

УДК 550.838.08

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ КВАНТОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА  
«СТРУМ-ЧАСТОТА» З ІМПУЛЬСНИМ ЗБУДЖЕННЯМ**

П.В.Мокренко<sup>1</sup>, І.Т.Стрепко<sup>2</sup>

*Українська академія друкарства<sup>2</sup>*

*вул. Підголоско, 19, Львів, 79020, Україна*

*Національний університет Львівська політехніка,<sup>1</sup>*

*вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна*

*В роботі розглянуті питання моделювання квантового перетворювача «струм – частота» з імпульсним збудженням і наведені результати досліджень*

***Ключові слова:** квантовий перетворювач, електронний парамагнітний резонанс, умови збудження, перетворення «струм – частота», алгоритм, моделювання, стійкість*

**Постановка проблеми.** В [1-3] наведена математична модель Блоха, яка описує динаміку магнітних моментів атомів, на які діють зовнішні магнітні поля. При імпульсному (ударному) збудженні магнітних моментів атомів разом з постійним зовнішнім магнітним полем діє також імпульсне поле збудження. Без обмеження загальності приймемо, що вектор постійного магнітного поля  $H_{\text{пост.}}$  розміщений у площині XOZ під кутом  $\alpha=45^\circ$  ортогональної системи координат. Імпульсне поле збудження  $H_1(t)$  можна спрямувати як по осі x, так і по осі y. Таким чином компоненти постійного зовнішнього магнітного поля  $H_{\text{ox}}$  і  $H_{\text{oz}}$  рівні між собою, тобто  $H_{\text{ox}}=H_{\text{oz}}=H_0$ . Якщо поле збудження  $H_1(t)$  напрямлене по осі x, то воно накладається на поле  $H_{\text{ox}}$ . Компоненти зовнішнього магнітного поля з врахуванням поля збудження дорівнюють відповідно

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H_{\text{ox}} + H_1(t) = H_0 + H_1(t) \\ H_y &= 0; \quad H_z = H_{\text{oz}} = H_0 \\ H_{\text{пост.}} &= \sqrt{2} * H_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

і рівняння, що описують динаміку магнітних моментів атомів, у випадку орієнтації поля збудження по осі x, мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_x &= -\frac{M_x}{S_2} + \gamma H_0 M_y + \frac{M_{x0}}{S_2}, \\ \dot{M}_y &= -\frac{M_y}{S_2} - \gamma H_0 M_x + \gamma [H_0 + H_1(t)] M_z, \\ \dot{M}_z &= -\frac{M_z}{S_1} - \gamma [H_0 + H_1(t)] M_y + \frac{M_{z0}}{S_1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Якщо ж поле збудження напрямлене по осі y, то  $H_y=H_1(t)$ ;  $H_x=H_z=H_0$ , і система рівнянь набирає вигляду

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_x &= -\frac{M_x}{S_2} + \gamma H_0 M_y - \gamma H_1(t) M_z + \frac{M_{x_0}}{S_2}, \\ \dot{M}_y &= -\frac{M_y}{S_2} - \gamma H_0 M_x + \gamma H_0 M_z + \frac{M_{y_0}}{S_2}, \\ \dot{M}_z &= -\frac{M_z}{S_1} - \gamma H_0 M_y + \gamma H_1(t) M_x + \frac{M_{z_0}}{S_1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Вводячи безрозмірні параметри  $\omega_0 = \gamma H_0$ ;

$$\xi_1 = \frac{1}{\omega_0 S_1}; \quad \xi_2 = \frac{1}{\omega_0 S_2}; \quad \delta = \frac{H_1(t)}{H_0}; \quad \tau = \omega_0 t, \quad (4)$$

системи рівнянь (2) і (3) зведемо до вигляду

$$\frac{d\tilde{m}}{d\tau} = A(\tau)\tilde{m} + \tilde{a}(\tau), \quad (5)$$

де  $\tilde{m}$  - вектор відносних магнітних моментів, що містить три компоненти ( $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ );  $\tau$  - відносний час;  $A(\tau) = A$  - матриця порядку  $3 \times 3$ ;  $\tilde{a}(\tau) = a$  - вектор-стовпець.

Елементи матриці  $A(\tau)$  і  $a(\tau)$  залежать від способу збудження (по осі  $x$  чи по осі  $y$ ), а також від параметрів збуджуючих імпульсів. Таким чином, для системи (3.2)

$$A = \begin{vmatrix} -\xi_2 & 1 & 0 \\ -1 & -\xi_2 & 1 + \delta \\ 0 & -(1 + \delta) & -\xi_1 \end{vmatrix}; \quad \tilde{a} = \begin{vmatrix} (1 + \delta)\xi_2 \\ 0 \\ \xi_1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Для системи (3)

$$A = \begin{vmatrix} -\xi_2 & 1 & \delta \\ -1 & -\xi_2 & 1 \\ \delta & -1 & -\xi_1 \end{vmatrix}; \quad \tilde{a} = \begin{vmatrix} \xi_2 \\ \delta\xi_2 \\ \xi_1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

а

$$\tilde{m} = \frac{1}{M_{z_0}} \begin{vmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{vmatrix}. \quad (8)$$

В обох випадках збудження датчика частота Лармора  $\omega_L$  визначається співвідношенням  $\omega_L = \sqrt{2} * \omega_0 = \gamma * H_{\text{пост}}$ .

Враховуючи, що в нашому випадку  $H_0 = \text{const}$ , параметри  $\xi_1$  і  $\xi_2$ , що характеризують комірки поглинання, є постійні, а параметр  $\delta$  змінюється зі зміною поля  $H_1(t)$ , то при імпульсному характері зміни цього поля маємо

$$H_1(t) = \begin{cases} H_1, & 0 \leq \tau \leq \tau_u, \\ 0, & \tau > \tau_u, \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} \frac{H_1}{H_0}, & 0 \leq \tau \leq \tau_u, \\ 0, & \tau > \tau_u, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\tau = \omega_0 \tau_u$  - відносна тривалість збуджуючих імпульсів;  
 $\tau_u$  - тривалість збуджуючих імпульсів.

При прямокутній формі збуджуючих імпульсів, що легко реалізується на практиці, матриці  $A(\tau)$  і  $a(\tau)$  у рівнянні (3.5) є кусково-постійними. Позначаючи  $A_0 = [A]_{\delta=0}$  і  $a_0 = [a]_{\delta=0}$ , одержимо рівняння, які описують динаміку магнітних моментів атомів залежно від часового інтервалу

$$\left. \begin{aligned} \dot{\tilde{m}} &= A\tilde{m} + \tilde{a}, & (0 \leq \tau \leq \tau_u) \\ \dot{\tilde{m}} &= A_0\tilde{m} + \tilde{a}_0, & (T > \tau > \tau_u) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де  $T$  - відносний період повторення збуджуючих імпульсів.

**Мета роботи.** Метою моделювання є визначення умов отримання максимальної амплітуди встановлених коливань магнітних моментів атомів робочої речовини. Результати, отримані в процесі моделювання, повинні дати відповідь на такі запитання:

1. Які оптимальні умови фазування сигналу зворотного зв'язку?
2. Який компонент магнітного поля -  $m_x$ ,  $m_y$  або  $m_z$  забезпечує максимальний рівень вихідного сигналу ?
3. Яка орієнтація поля імпульсного збудження приводить до максимального вихідного сигналу ?
4. Яка тривалість перехідних процесів у перетворювачі «струм- частота» ?
5. Яка оптимальна тривалість імпульсу збудження ?

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо об'єкт моделювання - перетворювач «струм-частота» з імпульсним збудженням.

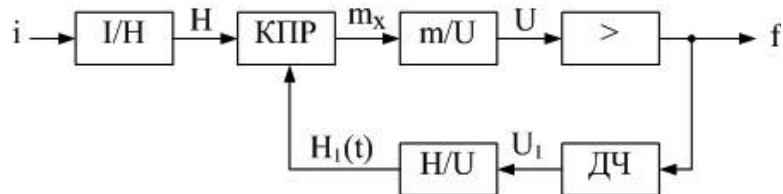


Рис. 1. Функціональна схема перетворювача «струм - частота»

Моделювання проводилось згідно рис.1 з використанням рівнянь математичної моделі (6÷10).

Вхідний перетворювач  $I/N$  призначений для перетворення вхідного струму  $i$  в напруженість магнітного поля  $H$  і в нашому випадку виконаний на основі

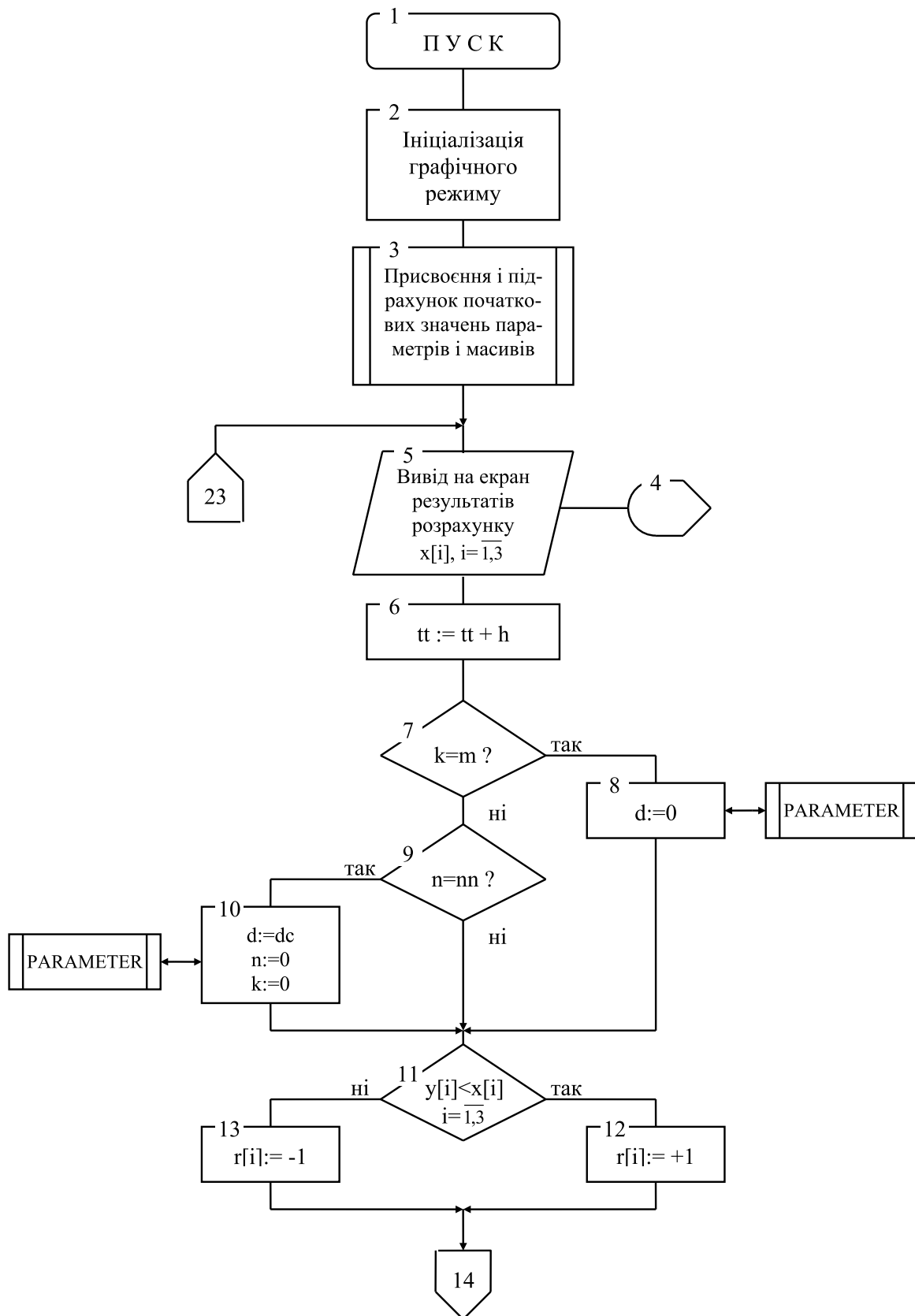
кілець Гельмгольца. Перетворення  $m/u$  здійснюється на основі оптичного детектування ЕПР. В цьому перетворювачі світловий промінь, який проходить через робочу речовину, фокусується на фотодіоді, де створюється напруга, форма якої являє собою затухаючі синусоїдальні коливання. Ці коливання подаються на вхід підсилювача, з виходу якого знімається сигнал, частота якого є вхідним параметром всього перетворювача «струм - частота». Цей самий сигнал подається в ланку зворотного зв'язку, яка містить дільник частоти і перетворювач «напруга - напруженість магнітного поля». На виході подільника частоти формується послідовність імпульсів напруги, період повторення яких в  $N$ -разів більший періоду вихідних коливань. На вході перетворювача  $u/H$  ці імпульси перетворюються в імпульси напруженості магнітного поля  $H_1(t)$ , здійснюючи ударне збудження квантового парамагнітного резонатора.

Початкові умови моделювання такі. В момент подачі першого імпульсу приймалися нульовими, тобто допускалося, що компоненти магнітних моментів  $m_x, m_y, m_z$  дорівнюють нулю. Коефіцієнт ділення частоти збуджуючих імпульсів у моделі прийнято 100. Порівняння результатів моделювання проводилося для шести випадків, залежно від способу подачі імпульсу збудження, а саме:

- 1) у момент додатного (знизу вверх) переходу компоненти  $m_x$  через нуль;
- 2) у момент від'ємного переходу  $m_x$  через нуль;
- 3) у момент додатного переходу  $m_y$  через нуль;
- 4) у момент від'ємного переходу  $m_y$  через нуль;
- 5) у момент додатного переходу  $m_z$  через нуль;
- 6) у момент від'ємного переходу  $m_z$  через нуль.

У процесі моделювання визначалися значення амплітуд коливань  $m_x, m_y, m_z$ . Графіки коливань виводилися на екран монітора та роздруковувалися на принтері. Блок-схема алгоритму зображена на рис. 2, та приведено лістинг програми розрахунку.

Спочатку розглядався випадок орієнтації поля збудження  $H_1(t)$  по осі  $X$ .



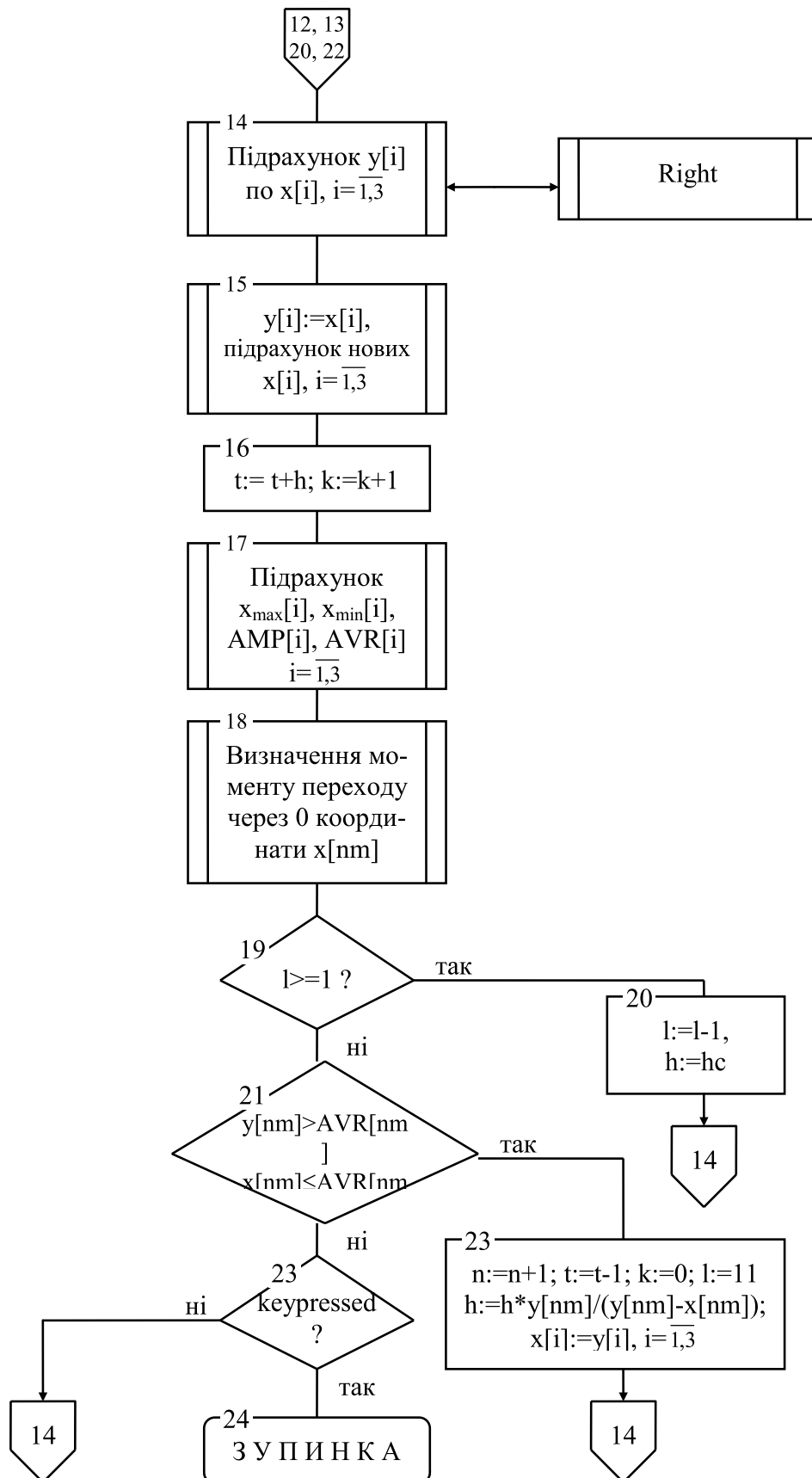


Рис. 2. Блок-схема алгоритму моделювання квантового перетворювача

```

Program impulse;
  uses crt,graph;
  label 1;
  const pi=3.1415926; gam=350000;
  var gd,gm,i,j,k,l,m,n,mm,nn,nm:integer;
  d,dc,h0,h1,t,tt,h,hc,w0,s1,s2,ksi1,ksi2:real;
  r:array[1..3] of integer;
  xmax,xmin,amp,avr,x,y,q:array[1..3] of real;
  kr:array[1..4] of real; p:array[1..3,1..3] of real;
  a:array[1..3,0..4] of real;
  procedure parameter;
begin
  p[2,3]:= 1+d;p[3,2]:= -p[2,3];
  q[1]:= d*ksi2;q[2]:=d;
end;
  procedure right;
  var s,i:integer;
begin i:=1;
  repeat
    a[i,j]:= 0; for s:=1 to 3 do a[i,j]:= a[i,j]+p[i,s]*y[s];
    a[i,j]:= a[i,j] + q[i]; i:= i+1;
  until i>3
end;
begin  gd:=0;gm:=0;initgraph(gd,gm,'c:\tp\bgi');
  nn:=100; h0:=0.5; h1:=0.1; mm:=64; m:=4; nm:=3;
  kr[1]:=0;kr[2]:=0.5; kr[3]:=0.5; kr[4]:=1;
  t:=0; tt:=0; x[1]:=0; x[2]:=0; x[3]:=0; l:=1;
  hc:=sqrt(2)*pi/mm; s1:=0.01; s2:=0.002; w0:=2*pi*gam*h0;
  ksi1:=1/(w0*s1); ksi2:=1/(w0*s2);
  p[1,1]:=-ksi2; p[1,2]:= 1; p[1,3]:=0; p[2,1]:=-1;
  p[2,2]:=-ksi2;
  p[3,1]:=0; p[3,3]:=-ksi1; q[3]:=0; n:=nn;
  dc:=h1/h0; d:=dc; h:=hc;
  for i:=1 to 3 do begin
    xmin[i]:=0; xmax[i]:=0; amp[i]:=0; avr[i]:=0
  end;
repeat
  { if ((n=nn-1)or(n=0) then}
  begin
    putpixel(round(t/(hc*200)),100-round(x[1]*200),15);
    putpixel(round(t/(hc*200)),250-round(x[2]*200),15);
    putpixel(round(t/(hc*200)),100,15);
    putpixel(round(t/(hc*200)),250,15);
    putpixel(round(t/(hc*200)),400,15);
    {writeln('xmin[1]=',xmin[1],' ',xmax[1]=',xmax[1],' ');}
    {write('avr[1]=',avr[1]);}
    tt:=tt+h;
  end;
  if k=m then begin d:=0; parameter end else
  if n=nn then begin d:=dc; parameter; n:=0; k:=0 end;
  for i:=1 to 3 do if y[i]<x[i] then r[i]:=1 else r[i]:=-1;
1: for j:=1 to 4 do

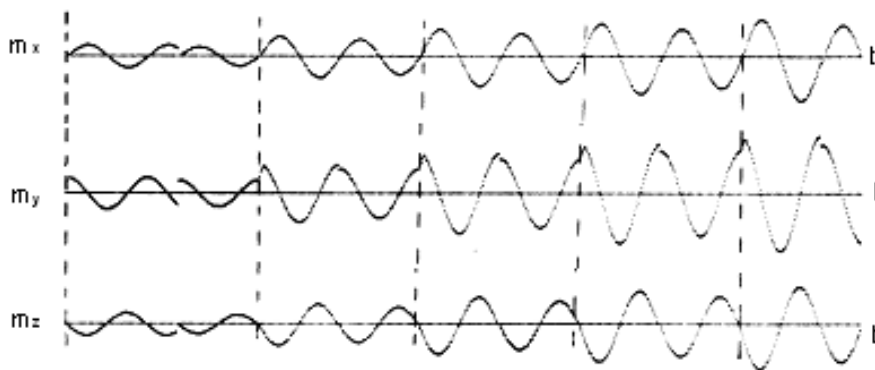
```

```

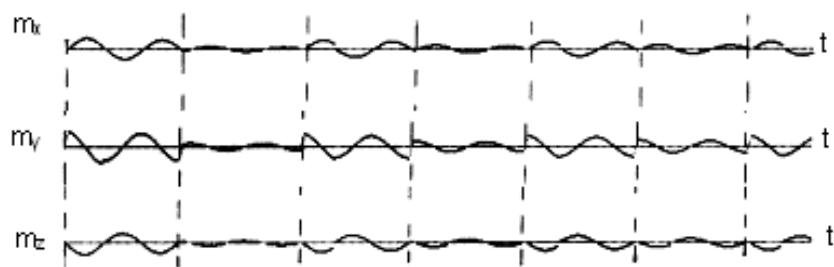
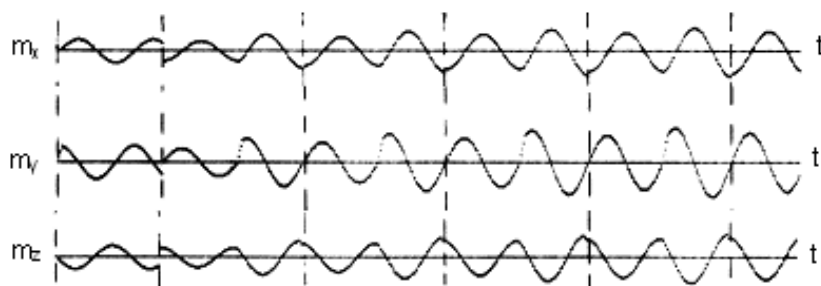
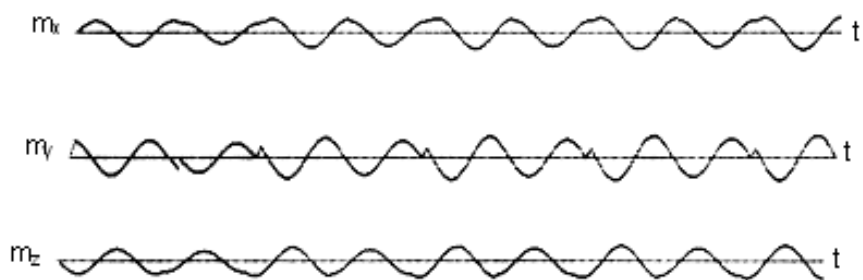
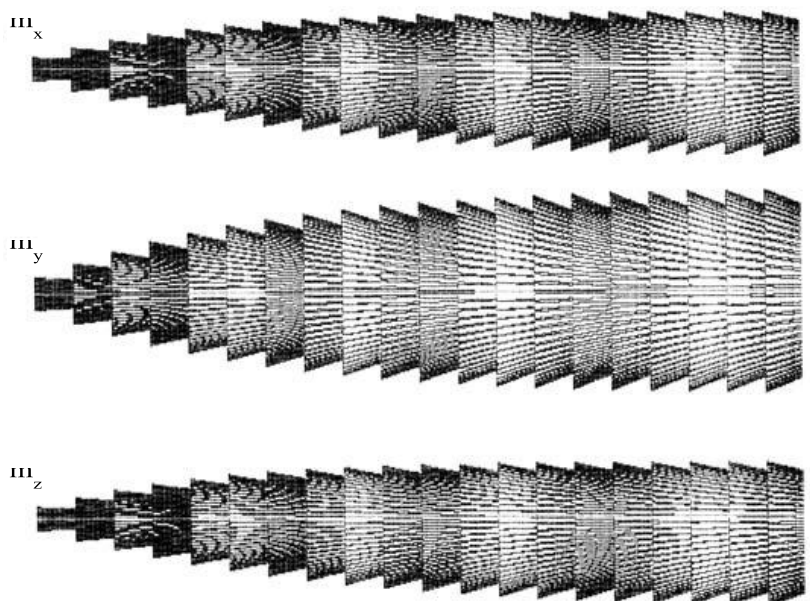
begin
  for i:=1 to 3 do y[i]:=x[i]+kr[i]*h*a[i,j-1];
  right
end;
  for i:=1 to 3 do
begin
  y[i]:=x[i];
  x[i]:=x[i]+h*(a[i,1]+2*a[i,2]+2*a[i,3]+a[i,4])/6
end;
  t:=t+h; k:=k+1;
  for i:=1 to 3 do
begin
  if (r[i]=1) and (y[i]>=x[i]) then
  begin
  xmax[i]:=y[i]; if xmax[i]<>0 then
  begin
  amp[i]:=(xmax[i]-xmin[i])/2;
  avr[i]:=(xmax[i]+xmin[i])/2;
  end
  end;
  if (r[i]=-1) and (y[i]<=x[i]) then
  begin
  amp[i]:=(xmax[i]-xmin[i])/2;
  avr[i]:=(xmax[i]+xmin[i])/2;
  end
  end
  end;
  if l>=1 then begin h:=hc; l:=l-1 end else
  if (y[nm]>avr[nm]) and (x[nm]<=avr[nm]) then
  begin
  for i:=1 to 3 do x[i]:=y[i]; l:=l+1;goto 1
  end
  until keypressed
end.

```

Рис. 3. Лістинг програми моделювання перетворювача.

Рис. 4. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі



Рис. 5. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часіРис. 6. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часіРис. 7. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часіРис. 8. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі

На рис. 4 наведені графіки залежностей  $m_x$ ,  $m_y$  і  $m_z$  у часі, причому у всіх трьох компонентах виводиться перший період коливань після дії імпульсу збудження та останній період коливань - перед черговим імпульсом збудження (проміжні періоди коливань на графіках не виводяться). Вертикальні лінії на рис.4 показують початок імпульсу збудження. З рисунку видно, що амплітуда коливань від імпульсу до імпульсу зростає, поступово спадаючи у проміжках між імпульсами. Аналогічна картина відображена на рис. 5, проте, на відміну від рис. 4, де імпульси збудження подавалися в момент додатного переходу  $m_x$  (від'ємного переходу  $m_z$ ) через нуль, імпульси збудження на рис. 5 подавалися в моменти від'ємного переходу  $m_x$  (додатного переходу  $m_z$ ) через нуль. При цьому спостерігаються розриви фази коливань в момент подачі імпульсу збудження. Амплітуда коливань не зростає, як в першому випадку, а змінюється в обмежено малому діапазоні. Порівняння цих двох випадків дозволяє зробити висновок про те, що імпульси збудження необхідно подавати в момент додатного переходу  $m_x$  (від'ємного переходу  $m_z$ ) через нуль.

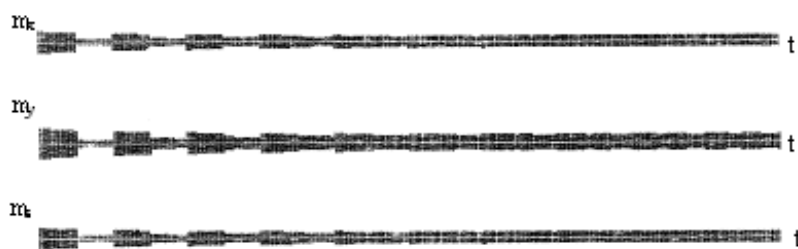


Рис. 9. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі

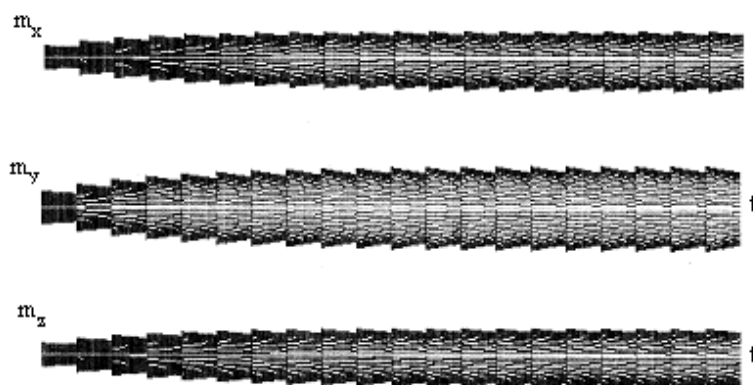


Рис.10. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі

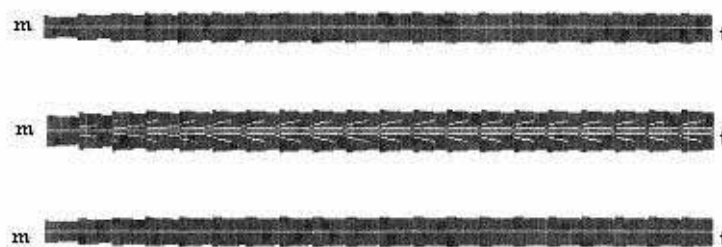
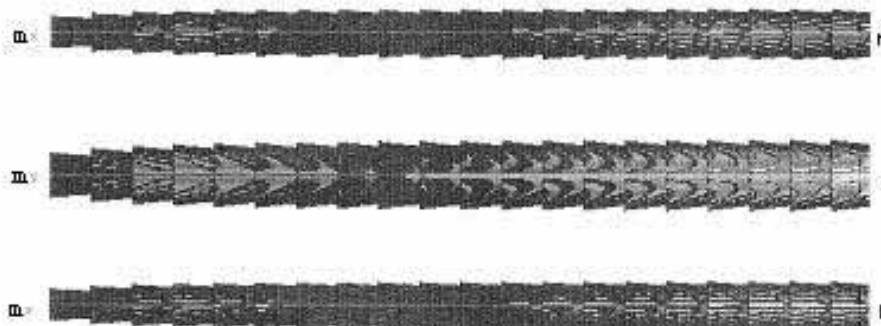
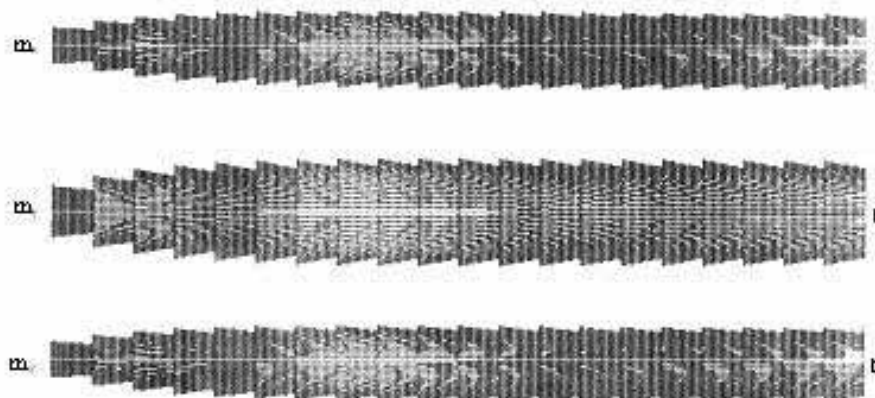
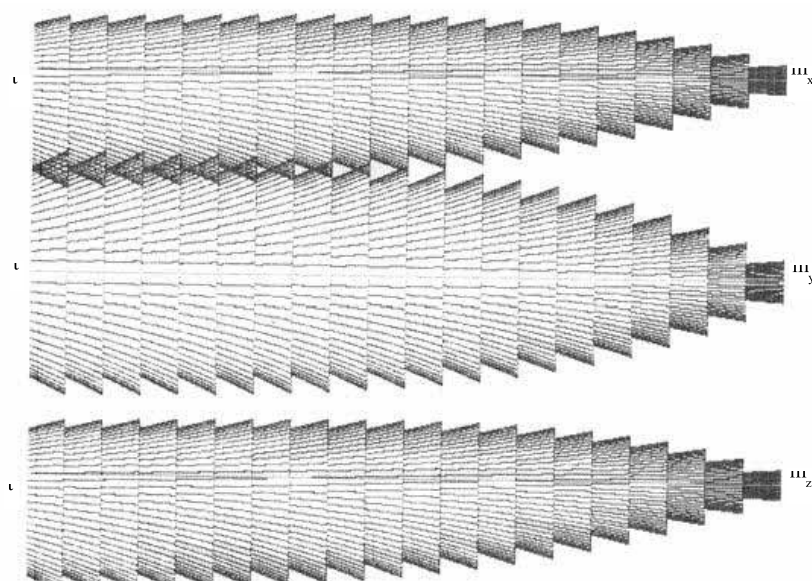
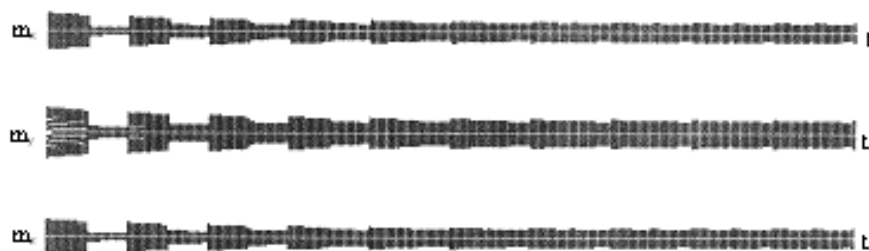
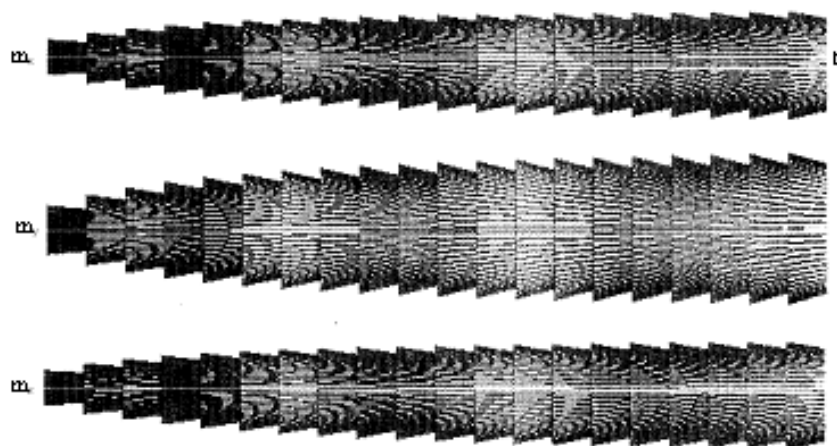


Рис. 11. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі

Рис. 12. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часіРис. 13. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часіРис. 14. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі

Рис. 15. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часіРис. 16. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі.

На рис. 6 і 7 наведені графіки компонент  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  при подачі імпульсу збудження в момент додатного і від'ємного переходу  $m_y$  через нуль. Порівняння наведених результатів дозволяє зробити висновок про те, що найбільш сприятливим моментом подачі збуджуючого імпульсу є момент додатного переходу  $m_y$  через нуль.

Порівнюючи два розглянуті випадки (рис. 4 і рис. 6), можна стверджувати, що найбільш сприятливим моментом часу для подачі імпульсу збудження у спін-систему є момент додатного переходу  $m_x$  (від'ємного переходу  $m_z$ ) через нуль.

Зроблені висновки справедливі і для рис. 7÷10, які аналогічні відповідно рис. 4÷7, але в іншому часовому масштабі. Це означає, що на рис. 8÷11 показані всі періоди коливань компонент  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$ , а не тільки перший і останній періоди коливань між імпульсами збудження, як це показано на рис. 4÷7.

Зменшення масштабу часу (рис. 8÷11) дає можливість оцінити відносний час перехідного процесу за кількістю імпульсів збудження. За умови найбільш сприятливого вибору моменту часу подачі імпульсу збудження перехідний процес триває 18-19 періодів частоти збудження для конкретних параметрів комірки поглинання ( $S_1=0.01\text{с}$ ,  $S_2=0.002\text{с}$ ). Для комірок з більшими сталими часу тривалість перехідного процесу збільшується.

Аналогічні модельні експерименти були проведені при орієнтації поля збудження  $H_1(t)$  по осі Y.

На рис. 12÷15 наведені графіки залежностей магнітних моментів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  від часу. На інтервалі спостереження діяло 20 імпульсів збудження. Всі умови експерименту,- параметри комірок, масштаби побудови графіків та інше - залишалися без змін.

На рис. 12 показані залежності  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  від часу при подачі імпульсів збудження в момент додатного переходу  $m_x$  через середнє значення. Відповідно графіки, одержані при подачі імпульсу збудження в момент від'ємного переходу  $m_x$  через середнє значення, наведені на рис. 13.

На рис. 14÷15 показані залежності  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  при подачі імпульсів збудження в моменти додатного та від'ємного переходів  $m_y$  через середнє значення відповідно.

На рис. 16÷17 показані ці ж залежності, відповідно в моменти додатного та від'ємного переходів  $m_z$  через середнє значення.

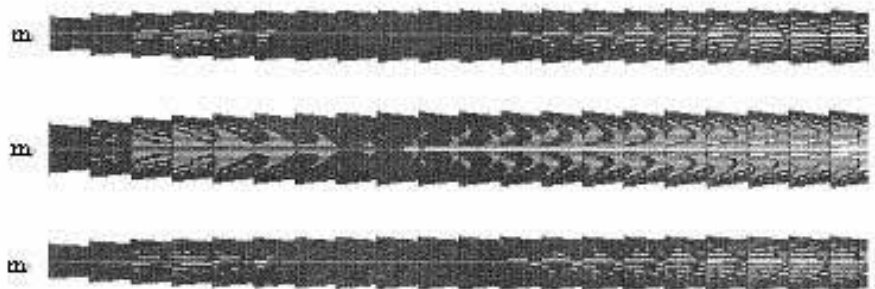


Рис. 17. Графіки зміни амплітуд сигналів  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  у часі

Аналізуючи одержані результати моделювання, доходимо висновку, що найбільша амплітуда коливань компонентів магнітного поля досягається при орієнтації поля збудження по осі Y і дії імпульсів збудження в моменти додатних переходів  $m_y$  через середнє значення або через нуль (тому що середнє значення компоненти  $m_y$  дорівнює нулю).

На блок-схемі програми та лістингу ідентифікатори параметрів такі:

pp - кількість переходів між імпульсами збудження;

mm - кількість кроків за період;

m - кількість кроків в імпульсі збудження;

nm - номер компоненти вектора  $x$  [1..3], за яким визначається момент подачі імпульсу збудження;

h0 - напруженість постійного магнітного поля;

h1 - напруженість магнітного поля збудження;

kr [1..4] - коефіцієнт Рунге;

t - час;

tt - час дії передостаннього періоду та періоду після початку імпульсу збудження;

x [1..3] - вектор нормованих магнітних моментів;

l - кількість кроків, протягом яких не відбувається перевірка переходу через нуль відповідно (з номером nm) компоненти вектора  $x[i]$ ;

$h_c$  - постійне значення кроку інтегрування;  
 $h$  - крок інтегрування;  
 $n$  - номер періоду;  
 $d_c$  -  $h_1/h_0$ ;  
 $d = d_c$  або  $0$  залежно від того, діє імпульс збудження чи ні;  
 $r [1..3]$  - вектор значень;  
 $X_{\min} [1..3]$  - вектор мінімальних значень;  
 $X_{\max} [1..3]$  - вектор максимальних значень;  
 $avr [1..3]$  - вектор середніх значень;  
 $amp [1..3]$  - вектор амплітудних значень;  
 $p [1..3, 1..3]$  - масив елементів матриці  $P$ ;  
 $a [1..3, 0..4]$  - масив правих частин рівнянь Блоха при значеннях аргументів, які визначаються методом Рунге-Кутта.

Програма `impulse` містить у собі дві процедури - `parameter` і `right`. Останні призначені для підрахунку елементів масивів  $p [1..3, 1..3]$ ,  $a [1..3, 0..4]$  і  $q [1], q [2]$ , а значення  $q [3] = 0$  задається в блоці 3.

**Висновки.** На основі дослідження запропонованої моделі квантового перетворювача з ударним збудженням встановлені основні його метрологічні властивості і умови стійкості, зокрема:

- одержані вирази для частотної похибки перетворювача при ударному збудженні імпульсами малої тривалості і рівняння  $T$ -перетворення, розв'язок якого дозволяє визначити усталений режим роботи КПСЧ залежно від амплітуди, тривалості імпульсів збудження, періоду їх повторення, величини зовнішнього магнітного поля і параметрів камери поглинання;
- виведені необхідні і достатні умови стійкості КПСЧ, які дозволяють стверджувати, що системи з розглянутими типорозмірами комірок датчиків практично стійкі у всьому діапазоні зміни величин  $\delta$ ,  $\tau_c$ , якщо імпульси збудження формуються через інтервал часу, кратний цілому числу періодів сигналу прецесії;
- для забезпечення похибки перетворення КПСЧ в межах  $\pm 0.001\%$  необхідно виконувати умову  $C \geq C_{\min}$ , де  $C$  - коефіцієнт перетворення перетворювача «струм-напруженість магнітного поля», а  $C_{\min} = (H_{\text{пост.}})_{\min} / i_{\min}$ ;
- найбільш сприятливими умовами збудження магнітних моментів речовини в комірці поглинання є орієнтація поля збудження по осі  $Y$  і подача імпульсів збудження в момент додатного переходу компоненти  $m_y$  через нуль.

### Список використаних джерел

1. Bloch F. Nuclear Induction.-Phys/ Rev., 1946. №70, 460-474 p.
2. Мокренко П.В. Квантові вимірювальні перетворювачі постійного струму.- Львів: Арал, 1999.-187 с.
3. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии.- М.: Наука, 1972.- 448с.

4. Пестов Е.Н., Мокренко П.В. Исследование стабильности квантового преобразователя для прецизионного измерения постоянного тока.- Квантовая электроника. – М.: Сов. радио, 1975, т.2. №10, – С. 2183-2188.
5. Пестов Е.Н., Мокренко П.В. Прецизионный квантовый преобразователь тока в частоту, использующий оптическую ориентацию атомов. – Приборы и системы управления, 1978, № 9 – С. 26 – 28.
6. Мокренко П.В. Дослідження стійкості квантового давача з імпульсним збудження. //Вісник Державного університету «Львівська політехніка» №324 «Автоматика, вимірювання та керування»,- Львів, ДУ «ЛП»,1998.- С. 138-142.

### References

1. Bloch F. (1946). Nuclear Induction.-Phys/ Rev., №70, 460-474 p. (in English)
2. Mokrenko P.V. (1999). Kvantovi vymiryuvalni peretvoryuvachi postyynoho strumu.- L'viv: Aral, 187 s. (in Ukrainian)
3. Pomerancev N.M., Ryzhkov V.M., Skrockij G.V. (1972). Fizicheskie osnovy kvantovoj magnitometrii.- M.: Nauka, 448s. (in Russian)
4. Pestov E.N., Mokrenko P.V. (1975). Issledovanie stabil'nosti kvantovogo preobrazovatelja dlja precizionnogo izmerenija postojannogo toka.- Kvantovaja jelektronika. – M.: Sov. radio, t.2. №10, S. 2183-2188. (in Russian)
5. Pestov E.N., Mokrenko P.V. (1978). Precizionnyj kvantovyj preobrazovatel' toka v chastotu, ispol'zujushhij opticheskiju orientaciju atomov. – Pribory i sistemy upravlenija, №9 S. 26 – 28. (in Russian)
6. Mokrenko P.V. (1998). Doslidzhennya stiykosti kvantovoho davacha z impul'snym zbudzhennya. //Visnyk Derzhavnoho univrsytetu «L'vivs'ka politekhnika» #324 «Avtomatyka, vymiryuvannya ta keruvannya»,- L'viv: DU «LP», - S. 138-142. (in Ukrainian)

## RESEARCH OF A MODEL OF QUANTUM CONVERTER «CURRENTS – FREQUENCY» WITH IMPULSE EXCITATION

*P.V.Mokrenko<sup>1</sup>, I.T.Strepko<sup>2</sup>*

*Lviv Polytechnic National University<sup>1</sup>  
12, Stepan Bandera St., Lviv, 79000, Ukraine*

*Ukrainian Academy of Printing<sup>2</sup>  
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine  
Strepko-uad@ukr.net*

*The article considers the problem of modeling of a quantum converter “current - frequency” with impulse excitation and the results of the research have been presented.*

**Keywords:** *quantum converter, electronic paramagnetic resonance, excitation conditions, conversion “current – frequency”, algorithm, simulation, stability*

*Стаття надійшла до редакції 15.03.2016.  
Received 15.03.2016.*