

ŚLAWOMIR PARTYGA
Energo pomiar Gliwice

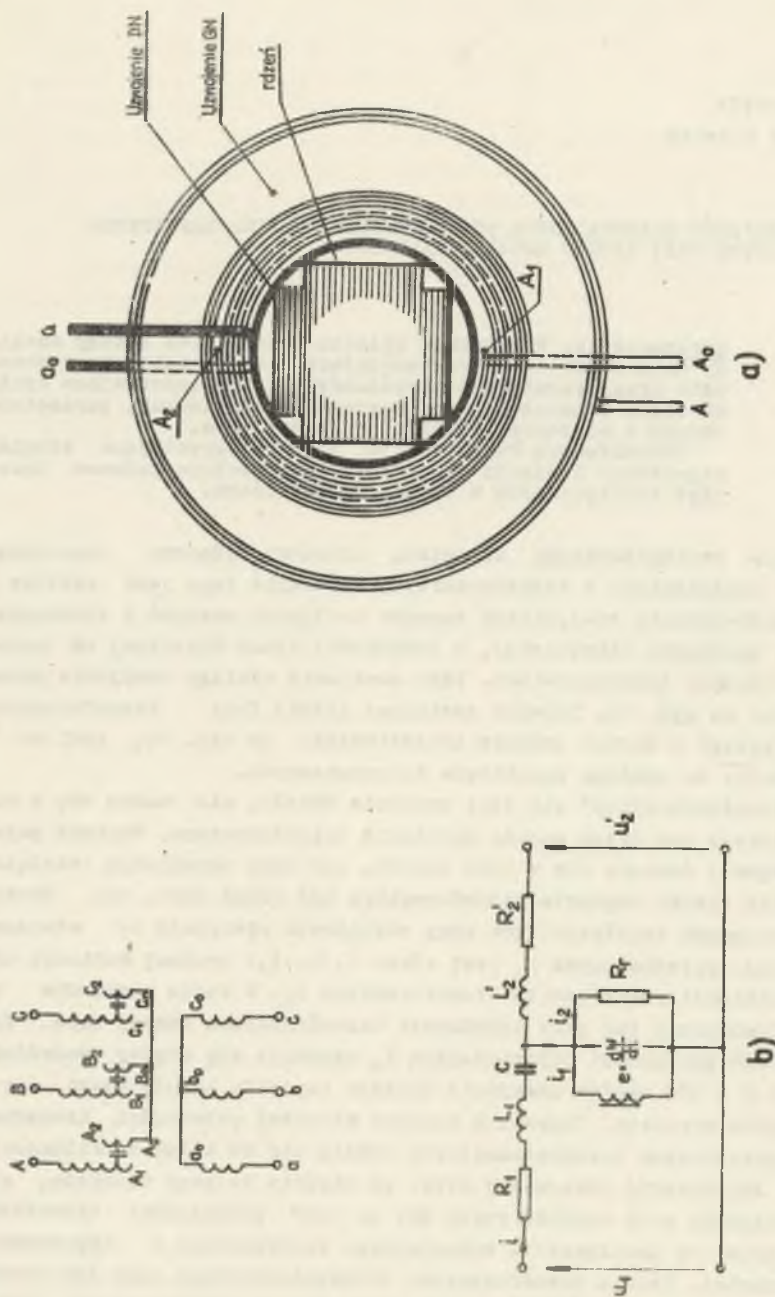
ANALIZA PRZEBIEGÓW NIEUSTALONYCH TRANSFORMATORA BEZIMPEDANCYJNEGO
W STANIE JAŁOWYM PRZY UŻYCIU MASZYNY ANALOGOWEJ

Streszczenie. W artykule opisano zastosowane metody analizy oraz równania charakteryzujące stan nieustalony w obwodzie transformatora bezimpedancyjnego. Przedstawiono wyniki badań w zależności od warunków początkowych, parametrów obwodu i nasycenia rdzenia transformatora.

Sformułowano także wnioski z badań określające stopień zagrożenia izolacji zwojowej transformatora podczas przebiegów występujących w stanie nieustalonym.

Transformator bezimpedancyjny odpowiada układowi będącemu szeregowym połączeniem kondensatora i transformatora. Uzyskanie tego jest możliwe w przypadku zastosowania specjalnego sposobu nawijania uzwojeń z wykorzystaniem folii, zazwyczaj aluminiowej, o szerokości nieco mniejszej od wysokości okna rdzenia transformatora. Idea nawijania takiego uzwojenia przedstawiona jest na rys. 1a. Schemat zastępczy jednej fazy transformatora bezimpedancyjnego w stanie jałowym przedstawiono na rys. 1b, jest on w pełni przydatny do analizy przebiegów wolnozmiennych.

Nazwa "bezimpedancyjny" nie jest zupełnie ścisła, ale można się z nią zgodzić włączając pod uwagę zasadę działania transformatora. Wartość pojemności szeregowej dobiera się w taki sposób, aby przy określonym obciążeniu całkowity spadek napięcia transformatora był równy zero. Dla zazwyczaj występujących współczynników mocy obciążenia występuje to wówczas, gdy reaktancja pojemnościowa X_C jest równa $1,1...1,2$ krotniej wartości całkowitej reaktancji rozproszenia transformatora X_L . W takim przypadku efekt jest identyczny jak przy impedancji transformatora równej zero. Wymaganą wartość pojemności odpowiadającą X_C uzyskuje się między podwójnie nawiniętymi 6 - 10% zwojów uzwojenia górnego napięcia znajdującymi się w pobliżu punktu zerowego. Poprawnie dobrane wartości pojemności transformatorów rozdzielczych bezimpedancyjnych wahają się od kilku do kilkudziesięciu μF . Aby uzyskać równoważny efekt po stronie dolnego napięcia, pojemność musiałaby mieć wartość rzędu mF, co jest praktycznie niemożliwe do osiągnięcia bez przyłączenia zewnętrznego kondensatora o odpowiednio dużej pojemności. Teoria transformatora bezimpedancyjnego jest już stosunkowo dobrze opracowana [1], [2] za wyjątkiem stanów nieustalonych, które jak wynika z dotychczasowych publikacji wymagają badań uzupełniających.



Rys. 1

a) Przekrój uzwojeń transformatora bezimpedancyjnego umieszczonych na kolumnie uzwojeń.
 b) Schemat ideowy transformatora bezimpedancyjnego z fazowego oraz zastępczy jednej fazy

Trudności w rozwiązaniu tego problemu wynikają zarówno ze złożonego charakteru zjawisk fizycznych, jak również niedostatków matematycznego ujęcia, nie pozwalającego uzyskać dokładnego rozwiązania ogólnego równań nieliniowych.

Brak szczegółowych wyników analizy stanów nieustalonych uniemożliwia opracowanie skutecznego zabezpieczenia izolacji transformatora bezimpedancyjnego od przepięć wewnętrznych – niezbędnego zwłaszcza dla części kondensatorowej uzwojenia górnego napięcia.

Matematyczny opis przebiegów nieustalonych w transformatorze bezimpedancyjnym musi być poprzedzony doбором funkcji aproksymującej krzywą magnesowania.

Korzystając z doświadczeń amerykańskich [3] wybrano do tego celu wielomian typu $\psi = a_1 - b_1 x^3 + c_1 x^5$.

Wybór funkcji jest bardzo ważny, ponieważ w sposób zasadniczy rzutuje na późniejszą dokładność wyników obliczeń.

W oparciu o rys. 1b matematyczny opis zjawisk w stanie nieustalonym przy załączaniu nieobciążonego transformatora od strony górnego napięcia da się przedstawić następująco:

$$R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + U_0(0) + e = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$e = \frac{d\psi}{dt} \quad (2)$$

$$i = i_1 + i_2 \quad (3)$$

$$k i_1 = a_1 \psi - b_1 \psi^3 + c_1 \psi^5 \quad (4)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = R_2 i_2 \quad (5)$$

Przystosowanie układu równań do obliczeń na maszynie analogowej rozpoczęto od wprowadzenia wartości względnych.

$\psi_m = \frac{\psi}{\psi_{m0}}$ – wartość chwilowa strumienia względnego skojarzonego rdzenia transformatora,

$i_m = \frac{i}{I_0}$ – wartość chwilowa prądu względnego,

$u_m = \frac{u}{U_{m0}}$ – wartość chwilowa napięcia względnego zasilania,

$\tau = \omega t$ – czas względny,

$$R_w = \frac{R}{R_0} - \text{rezystancja względna,}$$

$$C_w = \frac{C}{C_0} - \text{pojemność względna.}$$

Wartości odniesienia ψ_{m0} , U_{m0} są maksymalnymi wartościami strumienia skojarzonego i napięcia a I_0 skuteczną wartością prądu występującego w obwodzie transformatora bez pojemności szeregowej, w stanie jałowym przy zasilaniu napięciem znamionowym.

Między wartościami odniesienia przy założeniu przebiegów sinusoidalnych lub wzięciu pod uwagę tylko I harmonicznej zachodzi zależność

$$U_{m0} = \omega \psi_{m0} \quad (6)$$

Jako wartości odniesienia R_0 i C_0 przyjęto fazowe wartości rezystancji i pojemności uzwojenia górnego napięcia transformatora bezimpedancyjnego $R_0 = R_1$, $C_0 = C$.

Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

- impedancja źródła zasilania $Z_z = 0$,
- straty w żelazie transformatora są pomijalnie małe $R_T = \infty$,
- indukcyjność rozproszenia L_1 zostaje włączona do nieliniowej indukcyjności rdzenia (drogą korekty krzywej magnesowania $i = f(\psi)$ poprzez zwiększenie wartości współczynnika a_1 we wzorze (4)),
- napięcie zasilania U zmienia się w stosunku do wartości znamionowej w granicach $\pm 10\%$,
- indukcja znamionowa w rdzeniu przy zasilaniu napięciem znamionowym może wahać się od 1 - 1,8 T.

Warunek e uwzględniono poprzez odpowiedni dobór współczynników a i b wielomianu $i_w = \psi_w^3 - a\psi_w^3 + b\psi_w^5$. Dla prawdopodobnych krzywych magnesowania optymalnego doboru współczynników dokonano przy pomocy maszyny cyfrowej Odra 1003. Wartości współczynników dla odpowiednich krzywych na ogół nieznacznie różnią się od siebie i mieszczą się w granicach 0,5 - 2,5.

Maszyna analogowa, na której przeprowadzono badania (4) ALMA-2, została zbudowana w Energopomiarze; jest to maszyna lampowo-tranzystorowa średniej wielkości mająca 138 miejsc operacyjnych. Podstawowe wyposażenie maszyny obejmuje 112 wzmacniaczy operacyjnych, 120 potencjometrów liniowych oraz 30 bloków różnych (mnożących, nieciągłości, przekątnikowych, przekształtników funkcji $\sin-\cos$, opóźniających, uniwersalnej nieliniowości, wzmacniacza mocy). Wyposażenie peryferyjne stanowią: woltomierze cyfrowe, rejstratory x-y-t oraz oscyloskop katodowy.

Po wprowadzeniu jednostek względnych i dokonaniu niezbędnych przekształceń postać równań przygotowanych do analizy przy zerowych warunkach początkowych jest następująca:

$$\frac{d^2 \psi_w}{d\tau^2} + D(1 - 3a\psi_w^2 + 5b\psi_w^4) \frac{d\psi_w}{d\tau} + E(\psi_w - a\psi_w^3 + b\psi_w^5) = u_{mw} \cos(\tau + \varphi) \quad (7)$$

$$i_w = \psi_w - a\psi_w^3 + b\psi_w^5 \quad (8)$$

$$u_{ow} = E \int (\psi_w - a\psi_w^3 + b\psi_w^5) d\tau, \quad (9)$$

gdzie

$$D = \frac{R_{o1} I_o}{\omega C_o m_o} R_{w1} = A R_{w1} \quad (10) - \text{współczynnik zależny od rezystancji obwodu (tłumienie),}$$

$$E = \frac{I_o}{\omega C_o m_o} \frac{1}{C_w} = B \frac{1}{C_w} \quad (11) - \text{współczynnik zależny od reaktancji pojemnościowej obwodu (główny czynnik wpływający na okres drgań).}$$

Przewidywane wartości współczynników D i E dla transformatorów bezimpedancyjnych mieszczą się w następujących zakresach:

$$D = (0,008 \div 0,060) 10^{-3}$$

$$E = (0,140 \div 0,300) 10^{-3}$$

W celu znalezienia ogólnych zależności badania przeprowadzano w szerszym zakresie współczynników, a mianowicie:

$$D = (0,008 - 1,0) 10^{-3}$$

$$E = (0,090 - 11,0) 10^{-3}.$$

W trakcie analizy przebiegów niestabilnych przyjmowano następujące zakresy zmian warunków początkowych: faza załączenia napięcia $\varphi(0) = 0 - 360^\circ$, strumień resztkowy w rdzeniu $\psi_w(0) = \pm 1$ i napięcie początkowe na kondensatorze $u_{ow}(0) = \pm 0,75$. W odniesieniu do dwu ostatnich warunków można powiedzieć, że dopuszczono większy zakres zmian niż w praktyce jest możliwy.

Badane wielkości prądu, napięcia na kondensatorze i strumienia w stanie nieustalonym uzyskiwano jako funkcję następujących zmiennych:

$$i_w, u_{cD}, \psi_w = f[U, D, E, a, b, \varphi(0), u_{cW}(0), \psi_w(0), \tau] \quad (12)$$

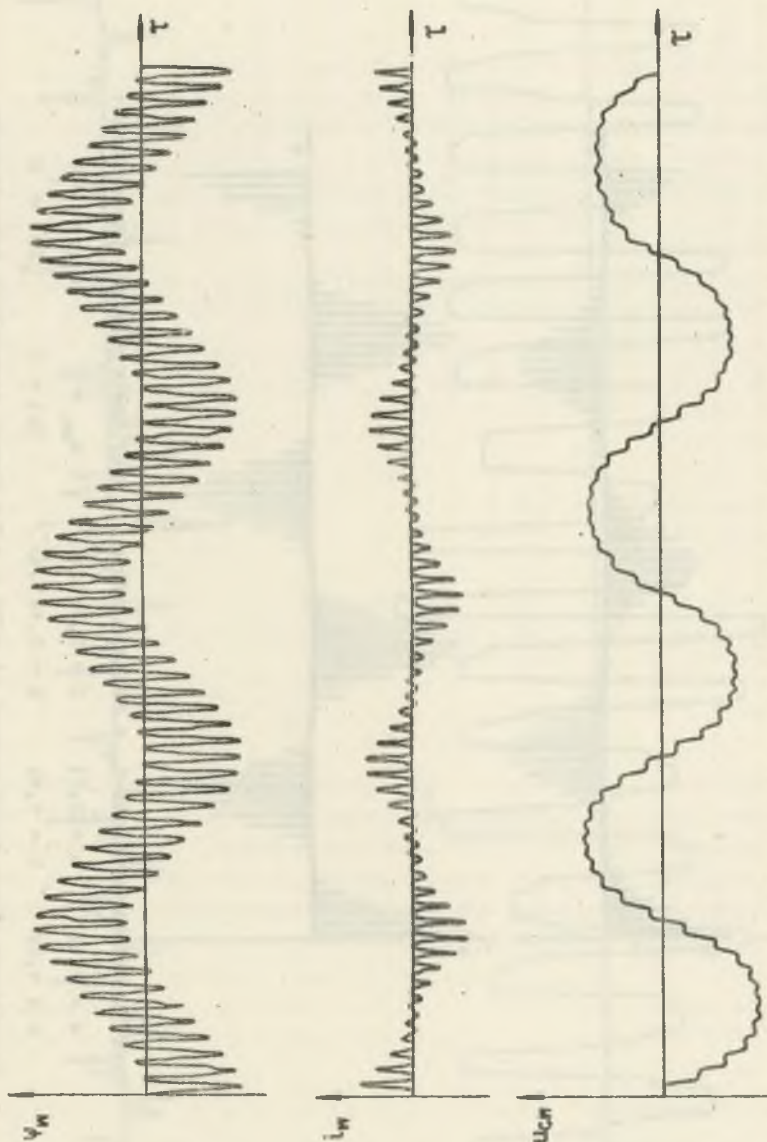
Dla określonych zakresów zmian parametrów uzyskano wyraźnie dwa typy przebiegów. Typ pierwszy otrzymywany przy zerowych warunkach początkowych $u_{cW}(0) = \psi_w(0) = 0$ przedstawia przebiegi podharmoniczne (rys. 2), których okres zależny jest wyraźnie od E , a , b i amplitudy. Tłumienie przebiegu jest bardzo powolne ze względu na przyjętą zerową wartość impedancji źródła zasilania. Punkt pracy charakteryzuje się ponadto małymi wartościami prądu magnesującego i napięcia na kondensatorze, obwód nosi charakter indukcyjny. Zależność przebiegów od zmiennych a i b przedstawia rys. 3. Można stwierdzić duży wpływ nasycenia obwodu na okres drgań własnych, przy zachowaniu cech charakterystycznych przebiegów. Typ drugi otrzymywany przy niezerowych warunkach początkowych, zależny zwłaszcza od napięcia resztkowego na kondensatorze, przedstawia nieharmoniczne drgania obwodu związane ze zmianą punktu pracy (rys. 4). Przebiegi charakteryzują się dużymi wartościami prądu, wyprzedzającego napięcie zasilania, znacznymi wartościami napięć zwłaszcza na kondensatorze i zmniejszeniem okresu drgań. W przypadku małego tłumienia i dużych nasyczeń (większe wartości a i b) drgania mogą mieć charakter nieokresowy. Przy większych tłumieniach $D > 0,06 \cdot 10^{-3}$ można uzyskać ustabilizowany przebieg rezonansowy podharmonicznej $1/3$.

Wyniki liczbowe badań wskazują, że:

1. Drgania występujące podczas stanu nieustalonego przy zerowych warunkach początkowych nie są groźne dla izolacji kondensatora, ponieważ amplituda napięcia u_0 nie przekracza $0,075 U_{m0}$.
2. Drgania występujące przy niezerowych warunkach początkowych, a zwłaszcza wartościach $u_0(0) \geq 0,75 U_{m0}$, są bardzo groźne dla izolacji kondensatora, ponieważ amplituda napięcia u_0 może osiągnąć $2U_{m0}$. Zagrożenie tak poważne jest mało prawdopodobne w praktyce ze względu na wielkość napięcia początkowego na kondensatorze, uzależnioną od wielkości obciążenia i fazy wyłączanego napięcia. Realna wielkość zagrożenia, jak wykazały badania dodatkowe, może zawierać się w granicach $0,25 \div 0,5 U_{m0}$ - co już stanowi duże niebezpieczeństwo dla izolacji kondensatora i wymaga zastosowania specjalnego zabezpieczenia.

Badania przeprowadzone na maszynie analogowej umożliwiły dokładne określenie zagrożenia, jakie występuje podczas stanów nieustalonych dla izolacji zwojowej transformatora bezimpedancyjnego.

Przeprowadzenie podobnego programu badań na rzeczywistym transformatorze bezimpedancyjnym nie jest możliwe ze względu na niszczący dla izolacji charakter występujących przepięć. Badania sprawdzające stanów nieusta-

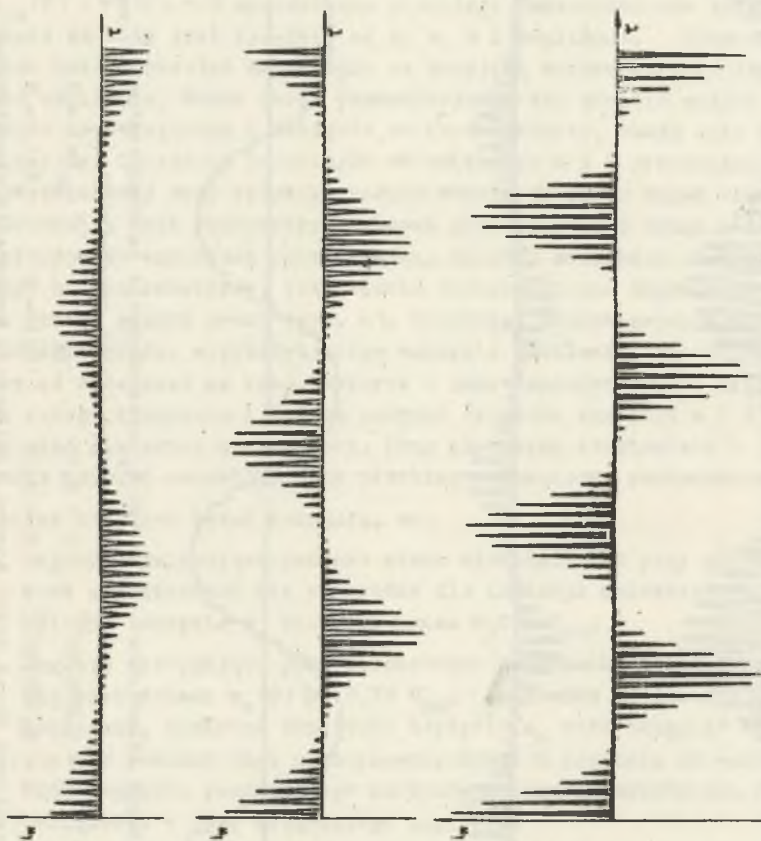


Rys. 2. Przebiegi strumienia Ψ , prądu i_M oraz napięcia na kondensatorze u_C w funkcji czasu przy następujących parametrach:

$$D = 0,008 \cdot 10^{-3} \quad a = 2,17 \quad \mu M = 1 \quad \omega_M(t) = 0$$

$$E = 0,180 \cdot 10^{-3} \quad b = 2,21 \quad (t) = 0 \quad \omega_C(t) = 0$$

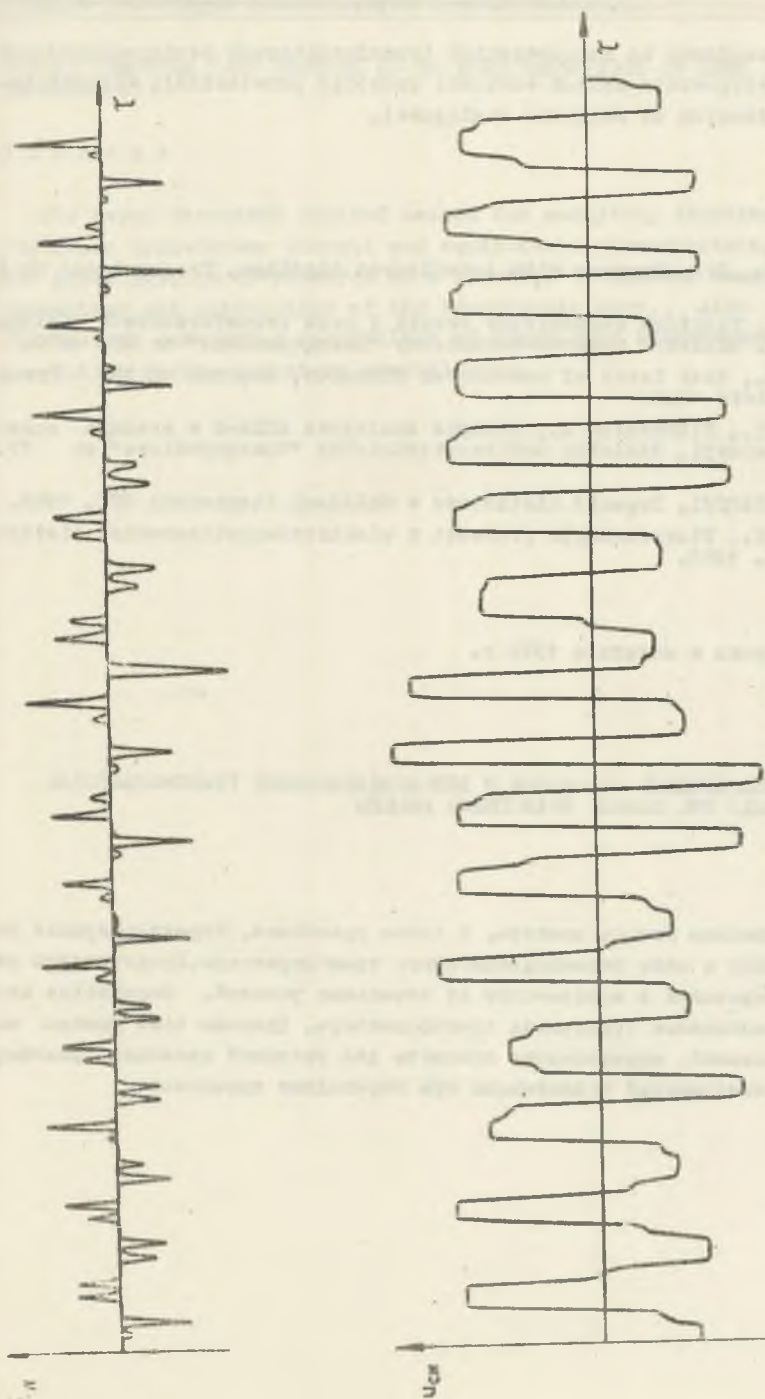
Początkowy okres drgań wynosi $1/23$ okresu wymuszenia zewnętrznego



Rys. 3. Przebiegi prądu i_w w funkcji czasu przy następujących parametrach:

$$\begin{array}{llll}
 a = 2,17 & b = 2,21 & D = 0,045 \cdot 10^{-3} & u_{0w}(0) = 0 \\
 a = 1,29 & b = 1,16 & E = 0,145 \cdot 10^{-3} & u_w(0) = 0
 \end{array}$$

Początkowy okres drgań wynosi od $1/29$ - $1/51$ okresu wymuszenia zewnętrznego



Rys. 4. Przebiegi prądu i_w oraz napięcia na kondensatorze u_{c2w} w funkcji czasu przy następujących parametrach:

$$D = 0,045 \cdot 10^{-3} \quad a = 2,17 \quad u_{mw} = 1 \quad u_{0w}(0) = 0,5 U_{m0}$$

$$E = 0,145 \cdot 10^{-3} \quad b = 2,21 \quad (0) = 0 \quad w(0) = 0$$

Okres drgań waha się od $1/3 - 1/9$ okresu wymuszenia zewnętrznego

lonych przeprowadzane na rzeczywistych transformatorach bezimpedancyjnych w zakresie występowania małych wartości przepięć potwierdzają wnioski badań przeprowadzonych na maszynie analogowej.

LITERATURA

1. LOCKIE A.M., Transformers with interleaved windings, Transactions No 9 1965.
2. PARTYGA S., Niektóre zagadnienie teorii i prób transformatorów bezimpedancyjnych. Biuletyn naukowo-techniczny "Energopomiaru" nr 73. 1970.
3. KELLER E.G., Beat theory of non-linear circuits, Journal of The Franklin Institute 1938.
4. KUZMIŃSKA T., PIETRASZEK A., Maszyna analogowa ALMA-2 w rocznym okresie eksploatacji. Biuletyn naukowo-techniczny "Energopomiaru" nr 77. 1974.
5. CHIHIRO HAYASCHI, Drgania nieliniowe w układach fizycznych WNT, 1968.
6. RÜDENBERG R., Pierechodnyje processi w elektroenergetycznych sistemach I.I.L. 1955.

Przyjęto do druku w styczniu 1972 r.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В БЕЗИМПЕДАНЦИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ ПРИ ПОМОЩИ АНАЛОГОВОЙ МАШИНЫ

Р е з ю м е

В статье описаны методы анализа, а также уравнение, характеризующие переходный процесс в цепи безимпеданционного трансформатора. Представлены результаты исследований в зависимости от начальных условий, параметров цепи и степени насыщения сердечника трансформатора. Сделаны тоже выводы на основе исследований, определяющие опасность для витковой изоляции трансформатора от перенапряжений возникающих при переходных процессах.

ANALOG COMPUTER TEST RESULTS OF NO LOAD TRANSIENTS OF ZERO IMPEDANCE TRANSFORMER

S u m m a r y

The paper describes applied method for analyzing transients in zero-impedance transformer circuit and equations characterizing its. There are given results of research as a function of initial conditions circuit parameters and saturations of the transformer core. Also are presented conclusions concerning possibility of brake down transformer turn-to-turn insulation during transient overvoltages.