

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОГО ПО ШВИДКОДІЇ УПРАВЛІННЯ ШАГОВИМ ДВИГУНОМ ПРИВОДУ ОБЕРТАННЯ CD-ROM

Введення

Одним з ефективних і перспективних приводів мікромашин і приладів, які вимагають підвищеної точності позиціонування, є шаговий двигун (ШД). У сучасних системах автоматичного управління для забезпечення гарантованого переміщення ротора шагового двигуна на один крок використовуються управляючі імпульси із збільшеною тривалістю, або спеціальні режими роботи. Наприклад, використання мікрокрокового режиму роботи шагового двигуна дозволяє плавно переміщати ротор на один крок, при цьому час руху збільшується в порівнянні з повнокроковим режимом.

Проте від ШД часто потрібна висока швидкодія (приводи лазерних і електромагнітних виконавчих пристроїв). Гранична ж швидкість обертання ШД визначається максимальною частотою управляючих імпульсів. З теорії оптимального управління відомо, що одноімпульсне управління з обмеженням по величині дії може забезпечити граничне по швидкодії позиціонування тільки для об'єктів першого порядку. Проте і дослідження ШД, і аналіз математичних моделей (ММ) показує, що їх порядок для ШД як об'єкту управління (ОУ) не нижче третього, а його перехідні процеси (ПП) характеризуються коливальністю і значними перерегулюваннями. Ця обставина не дозволяє використовувати ШД на граничній швидкодії, оскільки при виборі граничної частоти управляючих імпульсів доводиться резервувати тривалість останніх з урахуванням часу загасання ПП.

Відомо, що гранична швидкодія ОУ при обмеженій управляючій дії досягається на послідовності імпульсів змінного знаку і тривалості, але при граничній амплітуді. Тому представляє інтерес завдання побудови управляючого генератора, який виробляє серії модульованих за часом і амплітуді імпульсів та забезпечує граничну швидкодію ПП на одному кроці повороту ротора ШД. Цей результат дозволить підвищити граничну швидкість його обертання.

У статті пропонується варіант вибору форми і тривалості управляючих імпульсів, які забезпечують якнайкращу швидкодію, на основі математичної моделі шагового двигуна та при обмеженій амплітуді управляючих імпульсів.

Математична модель шагового двигуна і його параметри

У загальному випадку кроковий двигун може бути описаний за допомогою моделі електричної машини з двома обмотками на статорі і однією обмоткою на роторі (рис. 1).

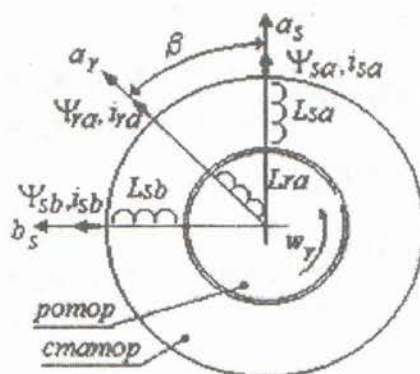


Рис. 1. Еквівалентна модель ШД.

Рівняння математичної моделі такої електричної машини можуть бути записані у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{L_{sa}}(u_{sa} - r_{sa} \cdot i_{sa} - Kr(*)) \cdot M \cdot \cos(\beta) + M \cdot i_{ra} \cdot \sin(\beta) \cdot \omega_r \\ \frac{di_{sb}}{dt} = \frac{1}{L_{sb}}(u_{sb} - r_{sb} \cdot i_{sb} - Kr(*)) \cdot M \cdot \sin(\beta) - M \cdot i_{ra} \cdot \cos(\beta) \cdot \omega_r \\ \frac{di_{ra}}{dt} = Kr(*) \\ \frac{d\beta}{dt} = \omega_r \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{j}(M_e - M_c - k \cdot \omega_r) \end{array} \right. \quad (1)$$

де: i_{sa}, i_{sb}, i_{ra} - струми в обмотках статора і ротора; u_{sa}, u_{sb}, u_{ra} - напруга на обмотках; r_{sa}, r_{sb}, r_{ra} - активний опір обмоток; $L_{sa}, L_{sb}, L_{ra} = L_{r0} + L_{rl} - \cos(4-j8)$ - індуктивність обмоток; M - взаємна індуктивність; β - кутове положення ротору; ω_r - кутова швидкість; M_c - момент опіру; M_e - електромагнітний момент; J - момент інерції ротору; p - число пар полюсів.

У моделі (1) використовується наступне позначення:

$$Kr(*) = (L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot (L_{r0} + L_{rl} - 2 \cdot L_{rl} \cdot \sin^2(2 \cdot \beta)) - M^2 \cdot L_{sa} + M^2 \cdot \cos^2(\beta) \cdot L_{sa} \cdot L_{sb})^{-1} \times \\ \times [L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot (u_{ra} - r_{ra} \cdot i_{ra}) + 4 \cdot L_{rl} \cdot \omega_r \cdot i_{ra} \cdot L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot \sin(4 \cdot \beta) + M \cdot \sin(\beta) \cdot L_{sa} \cdot (r_{sb} \cdot i_{sb} - u_{sb}) + \\ + 0.5 \cdot M^2 \cdot \sin(2 \cdot \beta) \cdot i_{ra} \cdot \omega_r \cdot (L_{sa} - L_{sb}) + M \cdot L_{sa} \cdot L_{sb} \cdot \omega_r \cdot (i_{sa} - \sin(\beta) - i_{sb} \cdot \cos(\beta)) + \\ M \cdot \cos(\beta) \cdot L_{sb} \cdot (r_{sa} \cdot i_{sa} - u_{sa})]$$

Електромагнітний момент визначається рівнянням:

$$M_e = i_{ra} \cdot (M \cdot i_{sb} \cdot \cos(\beta) - M \cdot i_{sa} \cdot \sin(\beta) - 2 \cdot i_{ra} \cdot L_{rl} \cdot \sin(4 \cdot \beta)). \quad (2)$$

Напруга U_{sa}, U_{sb} на обмотках статора шагового двигуна, як правило, формується за допомогою спеціальної електронної системи управління, вихідні каскади якої будуються по мостовій або напівмостовій схемам. Використання електронних схем відбивається на перехідних процесах в шаговому двигуні. Тому в моделі (1) для кожної обмотки шагового двигуна необхідно враховувати умови (3) (умови приведені для однієї обмотки, оскільки для другої - аналогічні):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{якщо } ga(t) = 1 \text{ то } u_{sa} = U; r_{sa} = r + 2 \cdot R_{ON}; \\ \text{якщо } (ga(t) = 0) \& (ga(t-h) = 1) \text{ то } \begin{cases} \text{якщо } i_{sa} \geq 0 \text{ то } u_{sa} = -(E + 2 \cdot U_D); r_{sa} = r + 2R_{ON} \\ \text{якщо } i_{sa} \leq 0 \text{ то } u_{sa} = 0; r_{sa} = R_{OFF} \end{cases} \\ \text{якщо } ga(t) = -1 \text{ то } u_{sa} = -U; r_{sa} = r + 2 \cdot R_{ON}; \\ \text{якщо } (g(t) = 0) \& (ga(t-h) = -1) \text{ то } \begin{cases} \text{якщо } i_{sa} \leq 0 \text{ то } u_{sa} = E + 2 \cdot U_D; r_{sa} = r + 2R_{ON} \\ \text{якщо } i_{sa} \geq 0 \text{ то } u_{sa} = 0; r_{sa} = R_{OFF} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3)$$

У співвідношеннях (3) прийняті наступні позначення: $ga(t)$ - завдання для формувача імпульсів ($ga(t) = 1$ - на обмотці позитивний імпульс струму або напруги; $ga(t) = 0$ - обмотка знеструмлена; $ga(t) = -1$ - на обмотці негативний імпульс струму або напруги); h - крок інтеграції при вирішенні рівнянь моделі (1); U - напруга джерела електроживлення; U_D -

пряме падіння напруги на діоді; $R_{ON} \leq R_{OFF}$ - опір відкритого і закритого транзисторного ключа (при цьому вважається, що час перемикання транзисторів і діодів значно менше в порівнянні з тривалістю управляючих імпульсів).

Математична модель складається з рівнянь (1), (2) і умов (3) для кожної обмотки статора. Управляючими є сигнали: $ga(t)$, $gb(t)$. Основним вихідним сигналом є кутове положення ротора β , яке має ряд стійких положень, віддалених один від одного на один крок. Початок відліку кута β співпадає з віссю статора.

В результаті проведених досліджень математичної моделі (1) - (3) роботи шагового двигуна M55SP-1P з кроком 0,75 градусів (рис. 2) було знайдено параметри моделі, із значеннями яких модель досить добре описує роботу шагового двигуна:

$$L_{sa} = 25.5 \text{ мГн}; L_{sb} = L_{sa}; L_{r0} = 17.3 \text{ мГн}; L_{r1} = L_{r0} \cdot 0.5; r_{ra} = 70 \text{ Ом.}$$

$$R_{on} = 7 \text{ Ом}; R_{off} = 4 \cdot 10^3 \text{ Ом}; M = L_{sa} \cdot 0.5; J = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_c = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}; k = 8.9 \cdot 10^{-5}; E = 10 \text{ В}; U_D = 1 \text{ В};$$

При дослідженні як моделі, так і роботи шагового двигуна використовувався критерій оцінки адекватності математичної моделі:

$$Qe = k \cdot \int_{Tc}^{Te} (\bar{\beta}(t) - \beta(t))^2 \cdot dt \quad (4)$$

де $k = 10000$ ваговий коефіцієнт; $\bar{\beta}(t)$ - розрахунковий по моделі рух ротора; $\beta(t)$ - переміщення, отримане експериментально; Ts і Te - початок і кінець відрізка часу, на якому оцінюється збіг перехідних процесів.

Постановка завдання дослідження

Необхідно для шагового двигуна, який описується моделлю (1)-(3), з приведеними вище параметрами знайти форму і тривалість управляючих імпульсів, які забезпечують переміщення ротора шагового двигуна на один крок за мінімальний час:

$$Tp: \forall t \in [0, \infty] \rightarrow Tp = \max t : \beta(t) / \beta_n \geq \delta \quad (5)$$

де Tp - час загасання перехідного процесу; t - час; $\beta(t)$ - кутове переміщення ротора; β_n - величина одного кроку; δ - допустима похибка управління.

Враховуючи розривність показника якості (4) в пошуковому завданні, необхідно використовувати допоміжну інтегральну оцінку вигляду (4) з ваговим коефіцієнтом $k = 1000$.

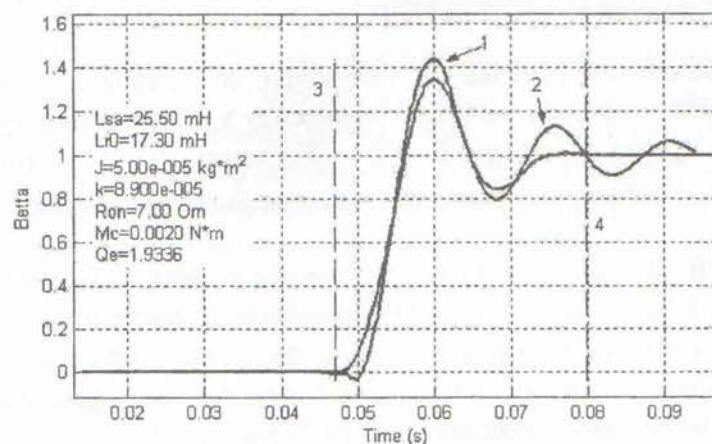


Рис. 2. Перехідні процеси у шаговому двигуні

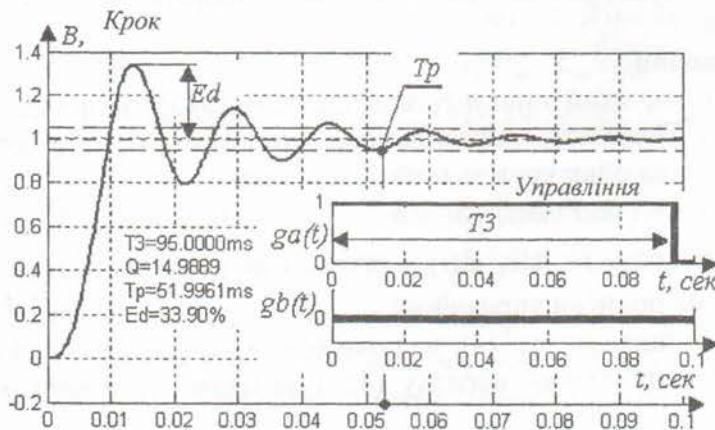
На рис. 2 використовуються наступні позначення: 1 - вимірне переміщення ротора; 2 - переміщення ротора, розраховане по моделі; 3 - початок запускаючого імпульсу і обчислення критерію (4); 4 - кінцевий час оцінки неспівпадання по критерію (4).

Експериментально-імітаційне дослідження каналів управління ШД

Аналітичне вирішення математичної моделі (1) - (3) не представляється можливим. Також сумнівна можливість аналітичної оптимізації її швидкодії. У зв'язку з цим доцільно спробувати вирішити задачу експериментально-пошуковими методами, спираючись на імітаційне дослідження моделі. При цьому превентивний результат для відшукування ефективної стартової крапки можна отримати звичайним підбором.

В рамках концепції обмеженого по амплітуді управління прямим пошуком на моделі (1) - (3) було знайдено декілька поєднань управляючих сигналів, які забезпечують рух ротора на один крок (рис.3 - 5). Для початкового нормованого положення для моделі $\beta = 0$ крок (для моделі $\beta = -\pi/2 \text{ рад.}$) позитивний імпульс напруги ($ga(t) = 1$) на фазі a_s (див. рис.1) обмотки статора вважатимемо такими, який «розгонить по ходу». Тоді негативний імпульс напруги ($gb(t) = -1$) на фазі b_s буде таким, який «розгоняє проти ходу», або, при дії позитивного імпульсу на фазі a_s ($ga(t) = 1$), «зупиняючим» імпульсом напруги. У загальному випадку дія імпульсу залежить від положення ротора і кутової характеристики двигуна, а також від полярності імпульсу, який подається на обмотку двигуна.

Для одного «розганяючого» імпульсу (при $ga(t) = 1$; $gb(t) = 0$), який подається на фазу a_s обмотки статора (див. рис.2), знайдений діапазон тривалості імпульсу 12мс. - 95мс. У ньому забезпечується загасання траєкторії зміни кутового положення ротора із зменшенням тривалості встановлення, перерегулювання і амплітуди затухаючих коливань. На рис.4 приведений вимірний перехідний процес, який підтверджує отримані на моделі результати.



Мал. 3. Розрахунковий рух ротора ШД.

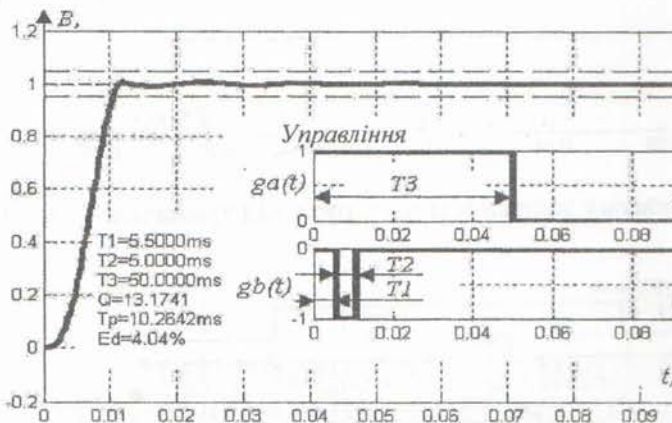
Проте одиночний управляючий імпульс не забезпечує ефективного досягнення межі позиціонування, тому що перша складова магнітного моменту з (2) дорівнює нулю (оскільки $i_{sb} \approx 0$), а друга $-M \cdot i_{sa} \cdot i_{ra} \cdot \sin \beta \rightarrow 0$ при $\beta \rightarrow 0$. У точці $\beta \rightarrow 0$ третя складова електромагнітного моменту (2) забезпечує утримання ротора біля полюсу статора і залежить від конструкції двигуна.

Інший варіант управління шаговим двигуном показаний на мал. 5. В цьому випадку на фазу a_s обмотки статора подається імпульс напруги, який «розгоняє», а на фазу b_s , через деякий час, – «зупиняючий» негативний імпульс напруги. Знайдена підбором така структура управління ШД забезпечує меншу амплітуду коливань і попадання графіка зміни кутового положення ротора в 5% межу регулювання за 10.3 мс, тобто значно швидше за «традиційний» одноімпульсний варіант.



Мал. 4. Вимірний рух ротора.

Тривалість управляючих імпульсів, а також момент подачі «зупиняючого» імпульсу впливають на перехідний процес в кроковому двигуні. Після ідентифікації параметрів математичної моделі за допомогою методу покоординатного спуску по критерію (5) були оцінені якнайкращі значення параметрів управляючих імпульсів. В результаті пошуку по математичній моделі був отриманий перехідний процес, зображений на мал.5. В ході пошуку в області екстремуму критерію (5) були побудовані залежності часу регулювання від параметрів управляючих імпульсів (див. мал. 6).



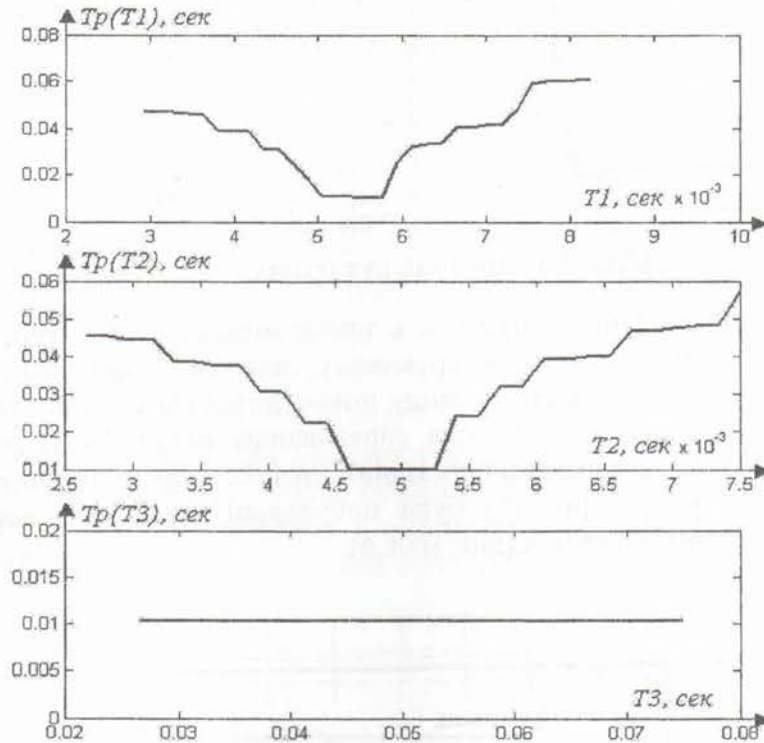
Мал. 5. Розрахунковий рух ротора ШД.

Проведені дослідження реального шагового двигуна M55SP-1P підтвердили результати розрахунків (мал.7). Отже, вдається за допомогою невеликого додаткового імпульсу забезпечити придушення коливань ротора і зменшити час T_r руху ротора на один крок в 3...5 разів в порівнянні з одноімпульсним управлінням. Незначні відмінності розрахункових і вимірних перехідних процесів пояснюються недостатньою точністю математичного опису (1)–(3) шагового двигуна і похибками вимірювань. Недостатня адекватність математичної моделі (1) викликана припущенням, що індуктивності обмоток статора не залежать від кутового положення ротора. Зроблене припущення дозволило спростити рівняння моделі (1), але при цьому втрачена деяка точність математичного опису.

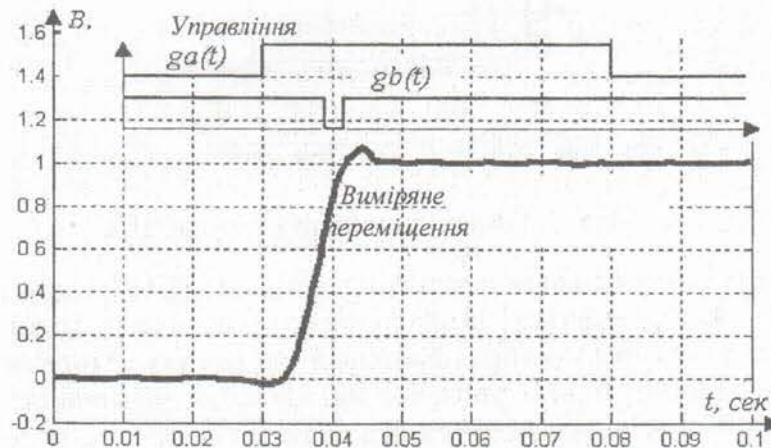
Аналітичні і експериментальні дослідження показали, що знайдене управління, форма імпульсів якого зображена на рис.5, забезпечує швидший перекид ротора на один крок в порівнянні з одноімпульсним управлінням. Залежність часу регулювання від параметрів управління має нерівний характер, з вузькою і яскраво вираженою областю екстремуму, що утрудняє застосування градієнтних методів вирішення екстремальних завдань. Вузькі межі області екстремуму обмежують запас області варіювання параметрів управляючих сигналів для яких не спостерігається істотного зниження швидкодії.

У зв'язку з цим управління двома імпульсами (рис. 5) критично до зміни як тривалості імпульсів (наприклад, із-за температури), так і навантаження.

Отже, при реалізації двофазного управління (див. рис. 5) необхідно мати в системі автоматичного регулювання інформацію про зміну механічного навантаження.



Мал. 6. Область екстремуму залежності часу руху від тривалості імпульсів.



Мал. 7. Вимірjане переміщення ротора при двофазному управлінні.

Висновок

Розглянуті два варіанти управління забезпечують рух ротора шагового двигуна на один крок. У разі одного «розгоняючого» імпульсу час руху Tr оцінюється в 50 мс (40 мс за даними вимірювань), при коливальному перехідному процесі. У разі використання «зупиняючого» імпульсу, вдається зменшити час руху 10...15 мс (рис. 5 і 7). Основна перевага першого варіанту управління заключається в простоті реалізації. Реалізація двофазного управління важке із-за необхідності отримувати інформацію про зміну механічного навантаження.

Список літератури

1. Редіко Л. Раз шаг, два шаг. // Схемотехніка. – 2001. – №6 – №11.
2. Довідник по теорії автоматичного управління. / під ред. А.А. Красовського. – М.: Наука, 1997.
3. Копилов І.П. Математичне моделювання електричних машин. – М.: Висш. шк., 2002.
4. Солоха А.А. Математическая модель шагового двигателя // – Кострома. – 2004. – Т.5.
5. Нейдорф р.А. Завдання квазіоптимальної швидкодії управління шаговим двигуном. // Математичні методи в техніці і технологіях: матеріали XVII междунар. научн. конф. – Казань. – 2005. – Т.2.
6. Нейман Л.Р. Демірчан К.С. Теоретичні основи електротехніки. – Л.: Енергія, 1987.
7. Пий Ан. Сполучення ПК із зовнішніми пристроями. – М.: ДМК Прес; Спб.: Пітер, 2004.
8. Растрьгин л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1984.

Досліджується можливість реалізації оптимального або квазіоптимального по швидкодії управління кроком ротора двигуна за рахунок спеціальної організації багатоканального генератора імпульсів. У статті розглядаються два варіанти управління шаговим двигуном, в одному з них оцінка ефективності проводиться по математичній моделі шагового двигуна, в другому за експериментальними даними.

Исследуется возможность реализации оптимального или квазиоптимального по быстродействию управления шагом ротора двигателя за счет специальной организации многоканального генератора импульсов. В статье рассматриваются два варианта управления шаговым двигателем, в одном из них оценка эффективности проводится по математической модели шагового двигателя, во втором по экспериментальным данным.

Marketability by the step of rotor of engine optimum or квазіоптимального on a fast-acting management is probed due to the special organization of multichannel pulser. Two variants of foot-pace engine management are examined in the article, in one of them the estimation of efficiency is conducted on the mathematical model of foot-pace engine, in the second from experimental data.

Рецензент: Єрохін В.Ф.
Надіслано 04.11.2010

УДК 21.973-018.2.я7

Кузнецов Г.В., Сушко С.О. (НГУ)

**МАТРИЦЯ ПЕРЕХІДНИХ ЙМОВІРНОСТЕЙ
ДЛЯ МОДЕЛІ УКРАЇНСЬКОГО ТЕКСТУ, ГЕНЕРОВАНОГО
СТАЦІОНАРНИМ ДЖЕРЕЛОМ МАРКОВСЬКІ ЗАЛЕЖНИХ БУКВ**

Імовірнісні моделі джерел відкритих повідомлень використовуються у криптографії безпосередньо в алгоритмах дешифрування, а також для розрізнення відкритого осмисленого тексту і випадкових послідовностей. Вибір підхідної моделі для опису джерела відкритого тексту, зазвичай, здійснюється криптоаналітиком залежно від властивостей конкретного шифру. Відкритий текст – це джерело випадкових послідовностей, а текст, породжений цим джерелом, – імовірнісний аналог мови.

Очевидно, що розробка подібних моделей потребує дослідження інформаційно-статистичних властивостей мовних об'єктів. Для багатьох мов такі роботи проводились вже давно, зокрема, англійську досліджував автор і класик теорії інформації К.Шеннон [1]. Радянський академік Піотровський Р.Г. із співробітниками одержали багато цікавих інформаційно-статистичних параметрів російської та інших мов колишнього СРСР [2 – 4]. Деякі дослідження статистичних властивостей української мови, проведені в Інституті мовознавства ім. О.О.Потебені НАН України, на жаль, були неповними через використання недостатньо широкого обсягу текстового матеріалу, часто зводились до порівняння різних стилів деяких письменників.