

Witalij Skoropacki*

MODELOWANIE MATEMATYCZNE UKŁADÓW ZAPEWNIAJĄCYCH ISKROBEZPIECZEŃSTWO Z WYKORZYSTANIEM GENERATORÓW SAMOWZBUDNYCH

Streszczenie

W artykule omówiono jeden ze sposobów realizacji technicznej układów zapewniania iskrobezpieczeństwa z charakterystyką wyjściową typu „z podcięciem” (*foldback*), oparty na wykorzystaniu generatorów samowzbudnych. Układy te mają wiele zalet, a mianowicie:

- możliwość rozpoczęcia procesu wyprzedzającej separacji obwodu chronionego od źródła zasilania przed powstaniem wylądowania elektrycznego w punkcie komutacji awaryjnej,
- możliwość eliminowania konieczności potrojenia (ew. podwojenia) układów ochronnych w celu zapewnienia niezawodności ich funkcjonowania,
- możliwość stosowania tranzystorów jako elementów sterowanych w celu zapewnienia poziomu iskrobezpieczeństwa „ia”, ponieważ dowolne uszkodzenie tranzystora (np. zwarcie lub rozwarcie między jego elektrodami) skutkuje zerwaniem drgań samowzbudnego generatora i przerwaniem dostarczania energii elektrycznej do obwodu chronionego,
- możliwość zintegrowania układu separacji galwanicznej z układem ochronnym iskrobezpiecznego obwodu elektrycznego,
- możliwość iskrobezpiecznego zdalnego zasilania, z wykorzystaniem jednego toru przewodowego (macierzystego lub pochodnego), odbiorników energii elektrycznej rozproszonych w wyrobiskach kopalnianych, za pomocą odrębnych kanałów zasilania z wykorzystaniem ortogonalnych nośników energii elektrycznej, w celu zwiększenia iskrobezpiecznej energii elektrycznej dostarczanej do tych odbiorników.

Analiza właściwości takich układów pod względem teoretycznym i użytkowym w kontekście wymagań dyrektywy ATEX wymaga dysponowania ich modelem matematycznym. W artykule na podstawie strukturalnego przedstawienia w postaci dynamicznego obiektu, zbudowanego jako wzmacniacz z silnym dodatnim sprzężeniem zwrotnym, zawierającym regulowany korektor amplitudy i fazy, uzyskano uogólniony model strukturalny wymienionych układów ochronnych oraz otrzymano w formie analitycznej jego podstawowe modele matematyczne, a mianowicie operatorową transmitancję po wymuszeniu i równanie charakterystyczne. Pozwala to na wykonanie, z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego, analizy stopnia wrażliwości iskrobezpieczeństwa obwodu chronionego na zmiany jego parametrów elektrycznych, estymowanie charakterystyki czasowej i częstotliwościowej w procesie powstawania i zrywania drgań periodycznych w układzie ochronnym w zależności od parametrów obciążenia.

Mathematical modelling of systems assuring spark-proofness with the use of self-excited generators

Abstract

In the paper, one of the ways of technical realization of systems of spark-proofness assurance with output characteristics of foldback type was discussed, based on using of self-excited generators. These circuits have many advantages, namely:

* Główny Instytut Górnictwa.

- possibility of starting of the process of forward separation of protected circuit from the source of power supply, before electric discharge arising in a point of emergency commutation,
- possibility of eliminating of necessity of protective systems triplication (or doubling) in aim of reliability assuring of their functioning,
- possibility of applying of transistors as steered elements in aim of assurance of spark-proofness level "ia", because any damage of transistor (e.g. a short-circuit or an opening between its electrodes) results in oscillations' break of self-excited generator and breaking of delivery of electric energy to a protected circuit,
- possibility of integrating of galvanise separation system with a protective system of spark-proof electric circuit,
- possibility of spark-proof remote power supply, with the use of one metallic circuit (mother or derivative), of receivers of electric energy distributed in mine workings, with the help of separate channels of power supply with the use of orthogonal carriers of electric energy, in the aim of enlargement of spark-proof electric energy delivered to these receivers.

Analysis of properties of such systems under theoretical and utilitarian regards, in a context of requirements of ATEX directive, demands disposing of their mathematical model. In the paper, on a basis of structural presentation in a form of dynamic object, built as an amplifier with a strong positive feedback, including regulated corrector of amplitude and phase, a generalized structural model of the mentioned protective systems was obtained, as well as its basic mathematical models were obtained in analytic form, namely, an operational transmittance after input function and characteristic equation. It enables realization, with the use of computer aid, of analysis of degree of protected circuit spark-proof sensibility to changes of its electric parameters, estimating of time and frequency characteristics in a process of formation and breaking of periodic oscillations in protective system in dependence of load parameters.

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień, ściśle związanych z restrukturyzacją górnictwa węgla kamiennego i towarzyszącą jej integracją sprzętu i usług w kopalnianych sieciach teleinformatycznych, z wykorzystaniem cyfrowych technik komutacji i transmisji, jest iskrobezpieczne zasilanie dołowych urządzeń tej sieci, tzn. elektronicznych urządzeń automatyki, telemetrii i telemechaniki, funkcjonujących w środowisku zagrożonym wybuchem. Iskrobezpieczne zasilanie jest również aktualne w odniesieniu do innych gałęzi przemysłu, gdzie występują strefy zagrożone wybuchem, w których instaluje się systemy kontroli parametrów bezpieczeństwa i procesów technologicznych.

Zwiększenie iskrobezpiecznej mocy elektrycznej, odbieranej przez obciążenie ze źródła zasilania, można osiągnąć przez stosowanie wyprzedzającej separacji energetycznej tego źródła od obciążenia, w którym powstała komutacja awaryjna. Realizacja techniczna wyprzedzającego odłączenia jest możliwa tylko za pomocą układów ochronnych z nieliniową charakterystyką wyjściową. Zysk energetyczny ich stosowania, w stosunku do liniowych układów ochronnych, zależy od parametrów oraz topologii obciążenia i wynosi średnio 20%.

Jedną z możliwości realizacji technicznej układów ochronnych, z nieliniową charakterystyką wyjściową, jest wykorzystanie generatorów samowzbudnych, w przypadku których powstanie i zerwanie drgań periodycznych jest uwarunkowane wartością impedancji wejściowej obciążenia. Pozwala to na wykonanie układu ochronnego czułego na dodatnie i ujemne zmiany pochodnej od wartości prądu obciążenia, tzn. na awaryjne zwarcie i rozwarcie obwodu iskrobezpiecznego, separację

galwaniczną między nieiskrobezpiecznym a iskrobezpiecznym obwodem elektrycznym, a także separację galwaniczną między iskrobezpiecznymi obwodami elektrycznymi, zasilanymi z jednego wspólnego pierwotnego źródła zasilania. Jest to kierunek perspektywiczny w iskrobezpiecznym zasilaniu obwodów elektrycznych, zwłaszcza obwodów z torami przesyłowymi.

Ocena możliwości i warunków stosowania samowzbudnych generatorów drgań periodycznych w układach zapewniających iskrobezpieczeństwo obwodów elektrycznych wymaga dysponowania matematycznym modelem takich układów ochronnych. W związku z powyższym przystąpiono do opracowania uogólnionego modelu strukturalnego wymienionych układów ochronnych, a także określenia, w formie analitycznej, jego podstawowych parametrów, takich jak transmitancja po wymuszeniu i równanie charakterystyczne, umożliwiającą analityczną ocenę ich wrażliwości w stosunku do zmian parametrów elementów elektronicznych i obciążenia.

1. WYMAGANIA DOTYCZĄCE UKŁADÓW OCHRONNYCH W KONTEKŚCIE DYREKTYWY ATEX 100 A

Układy zabezpieczające konwencjonalne źródła zasilania powinny charakteryzować się:

- wysoką czułością i szybkością działania,
- ograniczeniem wartości wszystkich możliwych wewnętrznych i zewnętrznych przepięć,
- stabilnością wartości parametrów i charakterystyk, przy oddziaływaniu różnych wymuszeń zewnętrznych (zmianą w dopuszczalnym zakresie pierwotnego napięcia zasilania, temperatury otoczenia, wilgotności itd.),
- niezawodnością funkcjonowania.

Wymagania powyższe dotyczą również układów ochronnych iskrobezpiecznych obwodów elektrycznych, w tym iskrobezpiecznych źródeł zasilania, jednak w stopniu bardziej rygorystycznym. Na przykład, zapewnienie bardzo dużej niezawodności funkcjonowania układu ochronnego, praktycznie nieuszkodzalnego, uzyskuje się za pomocą potrojenia aktywnych elementów elektronicznych, przy jednoczesnym ustaleniu takich warunków pracy wszystkich aktywnych i pasywnych elementów, przy których te elementy mogłyby być zakwalifikowane do kategorii nieuszkodzalnych. Wymagania w stosunku do trybu pracy w stanie normalnym i awaryjnym, konstrukcji mechanicznej, odstępów izolacyjnych, warunków temperaturowych są sprecyzowane w normie PN-EN 60079-11, zharmonizowanej z wymaganiami dyrektywy europejskiej ATEX 100 A (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego z 23 marca 1994 r.).

W układach ochronnych, zapewniających iskrobezpieczeństwo obwodów wejściowych zasilaczy kategorii „i”, bardzo ważną rolę odgrywają półprzewodnikowe elementy, pełniące funkcje równoległych ograniczników napięcia, zwierających zaciski wyjściowe w chwili powstania komutacji awaryjnej w obwodzie wyjściowym. Takie elementy powinny charakteryzować parametry specyficzne w układach ochronnych, na przykład wartość napięcia przebicia, prąd maksymalny, moc dopuszczalna, straty energii w stanie normalnej pracy, w stanie nasycenia oraz w stanie przechodze-

nia w nasycenie. Wartość tych strat decyduje o temperaturze wnętrza elementu zwi-
rającego, a tym samym o niezawodności układów ochronnych.

Ważnym parametrem charakterystycznym układów ochronnych obwodów iskro-
bezpiecznych jest szybkość działania. Wymagania dotyczące szybkości działania
układów ochronnych z nieliniową charakterystyką wyjściową zostały określone
w pracy (Skoropacki 2005).

W celu zminimalizowania oddziaływania źródła zasilania na proces zapalenia
mieszanki wybuchowej, układ ochronny powinien zapewnić odcięcie dopływu prądu
od momentu powstania komutacji w czasie mniejszym od τ_g , równym

$$\tau_g = W_{\min} R_w / U_{\infty}^2 \quad (1)$$

gdzie:

W_{\min} – minimalna energia zapalenia mieszanki wybuchowej,

R_w – rezystancja wewnętrzna źródła zasilania,

U_{∞} – wartość napięcia na wyjściu nieobciążonego źródła zasilania.

Warunek (1) jednak nie jest dostateczny, aby wykluczyć zapalenie się mieszanki
wybuchowej, ponieważ nie zostały w nim uwzględnione oddziaływania innych źródeł
mogących spowodować zapalenie, a mianowicie elementów reaktancyjnych obwodu
obciążenia, gromadzących energię magnetyczną i elektryczną.

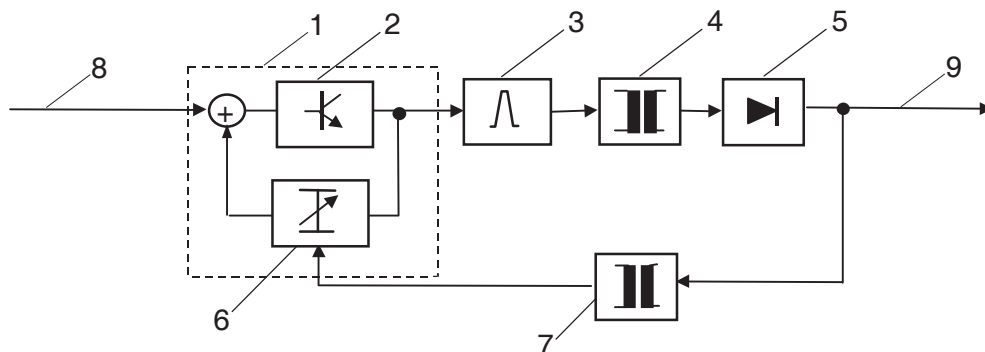
Należy również podkreślić, że w układach ochronnych zabezpieczających obwo-
dy zdalnego zasilania urządzeń telekomunikacyjnych, instalowanych w przestrzeniach
zagrożonych wybuchem, są stawiane dodatkowe wymagania polegające na tym, że
zabezpieczenie toru telekomunikacyjnego musi być wykonane bez pogorszenia jego
tamowności $\gamma(j\omega)$.

2. KONCEPCJA BUDOWY UKŁADU OCHRONNEGO Z WYKORZYSTANIEM GENERATORA SAMOWZBUDNEGO, ZAPEWNIĄCEGO ISKROBEZPIECZEŃSTWO OBWODU ELEKTRYCZNEGO

Zasada funkcjonowania układu ochronnego iskrobezpiecznego obwodu elek-
trycznego z wykorzystaniem generatora samowzbudnego polega na tym, że energia
źródła prądu stałego jest przetwarzana w energię prądu przemiennego wysokiej czę-
stotliwości, przy czym jako konwerter energii prądu stałego w energię prądu prze-
miennego wysokiej częstotliwości jest stosowany samowzbudny system oscylacyjny,
w którym spełnienie warunku fazy i amplitudy określa się impedancją wejściową
iskrobezpiecznego obwodu wyjściowego. Ogólna koncepcja budowy ochronnego
układu obwodu iskrobezpiecznego z wykorzystaniem samowzbudnego generatora
drgań periodycznych została przedstawiona na rysunku 1.

Układ ochronny iskrobezpiecznego obwodu elektrycznego składa się z szeregowo
połączonych: samowzbudnego generatora drgań periodycznych wysokiej częstotliwo-
ści (1), zawierającego element czynny (2) i pętlę dodatniego sprzężenia zwrotnego

w postaci regulowanego korektora amplitudy i fazy (6), wzmacniacza rezonansowego (3), transformatora separującego (4) i prostownika (5), do wyjścia którego jest podłączone obciążenie i przetwornik impedancji z separacją galwaniczną (7), którego wyjście jest związane z wejściem sterującym wymienionego korektora regulowanego (6). W stanie normalnej pracy, kiedy impedancja wejściowa obciążenia mieści się w ustalonym zakresie, sygnał na wyjściu przetwornika impedancji (6) zapewnia ogólny warunek generacji drgań $K(j\omega)\beta(j\omega) = |K|e^{j\psi}|\beta|e^{j\varphi} = 1$, w tym warunek amplitudy $|K||\beta| = 1$ i fazy $\psi + \varphi = 2n\pi$.



Rys. 1. Ogólna koncepcja budowy układu ochronnego obwodu iskrobezpiecznego z wykorzystaniem generatora samowzbudnego: 1 – generator podstawowy, 2 – element czynny, 3 – wzmacniacz rezonansowy, 4 – transformator separujący, 5 – prostownik, 6 – korektor regulowany, 7 – przetwornik impedancji, 8 – od źródła prądu stałego, 9 – do obciążenia

Fig. 1. General conception of building of protective system of spark-proof circuit with the use of self-excited generator: 1 – basic generator, 2 – active element, 3 – resonance amplifier, 4 – separating transformer, 5 – rectifier, 6 – regulated corrector, 7 – converter of impedance, 8 – from DC source, 9 – to the load

Na wyjściu samowzbudnego generatora (1) powstają sinusoidalne drgania o ustalonej częstotliwości, które są wzmacniane za pomocą rezonansowego wzmacniacza (3), mającego maksymalne wzmocnienie dla ustalonej częstotliwości, a następnie są przekazywane przez transformator separujący (4) do prostownika (5), z wyjścia którego prąd stały jest przekazywany do obciążenia. Przy powstawaniu komutacji awaryjnej typu „zwarcie” lub „rozwarcie” w obwodzie wyjściowym, impedancja wejściowa tego obwodu przekracza zakres ustalony dla normalnego trybu pracy układu iskrobezpiecznego zasilania. Równocześnie na wyjściu przetwornika impedancji (7) zaistnieje sygnał zmieniający transmitancję $\beta(\omega)$ regulowanego korektora (6), wskutek czego zostanie naruszony warunek generacji drgań samowzbudnego generatora (1). Generowanie drgań sinusoidalnych zostanie przerwane, w wyniku czego zostanie również przerwane przekazywanie energii elektrycznej do obciążenia, tzn. zostanie w krótkim czasie dokonana separacja energetyczna obwodu wyjściowego, zapewniając w ten sposób jego iskrobezpieczeństwo. Równocześnie separacja energetyczna między obwodem iskrobezpiecznym i nieiskrobezpiecznym będzie następować przed powstaniem pełnego „zwarcia” lub „rozwarcia” w obwodzie iskrobezpiecznym, tzn. będzie wyprzedzająca do momentu powstania jądra zapalenia w punkcie komutacji awaryjnej.

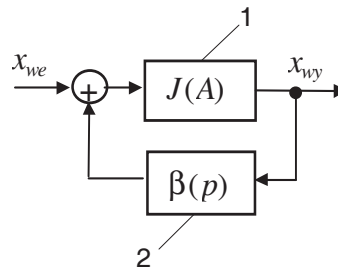
Dotychczasowe badania generatorów samowzbudnych dotyczyły zwiększenia inwariantności amplitudy i częstotliwości generowanego przebiegu w stosunku do wymuszeń zewnętrznych (zasilanie, parametry obciążenia, warunki klimatyczne itp.), zwiększenia sprawności energetycznej, zmniejszenia współczynnika zawartości harmonicznych, minimalizacji elementów elektronicznych w rozwiązaniach ideowych oraz zapewnienia innych właściwości w zależności od zastosowania (Golde 1976; Kuta, Krajewski, Jaselski 1994).

Do wykonywania ochronnych układów obwodów iskrobezpiecznych z wykorzystaniem generatorów samowzbudnych jest pożądana nieliniowa zależność amplitudy generowanego przebiegu od parametrów obciążenia, tzn. że dla ustalonego zakresu zmian parametrów obciążenia – rezystancji, indukcyjności i pojemności – powinna być zapewniona stałość tej amplitudy, a w przypadku przekroczenia tego zakresu natychmiastowe zerwanie generowanych drgań.

W celu zapewnienia warunków kompatybilności elektromagnetycznej oraz zwiększenia sprawności energetycznej układu ochronnego wskazane jest stosowanie analogowego generatora drgań sinusoidalnych z minimalną zawartością harmonicznych. Z kolei, w przypadku stosowania wzmacniaczy rezonansowych w strukturze układu ochronnego, jest pożądana zależność częstotliwości generowanych przebiegów periodycznych generatora samowzbudnego od parametrów obciążenia.

3. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU OCHRONNEGO Z WYKORZYSTANIEM GENERATORA SAMOWZBUDNEGO

Prosty samowzbudny generator przebiegów periodycznych można przedstawić w sposób ogólny w postaci pokazanej na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat strukturalny generatora przebiegów periodycznych:
1 – czwórnik czynny, 2 – czwórnik sprzężenia zwrotnego

Fig. 2. Simplify structural diagram of generator of oscillations:
1 – active four-terminal network, 2 – feedback four-terminal network

Czwórnik (1) jest czynnym nieliniowym elementem generatora, a pasywny (ewentualnie aktywny) czwórnik (2) o transmitancji $\beta(p)$ jest układem sprzężenia zwrotnego, który zapewnia właściwe przesunięcie fazy sygnału doprowadzanego do jego wejścia.

W celu uproszczenia analizy można założyć, że czwórnik (1) jest elementem pozbawionym bezwładności, jego pasmo przenoszenia jest wielokrotnie szersze od pasma przenoszenia czwornika (2), a transmitancja $J(A)$ zależy jedynie od amplitudy A sygnału wejściowego.

Ze względu na rodzaj i sposób pracy czynnego elementu, układy samowzbudne można podzielić na dwa rodzaje: generatory z rezystancją ujemną (dwójnikowe) oraz generatory ze sprzężeniem zwrotnym (czwórnikowe). Przykładem układów z rezystancją ujemną jest generator zbudowany na bazie diody tunelowej lub generatory na tranzystorach z rezystancją ujemną między elektrodami kolektor – baza, baza – emiter oraz kolektor – emiter (Szerszeń 1961).

Modelowanie matematyczne układów ochronnych, z wykorzystaniem generatorów samowzbudnych w celu zapewnienia iskrobezpieczeństwa obwodów elektrycznych, zostało ograniczone do rozpatrywania generatorów o zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego.

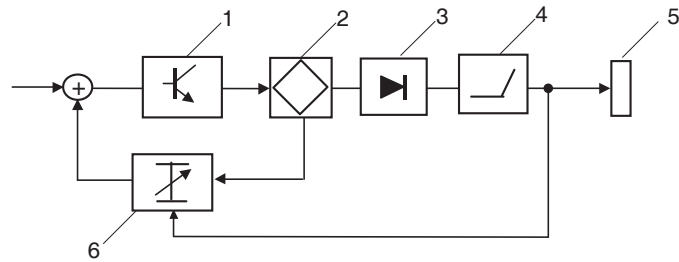
W zależności od wzajemnych połączeń czworników (1) i (2) (rys. 2), na przykład równoległe połączenie ich zacisków wejściowych i wyjściowych, szeregowe połączenie lub mieszane połączenie tych zacisków oraz zależnie od transmitancji $\beta(p)$ sprzężenie zwrotne podzielono na: równoległe i szeregowe, prądowe i napięciowe, selektywne i liniowe, jednostopniowe i wielostopniowe, pasywne i aktywne.

Wybór rodzaju sprzężenia zwrotnego, przy zapewnieniu iskrobezpieczeństwa elektrycznego obwodu wyjściowego, jest podstawowym czynnikiem wpływającym na wrażliwość parametrów generacji drgań układu samowzbudnego od impedancji wejściowej obciążenia. Wrażliwość warunków generacji drgań układu samowzbudnego od rezystancji obciążenia jest podstawą jego stosowania w strukturze układu ochronnego podczas realizacji iskrobezpiecznego zasilania urządzeń elektronicznych. W przypadku idealnym wrażliwość ta ma charakter nieliniowy:

$$\left. \begin{array}{l} J(A)\beta(j\omega) = J(A)|\beta|e^{j\varphi} = 1 \text{ dla} \\ J(A)\beta(j\omega) = J(A)|\beta|e^{j\varphi} < 1 \text{ dla} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} R_{\min} \leq R_o \leq R_{\max} \\ L_o \leq L_{\max} \\ C_o \leq C_{\max} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} R_{\min} > R_o > R_{\max} \\ L_o > L_{\max} \\ C_o > C_{\max} \end{array} \right. \end{array} \quad (2)$$

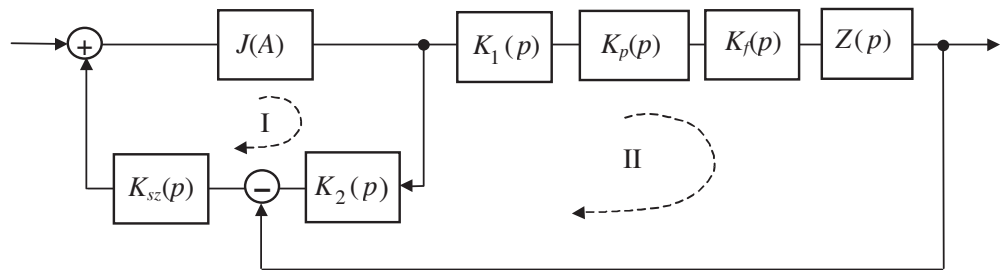
Przykładowo, na rysunku 3 przedstawiono schemat funkcjonalny układu ochronnego w postaci samowzbudnego generatora z wykorzystaniem dwóch zewnętrznych pętli sprzężenia zwrotnego, zmiennoprądowej i stałoprądowej. W celu zapewnienia wrażliwości warunków powstania przebiegów periodycznych od parametrów obciążenia, jest niezbędne, aby transmitancja regulowanego korektora (6) była funkcją impedancji wejściowej obciążenia, najkorzystniej o charakterze nieliniowym, według zależności (2).

W celu przeprowadzenia analitycznej oceny warunków generacji drgań periodycznych, schemat funkcjonalny generatora samowzbudnego, przedstawionego na rysunku 3, przekształcono do postaci zamkniętego układu strukturalnego (rys. 4).



Rys. 3. Schemat funkcjonalny generatora samowzbudnego z wykorzystaniem dwóch zewnętrznych pętli sprzężenia zwrotnego: 1 – element czynny, 2 – rozgałęźnik transformatorowy, 3 – prostownik, 4 – filtr wygładzający, 5 – obciążenie, 6 – układ sprzężenia zwrotnego

Fig. 3. Functional diagram of self-excited generator with the use of two external feedback loops: 1 – active element, 2 – hybrid coil, 3 – rectifier, 4 – smoothing filter, 5 – load, 6 – feedback circuit



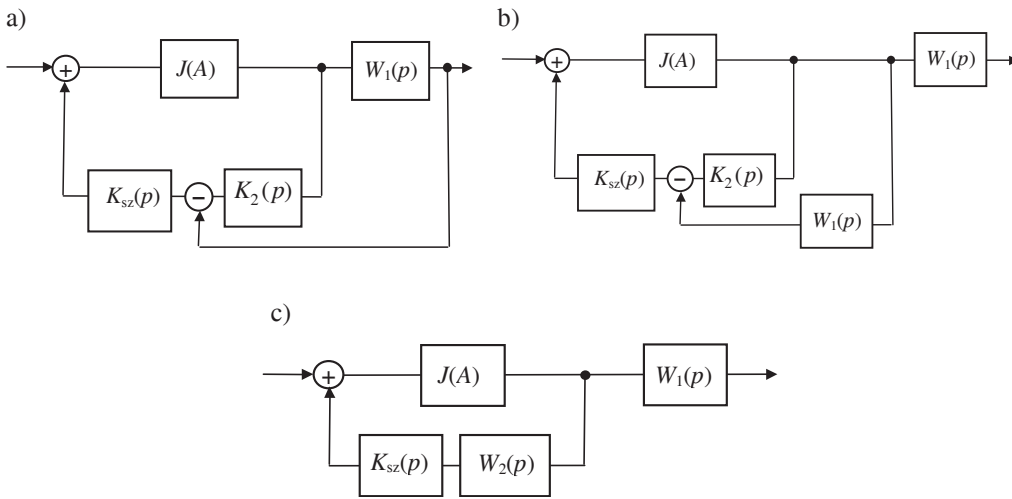
Rys. 4. Schemat strukturalny generatora samowzbudnego: $J(A)$ – transmitancja nieliniowego elementu czynnego, $K_1(p)$ – transmitancja rozgałęźnika w kierunku zacisków wyjściowych, $K_p(p)$ – transmitancja prostownika, $K_f(p)$ – transmitancja filtra wygładzającego, $K_2(p)$ – transmitancja rozgałęźnika w kierunku sprzężenia zwrotnego, $K_{sz}(p)$ – transmitancja układu sprzężenia zwrotnego (korektora regulowanego), $Z(p)$ – impedancja wejściowa obciążenia

Fig. 4. Structural diagram of self-excited generator: $J(A)$ – transmittance of non-linear active element, $K_1(p)$ – transmittance of hybrid coil in the direction of output clamps, $K_p(p)$ – transmittance of rectifier, $K_f(p)$ – transmittance of smoothing filter, $K_2(p)$ – transmittance of hybrid coil in direction of feedback, $K_{sz}(p)$ – transmittance of feedback circuit (of regulated corrector), $Z(p)$ – input load impedance

Schemat strukturalny generatora samowzbudnego zawiera dwie pętle sprzężenia zwrotnego I i II, przy czym pętla I zapewnia dodatnie sprzężenie zwrotne, a pętla II ujemne. Schemat strukturalny dwupętlowego układu zamkniętego, przedstawionego na rysunku 4, za pomocą strukturalnych przekształceń, doprowadzono do prostszego jednopętlowego schematu, w którym nieliniowe ogniwo zostało ulokowane w odrębnej gałęzi, przy zachowaniu pierwotnego wymuszenia na jego wejściu (rys. 5)

$$W_1(p) = K_1(p)K_p(p)K_f(p)Z(p) \quad (3)$$

$$W_2(p) = 1 - \frac{K_2(p)}{W_1(p)} \quad (4)$$



Rys. 5. Przekształcenia schematu strukturalnego generatora samowzbudnego; objaśnienia jak na rysunku 4

Fig. 5. Transformation of diagram of structural self-excited generator; notation as for Fig. 4

Wymuszeniem dynamicznego układu zamkniętego, przedstawionego na rysunku 5c, są fluktuacje elektryczne. Transmitancja tego układu dla wymuszenia ma postać

$$F(A, p) = \frac{J(A)W_1(p)}{1 - J(A)K_{sz}(p)W_1(p)W_2(p)} = \frac{J(A)W_1(p)}{1 - J(A)K_{sz}(p)[W_1(p) - K_2(p)]} \quad (5)$$

W celu uproszczenia analizy założono, że nieliniowy element czynny ma amplitudową charakterystykę zbliżoną do nieliniowości ciągłej typu nasycenie. Rodzina typowych amplitudowych charakterystyk nieliniowego ogniwa typu nasycenie została przedstawiona na rysunku 6a. Wykresy charakterystyk amplitudowych przedstawione na tym rysunku odpowiadają charakterystyce współczynnika przenoszenia elementu czynnego (wzmacniacza), zbudowanego na jednym tranzystorze mocy i pracującego w różnych trybach pracy. Charakterystyka amplitudowa takiego elementu może być aproksymowana za pomocą odpowiedniego wielomianu o stosunkowo niskim stopniu lub za pomocą różniczkowalnych jednoznacznych funkcji analitycznych, na przykład za pomocą funkcji wykładniczej lub liniowej kombinacji sinusów. W celu uproszczenia analizy w tym przypadku, zależność współczynnika wzmocnienia czynnego elementu przedstawiono w postaci

$$J(A) = ce^{-A^n} \quad (6)$$

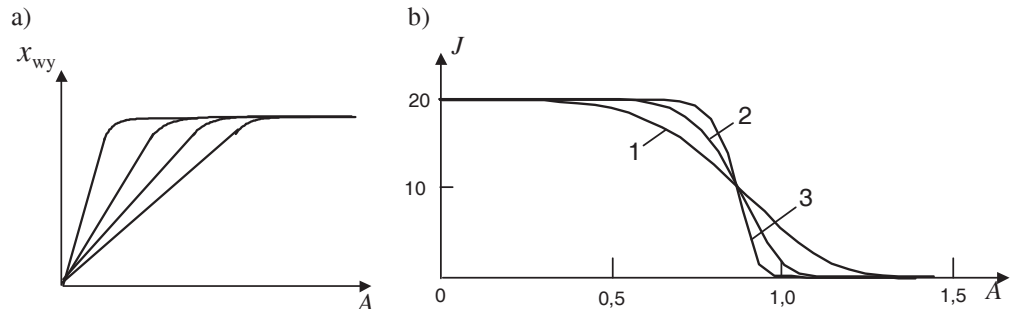
Wykresy funkcji J(A) dla różnych wartości parametru n zostały przedstawione na rysunku 6b.

Z kolei, nieliniowa charakterystyka napięciowo-prądowa każdej z diod prostownika o transmitancji $K_p(p)$, zwykle jest aproksymowana za pomocą funkcji wykładniczej lub linią łamaną. Jeżeli pasmo częstotliwości roboczych mieści się w zakresie kilohercowym, to diodę można rozpatrywać jako element bierny pozbawiony bezwładności. Zatem, transmitancja prostownika

$$K_p(p) = \frac{R_\gamma}{1 + R_\gamma} = k_p \quad (7)$$

gdzie:

γ – nachylenie charakterystyki napięciowo-prądowej diody,
 R – rezystancja obciążenia prostownika.



Rys. 6. Wykresy (a) typowych amplitudowych charakterystyk nieliniowego ogniwa typu nasycenie oraz wykresy (b) jego współczynnika przenoszenia $J(A)$, obliczone według analitycznej zależności (6) dla: $c = 20, n = 5$ (krzywa 1); $c = 50, n = 10$ (krzywa 2); $c = 20, n = 20$ (krzywa 3)

Fig. 6. Diagrams (a) of typical amplitude characteristics of non-linear element of saturation type, as well as diagrams (b) of its coefficient of transfer $J(A)$, calculated by an analytic formula (6) for: $c = 20, n = 5$ (curve 1); $c = 50, n = 10$ (curve 2); $c = 20, n = 20$ (curve 3)

Równania zasadnicze rozgałęznika w kierunku zacisków wyjściowych można zapisać w postaci (Dyrektywa Parlamentu... 1994):

$$u_1 = (r_1 + pL_1)i_1 + M_{1-2}pi_2 \quad (8)$$

$$0 = (r_2 + pL_2)i_2 + M_{1-2}pi_1 + u_2 \quad (9)$$

gdzie:

r_1, r_2, L_1, L_2 – odpowiednio rezystancja i indukcyjność pierwszego i drugiego uzwojenia rozgałęznika,

M_{1-2} – współczynnik wzajemnej indukcji tych uzwojeń.

Rozwiązując równania (8) i (9) można zapisać

$$\left[(T_1T_2 - T_3^2)p^2 + (T_1 + T_2)p + 1 \right] u_2(t) = \pm \frac{M_{1-2}Z(p)}{r_1[Z(p) + r_2]} k_1 \tau_1 p u_1(t) \quad (10)$$

$$\text{gdzie: } T_1 = \frac{L_1}{r_1}, \quad T_2 = \frac{L_2}{Z(p) + r_2}, \quad \tau_{1r} = \frac{M_{1-2}}{r_1}, \quad T_3 = \sqrt{\frac{M_{1-2}^2}{r_1[Z(p) + r_2]}}, \quad k_1 = \frac{Z(p)}{Z(p) + r_2}$$

Znakiem (+) lub (-), przed prawą częścią równania (10), określa się wzajemne usytuowanie uzwojeń rozgałęźnika i kierunek prądu w tych uzwojeniach. W celu uproszczenia rozważań przyjęto warunki, dla których strumienie magnetyczne w tych uzwojeniach dodają się, a znak przed prawą częścią równania (10) jest dodatni.

O ile w transformatorze z ferromagnetycznym rdzeniem $M_{1-2} \approx 1$ to $M_{1-2} \approx \sqrt{L_1 L_2}$ i $L_1 L_2 - M_{1-2}^2 \approx 0$ [5]. Wtedy $T_1 T_2 - T_3^2 \approx 0$ i zakładając, w celu uproszczenia analizy, że $|Z(p)| \gg r_{1r}$ i r_{2r} , równanie (10) można zapisać w postaci

$$[(T_1 + T_2)p + 1]u_2(t) = \tau_{1p} u_1(t) \quad (11)$$

a transmitancję rozgałęźnika w kierunku zacisków wyjściowych

$$K_1(p) = \frac{\tau_{1p}}{(T_1 + T_2)p + 1} \quad (12)$$

Stosując analogiczne rozważania, transmitancję rozgałęźnika w kierunku sprzężenia zwrotnego można zapisać jako

$$K_2(p) = \frac{\tau_{2p}}{(T_1 + T_3)p + 1} \quad (13)$$

gdzie:

$$T_1 = \frac{L_1}{r_1}, \quad T_3 = \frac{L_3}{Z_{sz}(p) + r_3}, \quad \tau_2 = \frac{1}{r_3}, \quad r_3, L_3 - \text{odpowiednio rezystancja i indukcyj-}$$

ność trzeciego uzwojenia rozgałęźnika,

$Z_{sz}(p)$ – impedancja wejściowa układu sprzężenia zwrotnego (korektora regulowanego).

Podstawą układu sprzężenia zwrotnego jest korektor regulowany, przeznaczony do sterowania warunkiem amplitudy i fazy powstania generacji drgań periodycznych w zamkniętym układzie dynamicznym. W sensie strukturalnym postać ogólną regulowanego korektora stanowi szóstnik, którego charakterystyka przenoszenia jest regulowana przez zmianę wartości rezystancji. Typowym przykładem takiego szóstnika z jedną sterowaną rezystancją jest korektor regulowany Bode'a lub Oswalda (Analogowe systemy... 1979). W celu uproszczenia analizy korektor regulowany można również rozpatrywać jako czwórnik, w którym impedancja wybranej gałęzi jest funkcją sygnału sterującego. Przy wykorzystywaniu generatora samowzbudnego do zapewnienia iskrobezpieczeństwa elektrycznego obwodu wyjściowego, najbardziej korzystne jest wygenerowanie sygnału sterującego w sposób zapewniający realizację zależności (2).

Zależność transmitancji zamkniętego układu dynamicznego od transmitancji korektora regulowanego jest uwzględniana za pomocą drugiej pętli sprzężenia zwrotnego (rys. 4).

Współczynnik transmitancji układu sprzężenia zwrotnego w postaci ogólnej można zapisać jako

$$K_{sz}(p) = \frac{\sum_{n=0}^M \alpha_n (p)^n}{\sum_{n=0}^N b_n (p)^n} \quad (14)$$

Badanie właściwości wielomianów $a_n(p)^n$ i $b_n(p)^n$ pozwala na ustalenie warunków wrażliwości współczynnika transmitancji $K_{sz}(p)$ od parametrów elementów układu sprzężenia zwrotnego. Dla najbardziej efektywnego sterowania warunkami amplitudy i fazy generatora samowzbudnego układ sprzężenia zwrotnego powinien być nieminimalnofazowym.

Na przykład, dla minimalnofazowego i nieminimalnofazowego układu, transmitancja każdego jest odpowiednio równa:

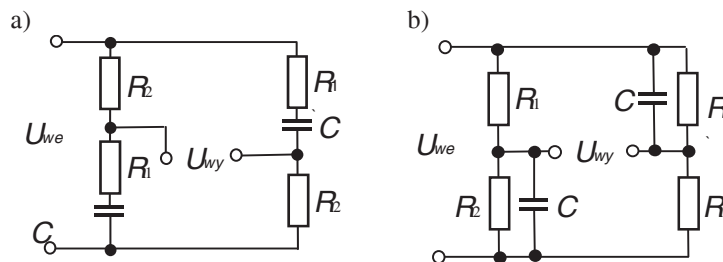
$$K_{sz_1}(j\omega) = k \frac{1 + j\omega T_{sz_1}}{1 + j\omega T_{sz_2}} \quad \text{i} \quad K_{sz_2}(j\omega) = k \frac{1 - j\omega T_{sz_1}}{1 + j\omega T_{sz_2}}$$

Zakładając, że $T_{sz_2} = T_{sz}$, $T_{sz_1} = \alpha T_{sz}$, $k = 1$, przesunięcie fazowe między sygnałem wejściowym a wyjściowym wynosi:

$$\varphi_1(\omega) = \arctg \frac{\omega T_{sz} (\alpha - 1)}{1 + \alpha \omega^2 T_{sz}^2}; \quad \varphi_2(\omega) = -\arctg \frac{\omega T_{sz} (\alpha + 1)}{1 - \alpha \omega^2 T_{sz}^2}$$

Łatwo można przekonać się, że przy dowolnym $\alpha \varphi_2(\omega) > \varphi_1(\omega)$.

Do kategorii nieminimalnofazowych układów należy zaliczyć różnorakie przesuwniki fazy, różnego rodzaju układy mostkowe, układy kształtu „T z bocznikowane” i inne. Wybór i realizacja regulowanego korektora są odrębnymi zagadnieniami i nie zostały omówione w niniejszym artykule. Można założyć, że jako układ sprzężenia zwrotnego jest stosowany mostkowy RC czwórnik (rys. 7).



Rys. 7. Schematy mostkowego RC czwórnika

Fig. 7. Diagrams of bridged RC network

Transmitancję mostkowego RC czwórnika można zapisać jako

$$K_{sz}(p) = k \frac{1 - pT_0}{1 + pT} \quad (15)$$

Przy czym, dla schematu przedstawionego na rysunku 7a $T_0 = (R_2 - R_1)C$, $T = (R_1 + R_2)C$, $k = 1$ i $R_2 > R_1$, a dla schematu przedstawionego na rysunku 7b $k = (R_2 - R_1)/(R_1 + R_2)$, $T_0 = (R_1 R_2 / R_1 - R_2)C$, $T = (R_1 R_2 / R_1 + R_2)C$. Jeżeli zamiast jednego ze stałych rezystorów zastosuje się rezystor o zmiennej wartości, można dokonać przesunięcia w szerokim zakresie fazy sygnału wyjściowego w stosunku do sygnału wejściowego.

Z kolei w postaci obciążenia może występować pasywny lub reaktancyjny dwójnik o impedancji zespolonej $Z_o(p)$ lub tor przesyłowy. W przypadku obciążenia w postaci dwójnika $Z(p) = Z_o(p)$, a w przypadku toru przesyłowego $Z(p)$ jest równa impedancji falowej toru. W stanie ustalonym, przy zasilaniu urządzeń elektronicznych prądem stałym, impedancja falowa jest rezystancją bierną, a w stanie przejściowym, zwłaszcza przy włączeniu zasilania, impedancja falowa toru przesyłowego ma reaktancyjny charakter. Filtr wygładzający, obciążony dwójnikiem reaktancyjnym, można przedstawić w postaci szeregowego połączenia ogniwa aperiodycznego i całkującego o transmitancji

$$K_{fo}(p) = \frac{k_f k_o}{\left[(T_f + T_o)p + 1 \right] p} \quad (16)$$

gdzie k_f , k_o , T_f i T_o – odpowiednio współczynnik przenoszenia i stała czasowa filtra wygładzającego i obciążenia.

Jeżeli w wyrażeniach (12), (13) i (16) zastosuje się następujące oznaczenia $T_{12} = T_1 + T_2$, $T_{13} = T_1 + T_3$, $T_{fo} = T_f + T_o$, to po uwzględnieniu transmitancji poszczególnych ogniw, wyrażenie (5) uzyskuje postać

$$F(A, p) = \frac{J(A)k_e(T_{13}p+1)(Tp+1)}{(T_{13}p+1)(T_{12}p+1)(T_{fo}p+1)(Tp+1) + J(A)(T_0p-1) \left[k_e(T_{13}p+1) - \tau_2(T_{12}p+1)(T_{fo}p+1)p \right]} \quad (17)$$

gdzie $k_e = \tau_1 k_p k_f k_o$.

Wyrażenie (17) można przedstawić w postaci ogólnej jako

$$F(A, p) = \frac{J(A)k_e \sum_{n=0}^2 a_n p^n}{\sum_{n=0}^4 b_n p^n} \quad (18)$$

gdzie:

$$a_2 = T_{13}T; \quad a_1 = T_{13} + T; \quad a_0 = 1;$$

$$b_4 = T_{13}T_{12}T_fT - J(A)T_{13}T_0T_f\tau_2;$$

$$\begin{aligned} b_3 &= T_{13}T_{12}T_f + T_{13}T_{12}T + T_{13}T_fT + T_{12}T_fT + J(A)(T_{12}T_f\tau_2 - T_{12}T_0\tau_2 - T_0T_f\tau_2); \\ b_2 &= T_{13}T_f + T_{13}T + T_{12}T_f + T_{12}T + T_{13}T_{12} + T_fT + J(A)(T_{13}T_0k_e + T_{12}\tau_2 + T_f\tau_2 - T_0\tau_2); \\ b_1 &= T_{13} + T_{12} + T_f + T + J(A)(T_0k_e + \tau_2 - T_{13}k_e); \quad b_0 = 1 - J(A)k_e. \end{aligned}$$

Z kolei wyrażenie dla charakterystycznego równania układu ochronnego można zapisać w postaci

$$b_4p^4 + b_3p^3 + b_2p^2 + b_1p + 1 - J(A)k_e = 0 \quad (19)$$

Część rzeczywista wyrażenia (15) ma postać

$$\operatorname{Re}[F(A, p)] = \frac{J(A)k_e [(b_4\omega^4 - b_2\omega^2 + b_0)(1 - a_2\omega^2) + (b_3\omega^3 - b_1\omega)a_1\omega]}{(b_4\omega^4 - b_2\omega^2 + b_0)^2 + (b_3\omega^3 + b_1\omega)^2} \quad (20)$$

Część urojona wyrażenia (15) jest następująca

$$\operatorname{Im}[F(A, p)] = -j \frac{J(A)k_e [(b_3\omega^3 - b_1\omega)(1 - a_2\omega^2) - (b_4\omega^4 - b_2\omega^2 + b_0)a_1\omega]}{(b_4\omega^4 - b_2\omega^2 + b_0)^2 + (b_3\omega^3 + b_1\omega)^2} \quad (21)$$

PODSUMOWANIE

Wyrażenia analityczne dla transmitancji po wymuszeniu jej części rzeczywistej i urojonej, a także równanie charakterystyczne dla układów ochronnych iskrobezpiecznych obwodów elektrycznych, uzyskane na podstawie strukturalnego przedstawienia tych układów w postaci nieliniowego dynamicznego układu, zawierającego dwie pętle sprzężenia zwrotnego, dodatnią i ujemną, pozwalają, z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego:

- a priori przekonać się o iskrobezpieczeństwie obwodu elektrycznego zasilanego za pomocą układów ochronnych z wykorzystaniem generatorów samowzbudnych,
- na dokonanie analizy stopnia wrażliwości iskrobezpieczeństwa chronionego obwodu elektrycznego w zależności od zmian parametrów elementów elektronicznych układu ochronnego,
- na estymowanie charakterystyki procesu powstawania i zrywania drgań periodycznych w generatorach samowzbudnych w zależności od parametrów elementów elektronicznych i obciążenia,
- na ocenianie niezawodności układów ochronnych i ich wpływu na bezpieczeństwo funkcjonalne systemów kontroli parametrów technologicznych i bezpieczeństwa pracy.

Literatura

1. Analogowe systemy teletransmisyjne (1979): Praca zbiorowa pod redakcją W. Barjasza. Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 marca 1994 r. w sprawie ujednoczenia przepisów prawnych państw członkowskich, dotyczących urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, 94/9/WE ATEX 100A.
3. Golde W. (1976): Układy elektroniczne. Tom II. Warszawa, WNT.
4. Kuta S., Krajewski G., Jaselski J. (1994): Układy elektroniczne. Część druga. Kraków, Wydaw. AGH.
5. Nowicki W. (1971): Podstawy teletransmisji. Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności.
6. PN-EN 60079-11. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Wykonanie iskrobezpieczne „i”.
7. Skoropacki W. (2005): Zapewnienie iskrobezpieczeństwa systemów zdalnego zasilania przez stosowanie układów ochronnych z nieliniową charakterystyką wyjściową. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4.
8. Szerszeń J. (1961): Generatory tranzystorowe. Warszawa, PWN.

Recenzent: dr inż. Stanisław Trzcionka