у середовищі *CodeVisionAVR*. Для визначення часу виконання програмного коду використано вбудований таймер/лічильник мікроконтролера TC1.

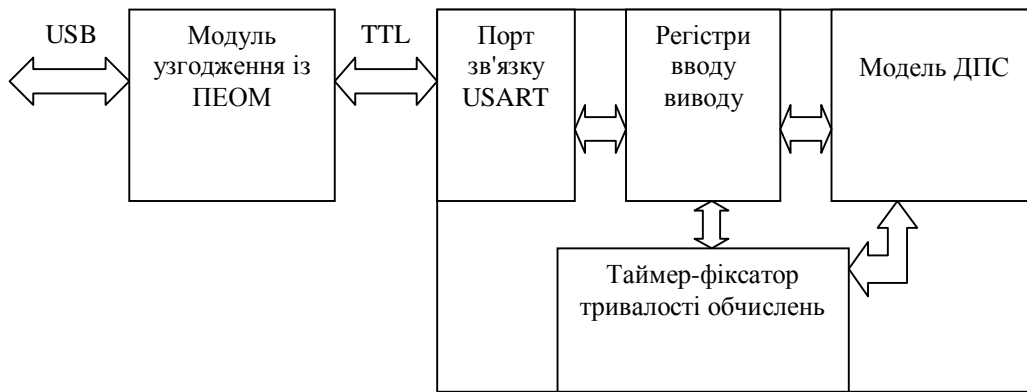


Рис. 2. Функціональна схема апаратно-програмного модуля

Виконання алгоритму розпочинається в момент отримання з ПК стартових умов. Після його завершення і отримання всіх результатів за масивом отриманих ПЕОМ з мікроконтролера даних побудовано графіки перехідного процесу пуску двигуна постійного струму з незалежним збудженням (рис. 3). Пунктирними лініями показано залежності, отримані на ПЕОМ. Суцільною лінією показані дані, які одержані при моделюванні за аналогічним алгоритмом та кроком на мікроконтролері. Незначна похибка, яка спостерігається, пояснюється тим, що результат, отриманий з мікроконтролера, заокруглено до двох знаків після коми, а результати отримані на ПЕОМ, – до шести знаків.

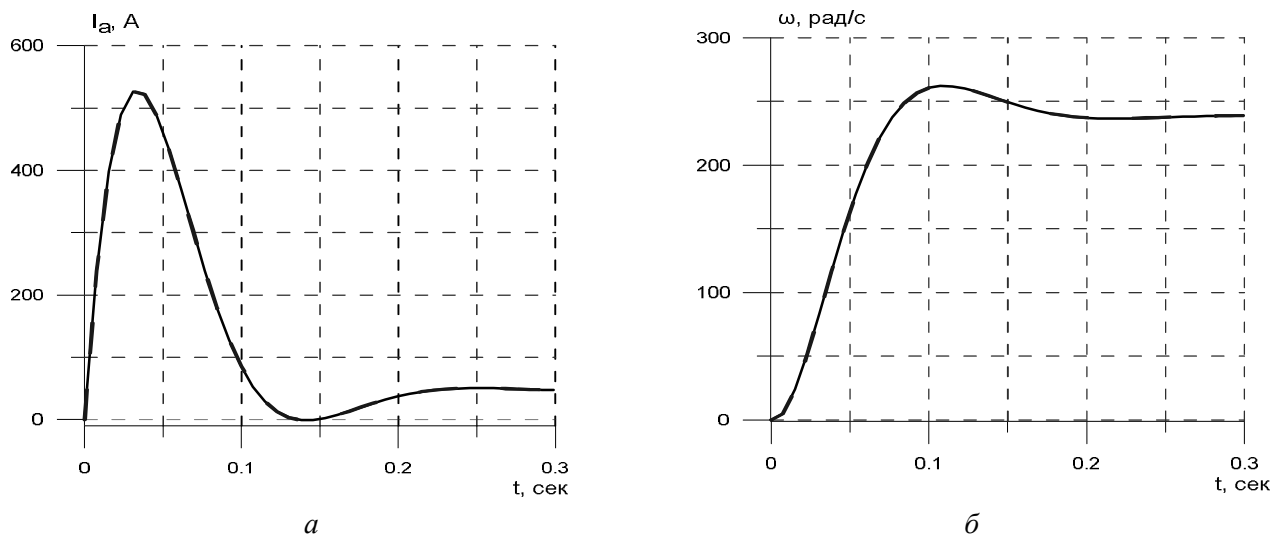


Рис. 5. Струм якоря (а) та кутова швидкість (б) ДПС НЗ отримані при кроці числового інтегрування 0,00064, що відповідає умові роботи в реальному часі

На виконання одного циклу затрачено 1392 тактових імпульсів, що відповідає часу 0,64 мс, і він є сталим. Час, одержаний в програмному стимуляторі *CodeVisionAVR*, не відповідає реальному часу, отриманому з мікроконтролера, що доводить ефективність застосування апаратного методу вимірювання швидкодії алгоритму. Отже, модель можна прив'язати до реального часу, використавши як одиницю вимірювання час виконання одного циклу, а сам цикл синхронізувати із алгоритмами вводу-виводу. Точність результатів отриманих в апаратно-програмній моделі співвимірні із програмною реалізацією на сучасній ЕОМ.

### Висновки

Для синтезу сучасних цифрових систем керування необхідними є цифрові динамічні моделі з високою швидкістю, мінімальною кількістю обчислень та високою числовою стійкістю. Для

створення таких моделей доцільним є застосування методу середньокрокових напруг, який на відміну від широкоживаних методів Рунге-Кутта та Адамса (зі співмірною кількістю обчислень на кроці) забезпечує прийнятну точність розрахунку при великих значеннях кроку чисельного інтегрування, зокрема такому, що дорівнює найменшій сталій часу.

Результати експериментальних досліджень підтверджують доцільність використання зазначеного методу для реалізації динамічних цифрових моделей на базі мікроконтролерів, які широко використовують в сучасних цифрових системах керування. Зокрема, для прикладу реалізації динамічної моделі двигуна постійного струму з незалежним збудженням результати розрахунку на мікроконтролері за точністю не поступаються результатам моделювання на ПЕОМ, а її швидкодія достатня для забезпечення роботи в реальному масштабі часу.

1. Плахтина О.Г. Числовий однокроковий метод аналізу електричних кіл і його застосування в задачах електромеханіки / О.Г. Плахтина // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 30. – С. 223–225. 2. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. – 2-е изд., переработанное и дополненное./ Сост. Шпак Ю.А. – К.: «МК-Пресс», СПб.: «КОРОНА-ВЕК», 2011. – 544 с. 3. ATMEL device datasheet. ATmega128. – ATMEL Inc, 2011. – 379 s.

УДК 551.594.21:62:781

І.В. Ліщак, Т.В. Бінкевич

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕСМ

## СУЧАСНИЙ ГРОЗОЗАХИСТ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 6, 10 КВ ДОВГО-ІСКРОВИМИ РОЗРЯДНИКАМИ (РДІ)

© Ліщак І.В., Бінкевич Т.В., 2012

**Розглянуто проблеми грозозахисту розподільчих повітряних ліній 6, 10 кВ та проведено аналіз захисту таких ліній довго-іскровими розрядниками .**

**Ключові слова:** Грозозахист, довго-іскровий розрядник, лінія електропередавання із захищеними проводами, ОПН.

**The problem of lightning protection of distribution routes 6.10 kV and the analysis of the protection of such lines of long-spark gap.**

**Key words:** Lightning protection, long-spark gap, the transmission line with protected cables, surge arrester non-linear.

### Актуальність та аналіз проблеми грозозахисту

Аналіз досвіду експлуатації розподільчих електричних мереж показує, що їх надійність нижча, ніж у мереж вищих класів напруги. Пошкодження в розподільних мережах становлять значну частину збитків, пов'язаних з перервами в електропостачанні споживачів.

Однією з основних причин аварій та пошкоджень повітряних ліній електропередавання (ПЛ) таких класів напруги є грозові перенапруги, що спричиняють імпульсні перекриття та руйнування ізоляторів, і супроводжуються дуговими замиканнями, із відповідним пошкодженням обладнання та відімкненням ліній.

Аварійні відімкнення ПЛ 6, 10 кВ через грозові перенапруги становлять до 40% від загальної кількості їх відімкнень. Через низьку імпульсну міцність, ізоляція розподільних мереж схильна до перекриття як від перенапруг під час прямих розрядів блискавки, так і від індукованих перенапруг при розрядах блискавки поблизу лінії. Останні є основною причиною грозових вимкнень і