

Witalij Skoropacki*, Stanisław Trzcionka**

OPIS MATEMATYCZNY WPLYWU INDUKCYJNOŚCI WE WNEĘTRZNEJ ŹRÓDŁA ZASILANIA NA ISKROBEZPIECZEŃSTWO OBCIĄŻENIA

Streszczenie

Indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania występuje w postaci konkretnych skupionych elementów, na przykład uzwojenia transformatorów separujących, cewki filtrów przeciwzakłóceńowych itp. W niektórych przypadkach oddziaływanie negatywne tych elementów indukcyjnych na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego można kompensować lub nawet wykorzystać do zwiększenia iskrobezpieczeństwa obwodu zewnętrznego źródła zasilania, szczególnie przy zastosowaniu nieliniowych układów ochronnych, zapewniających iskrobezpieczeństwo, ze względu na ich większy współczynnik przenoszenia energii elektrycznej w porównaniu z liniowymi układami ochronnymi.

W artykule opisano modele matematyczne do estymacji wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego przy stosowaniu układów ochronnych z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową typu *fold-back*, dla różnych impedancji obciążenia. Uzyskane analityczne wyrażenia do estymacji energii elektrycznej wydzielonej w kanale wylądowania elektrycznego, wskutek oddziaływania źródła zasilania, jego indukcyjności wewnętrznej oraz parametrów obciążenia, pozwalają z wykorzystaniem wspomagania komputerowego a priori określić stopień iskrobezpieczeństwa obwodu elektrycznego, jak również dokonać analizy wrażliwości iskrobezpieczeństwa tego obwodu w zależności od zmian parametrów elektrycznych poszczególnych elementów.

Stwierdzono, że wpływ indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania zależy od impedancji wejściowej obwodu chronionego, jak również od charakteru komutacji awaryjnej, zwarcia lub rozwarcia w tym obwodzie.

Przy pojemnościowym charakterze obciążenia w chwili powstania zwarcia na wyjściu źródła zasilania obecność indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania łagodzi jego oddziaływanie, zmniejszając szybkość wzrostu prądu i wartości energii elektrycznej, wyzwalanej w punkcie zwarcia, nowelizując przy tym skutki opóźnienia zadziałania układu ochronnego.

Przy obciążeniu typu *RL* w chwili powstania rozwarcia na wyjściu źródła zasilania około 20% energii magnetycznej, zgromadzonej w indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania, jest wydzielane w kanale wylądowania elektrycznego, natomiast przy zadziałaniu układu ochronnego, dokonującego zwarcia zacisków wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej, wartość ta jest do pominięcia. W warunkach rzeczywistych występuje opóźnienie zadziałania układu ochronnego od chwili powstania komutacji awaryjnej, które powinno być uwzględnione przy symulacji zmiany w czasie rezystancji układu ochronnego lub przy obliczeniu odpowiednich całek w sposób numeryczny.

Mathematical description of the effect of internal inductance of the supply source on the intrinsic safety of the load

Abstract

The internal inductance of the supply source appears in the form of defined self-contained elements, for example winding of separating transformers, coil of anti-interference filters and the like. In some

* Główny Instytut Górnictwa.

** Główny Instytut Górnictwa – Kopalnia Doświadczalna „Barbara”.

cases the negative influence of these inductive elements on the intrinsic safety of the output circuit can be compensated or even used to increase the intrinsic safety of the external circuit of supply source, particularly by applying non-linear protective systems that guarantee the intrinsic safety, on account of their higher coefficient of electric energy transfer, as compared to the linear protective systems.

The paper presents mathematical models for estimation of the effect of internal inductance of the supply source on intrinsic safety of the output circuit, when applying protective systems with non-linear fold-back type current-voltage characteristics, for various impedances of the load. The analytic expressions obtained for estimation of electric energy generated in a channel of electrical discharge, as a result of the effect of the supply source, its internal inductance and load parameters, enable, by using computer assistance, to determine a priori the level of intrinsic safety of the electric circuit, as well as to carry out an analysis of this circuit intrinsic safety sensitivity, depending on the changes of electrical parameters of individual parameters.

It has been found that the effect of internal inductance of the supply source depends on the input impedance of the protected circuit, as well as on the nature of emergency commutation, short-circuit or break in this circuit.

With the capacitive character of load at the moment of short-circuit occurrence at the output of the supply source, the presence of the internal inductance of the supply source mitigates its effect, by reducing the rate of rise and the value of electric energy liberated in the point of short-circuit, at the same time modifying the effects of the delay of the protective system activation.

With the load of RL type at the moment of circuit breaking occurrence, at the output of the supply source, about 20% of magnetic energy accumulated in the internal inductance of the supply source is being liberated into the electrical discharge channel, whereas with the of protective system operating, causing short-circuiting of the output clamps of the supply source at the moment of emergency commutation, this value can be omitted. In the real conditions there is a delay in activation of the protective system since the moment of emergency commutation occurrence that should be taken into consideration when simulating the time change of the protective system resistance, or when computing appropriate integrals.

WPROWADZENIE

Indukcyjność wewnętrzna, w różnym stopniu, występuje praktycznie we wszystkich źródłach zasilania, od zasilaczy z zastosowaniem przetwornic AC/DC lub DC/DC do źródeł elektrochemicznych.

Przy organizacji iskrobezpiecznego zasilania maksymalny stosunek zewnętrznych indukcyjności do rezystancji L_o/R_o , jakie mogą być podłączone do źródła zasilania z liniową charakterystyką prądowo-napięciową, określa się za pomocą znanego wzoru empirycznego, podanego w p. 6.2.3 normy PN-EN 60079-11. Wzór ten określa zależność tego stosunku od rezystancji i indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania, minimalnej energii zapłonu medium palnego oraz od maksymalnej wartości napięcia źródła zasilania bez obciążenia. Uwzględniono w nim także współczynnik bezpieczeństwa 1,5 dotyczący prądu obciążenia. Jednak stosowanie tego wzoru ogranicza się do warunku, gdy maksymalna pojemność wewnętrzna C_i odniesiona do zacisków wyjściowych źródła zasilania nie przekracza 1% wartości maksymalnej pojemności zewnętrznej C_o .

W związku z tym, że indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania występuje w postaci konkretnych skupionych elementów, na przykład uzwojenia transformatorów separujących, cewki filtrów przeciwzakłóceń itp., to w niektórych przypadkach oddziaływanie negatywne tych elementów indukcyjnych na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego można kompensować lub nawet wykorzystać w celu podniesienia

poziomu iskrobezpieczeństwa obwodu zewnętrznego źródła zasilania, szczególnie przy zastosowaniu nieliniowych układów ochronnych, zapewniających iskrobezpieczeństwo, ze względu na ich większy współczynnik przenoszenia energii elektrycznej w porównaniu z liniowymi układami ochronnymi.

W artykule opisano modele matematyczne do estymacji wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na iskrobezpieczeństwo obwodu wyjściowego przy stosowaniu układów ochronnych z nieliniową charakterystyką prądowo-napięciową typu *fold-back*, dla różnych impedancji obciążenia.

1. ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PRZY POWSTANIU ZWARCIA W OBWODZIE WYJŚCIOWYM ŹRÓDŁA ZASILANIA

Analizę wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na zależności energetyczne przy powstaniu zwarcia w układzie: źródło zasilania – układ ochronny z nieliniową charakterystyką wyjściową – obciążenie, przeprowadzono na podstawie elektrycznych schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 1.

Dla schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 1a i 1c, przy powstaniu zwarcia za pomocą klucza K , prąd I_k , napięcie U_k i R_k kanału wyładowania elektrycznego wynosi

$$\left. \begin{aligned} I_k &= 0, U_k = U_{C_0}, R_k = \infty \text{ dla } t = 0 \\ I_k &= I_k(t), U_k = U_k(t), R_k = R_k(t) \text{ dla } 0 \leq t \leq t_w \\ I_k &= I_{ust}, U_k \approx 0, R_k \approx 0, \text{ dla } t > t_w \end{aligned} \right\} (1)$$

gdzie:

t_w – czas trwania wyładowania elektrycznego,

$I_k = I_{ust} = E/2r$ – prąd ustalony dla $t > t_w$,

U_{C_0} – wartość napięcia naładowanego kondensatora, dla $t = 0$ $U_{C_0} = E$.

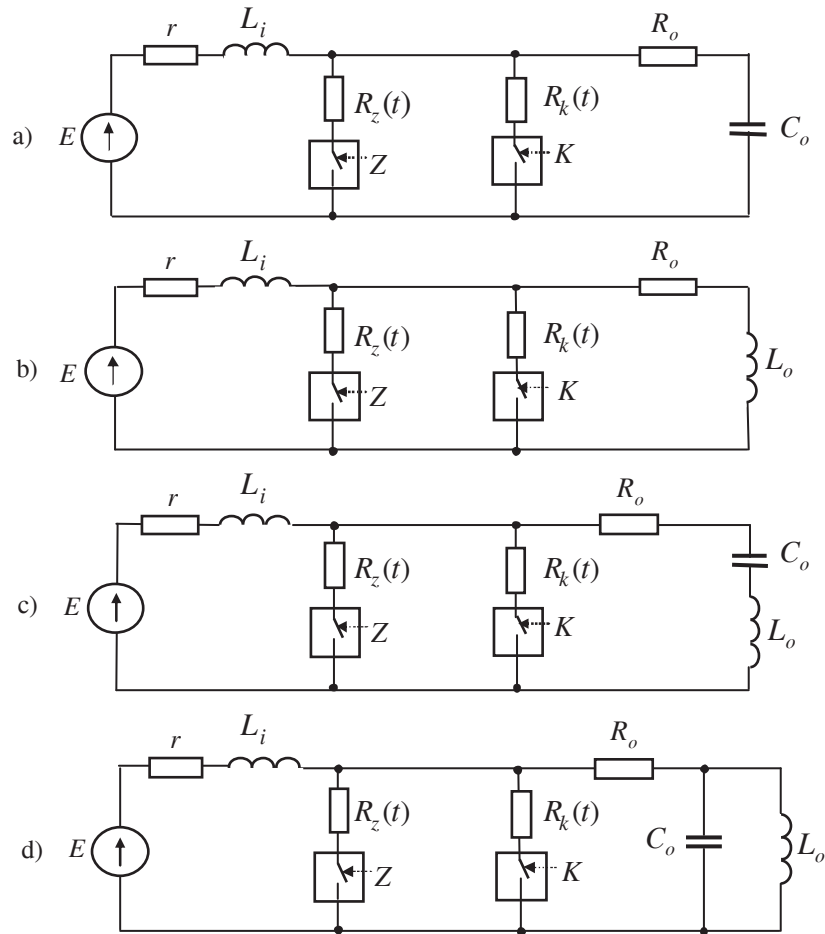
Z kolei, dla schematów zastępczych przedstawionych na rysunkach 1b i 1d:

$$\left. \begin{aligned} I_k &= 0, U_k = U_{k_0}, R_k = \infty \text{ dla } t = 0 \\ I_k &= I_k(t), U_k = U_k(t), R_k = R_k(t) \text{ dla } 0 \leq t \leq t_w \\ I_k &= I_{ust}, U_k = 0, R_k \approx 0, \text{ dla } t > t_w \end{aligned} \right\} (2)$$

przy czym dla $t = 0$ $U_k = U_{k_0} = E - Er/(r + R_0)$, a dla $t > t_w$, zakładając że $R_k \approx R_z \approx 0$, $I_k = I_{ust} = E/2r$.

Zmiana $R_k(t)$ dla $0 \leq t \leq t_w$ jest procesem losowym zależnym od różnych czynników. Zachowanie się „przeźreni międzyelektrodowej” w momencie wystąpienia iskry opisał wielu autorów. Na przykład Ciok (1983) omówił modelowanie matematyczne łuku przeprowadzone dla warunków, kiedy energia elektryczna doprowadzona do łuku z zewnętrznego źródła zasilania była wielokrotnie większa od energii elektrycznej zgromadzonej w elementach reaktancyjnych obwodu elektrycznego. Omówił także modelowanie przeprowadzone dla styków dociskanych przed rozwarciem.

Z kolei z publikacji Lindmanowskiego (1988) wynika, że w zależności od wartości średniej prądu wyładowania mogą wystąpić niezupełne (np. jarzeniowe) oraz zupełne wyładowania, przy wartości średniej prądu powyżej 10^{-3} A, w postaci łuku elektrycznego.



Rys. 1. Podstawowe schematy zastępcze układu elektrycznego w trybie zwarcia: E – źródło zasilania, K – klucz symulujący punkt komutacji awaryjnej (zwarcie), Z – klucz (zwiernik) symulujący układ ochronny o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, r i L_i – odpowiednio rezystancja i indukcyjność wewnętrzna źródła zasilania, R_o , L_o , C_o – odpowiednio rezystancja, indukcyjność i pojemność obciążenia, $R_k(t)$ – funkcja symulująca zmianę rezystancji kanału wyładowania w czasie, $R_z(t)$ – funkcja symulująca zmianę rezystancji układu ochronnego w czasie

Fig. 1. The basic substitute schemes of the electric system in the short-circuit mode: E – supply source, K – key simulating the point of emergency commutation (short-circuit), Z – key (short circuiting switch) simulating the protective system with the non-linear current-voltage characteristics, r and L_i – appropriately resistance and the internal inductance of supply source, R_o , L_o , C_o – resistance, inductance and load capacitance, respectively, $R_k(t)$ – function simulating the change of resistance of the discharge channel in time, $R_z(t)$ – function simulating the change of resistance of the protective system in time

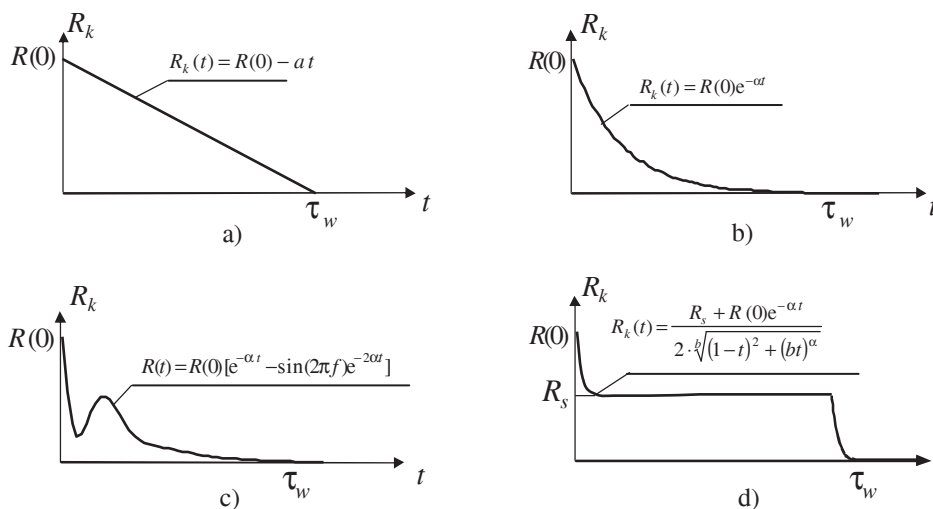
Po wystąpieniu krótkotrwałego łuku elektrycznego w postaci iskry decydującym czynnikiem, pod względem iskrobezpieczeństwa jest wartość wyzwalanej energii w kanale wyładowania. Zgodnie z ciepłym modelem zapłonu opisanym w publikacji Frączka (1995) energia wyładowania jest konwertowana w energię ciepłą, przy czym wartość tej energii i czas konwertowania są charakterystyczne dla konkretnej mieszanki wybuchowej w określonych warunkach stężenia, temperatury i ciśnienia. Mają na to wpływ, tzw. odległość krytyczna (odstęp międzyelektrodowy), po przekroczeniu której jądro zapłonu zanika, materiały z których są wykonane elektrody, ich kształt oraz szybkość ich przemieszczania się w chwili powstania komutacji awaryjnej. Wszystkie te czynniki trudno jednocześnie uwzględnić w analitycznym modelu zachowania się „przestrzeni międzyelektrodowej”.

Jeżeli założy się następujące prawdopodobne warianty symulacji przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania zapoczątkowanego zwieraniem obwodu elektrycznego (rys. 2), a mianowicie:

- charakter liniowy $R_k(t) = R(0) - at$,
- charakter wykładniczy $R_k(t) = R(0)e^{-at}$,
- charakter wykładniczo-oscylicyjny, według zależności
 $R_k(t) = R(0)[e^{-at} \cdot \sin(2\pi ft) + 1](1 - e^{-2at})$,
- charakter z uwzględnieniem „samodopasowania” impedancji wejściowej kanału wyładowania do impedancji wyjściowej źródła energii elektrycznej

$$R_k(t) = (R_s + R(0)e^{\alpha t}) / 2 \cdot \sqrt{(1-t)^2 + (bt)^\alpha},$$

gdzie przez R_s oznaczono wartość rezystancji kanału wyładowania w trybie dopasowania, a i b są współczynnikami aproksymacji.



Rys. 2. Warianty przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania podczas zwierania obwodu elektrycznego
Fig. 2. Variants of the course of $R_k(t)$ function in a discharge process during short-circuiting of the electric circuit

W celu uproszczenia, do estymacji energii pochłanianej w kanale wyładowania elektrycznego można zastosować metodę superpozycji. A więc, w odniesieniu do schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 1, można zapisać

$$W_k = W_E + W_{L_i} + W_{L_o} + W_{C_o} \quad (3)$$

gdzie:

W_k – energia pochłaniana w kanale wyładowania elektrycznego,

W_E – energia dostarczona do kanału wyładowania ze źródła E w okresie $0-t_w$,

W_{L_i} – energia wyzwalana w kanale wyładowania wskutek transformacji elektromagnetycznej energii zmagazynowanej w indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania L_i ,

W_{L_o} – energia wyzwalana w kanale wyładowania za rachunek transformacji energii elektromagnetycznej zgromadzonej w indukcyjności obciążenia L_o ,

W_{C_o} – energia wyzwalana w kanale wyładowania wskutek energii elektrycznej zmagazynowanej w pojemności obciążenia C_o .

Jeżeli założyć się również, że rezystancja aktywna indukcyjności wewnętrznej L_i i indukcyjności obciążenia L_o może być pominięta lub potraktowana jako część składowa rezystancji wewnętrznej źródła zasilania r i rezystancji obciążenia R_o (rys. 1), to w odniesieniu do schematów zastępczych, przedstawionych na rysunku 1, energia W_E dla wariantów a–c jest równa

$$W_E = \int_0^{t_w} \frac{[I_E(t)R_\Sigma(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (4)$$

gdzie $I_E(t)$ jest prądem pobieranym ze źródła E

$$I_E(t) = \frac{E}{r + R_\Sigma(t)} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{r + R_\Sigma(t)}{L_i} t \right] \right\} \quad (5)$$

$$R_\Sigma(t) = \frac{R_z(t)R_k(t)}{R_z(t) + R_k(t)} \quad (6)$$

Z kolei, dla schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 1a $W_{L_o} = 0$ i $W_{L_i} = 0$, a

$$W_{C_o} = \int_0^{t_w} \frac{[I_{C_o}(t)R_\Sigma(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (7)$$

gdzie $I_{C_o}(t)$ jest prądem rozładowania pojemności C_o .

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{R_o + R_\Sigma(t)} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{[R_o + R_\Sigma(t)]C_o} \cdot t \right\} \quad (8)$$

W odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 1b, $W_{C_o} = 0$, zaś

$$W_{L_o} = \int_0^{t_w} \frac{[I_{L_o}(t)R_{\Sigma}(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (9)$$

$$W_{L_i} = \int_0^{t_w} \frac{[I_{L_i}(t)R_{\Sigma}(t)]^2}{R_k(t)} dt \quad (10)$$

gdzie: $I_{L_o}(t)$ i $I_{L_i}(t)$ – prąd w kanale wyładowania wskutek oddziaływania energii elektromagnetycznej zgromadzonej w indukcyjności odpowiednio L_o i L_i :

$$I_{L_o}(t) = \frac{E}{R_o + r} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_o} \cdot [R_o + R_{\Sigma}(t)] t \right\} \quad (11)$$

$$I_{L_i}(t) = \frac{E}{R_o + r} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i} [r + R_{\Sigma}(t)] t \right\} \quad (12)$$

Z kolei, w odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 1c $W_{L_o} = 0$ i $W_{L_i} = 0$.

Prąd rozładowania $I_{C_o}(t)$ pojemności C_o (Osikowski 1981)

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{\beta L_o} [1 - \exp(-\alpha t)] \operatorname{sh} \beta t \quad (13)$$

gdzie: $\beta = \sqrt{\alpha^2 - \omega_o^2}$; $\omega_o = 1/\sqrt{L_o C_o}$; $\alpha = [R_o + R_{\Sigma}(t)]/2 L_o$.

Charakter prądu rozładowania pojemności C_o zależy od relacji między wartościami elementów R_o , L_o , C_o oraz funkcjami $R_k(t)$ i $R_{\Sigma}(t)$. Rozpatrzenie wszystkich wariantów przekracza ramy niniejszego artykułu. Z tej przyczyny ograniczono się do rozpatrzenia tylko aperiodycznego procesu rozładowania pojemności C_o . Prąd rozładowania $I_{C_o}(t)$ pojemności C_o ma charakter aperiodyczny, jeżeli $R_o + R_{\Sigma}(t) > 2\sqrt{L_o/C_o}$.

W takim przypadku

$$I_{C_o}(t) = -\frac{U_{C_o}}{L_o} t [1 - \exp(-\alpha t)] \quad (14)$$

a energię W_{C_o} określa się wzorem (7).

W odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 1d, energia W_{L_i} i prąd $I_{L_i}(t)$ są określane wzorami odpowiednio (10) i (12). Z kolei wartość energii elektrycznej doprowadzonej do kanału wyładowania elektrycznego wskutek wyzwalaania energii elektrycznej zmagazynowanej w pojemności C_o oraz energii pola

magnetycznego zmagazynowanego w indukcyjności L_o również zależy od relacji między wartościami elementów R_o , L_o , C_o oraz funkcjami $R_k(t)$ i $R_\Sigma(t)$. Najbardziej „wydajnym” procesem wyzwania energii elektrycznej w kanale wyładowania elektrycznego jest proces aperiodyczny. W chwili komutacji awaryjnej $t = 0$ $I_{L_i}(0^-) = I_{L_o}(0^-) = E / (R_o + r + r_{L_o})$ a $U_{C_o}(0^-) = E r_{L_o} / (R_o + r + r_{L_o})$, gdzie r_{L_o} – rezystancja indukcyjności L_o . Wtedy

$$I_{C_o}(t) = \frac{E r_{L_o}}{(R_o + r + r_{L_o}) [R_o + R_\Sigma(t)]} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{[R_o + R_\Sigma(t)] C_o} t \right\} \quad (15)$$

$$I_{L_i}(t) = \frac{E}{R_o + r + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i} [r + R_\Sigma(t)] t \right\} \quad (16)$$

$$I_{L_o}(t) = \frac{E}{(R_o + r + r_{L_o})} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_o} [R_o + r_{L_o} + R_\Sigma(t)] t \right\} \quad (17)$$

a wartości W_{C_o} , W_{L_i} i W_{L_o} określają wzory odpowiednio (7), (9) i (10).

2. ZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNE PRZY POWSTANIU ROZWARCIA W OBWODZIE WYJSCIOWYM ŹRÓDŁA ZASILANIA

Analizę wpływu indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania na zależności energetyczne przy powstaniu rozwarcia w układzie: źródło zasilania – układ ochronny z nieliniową charakterystyką wyjściową – obciążenie, przeprowadzono na podstawie elektrycznych schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 3.

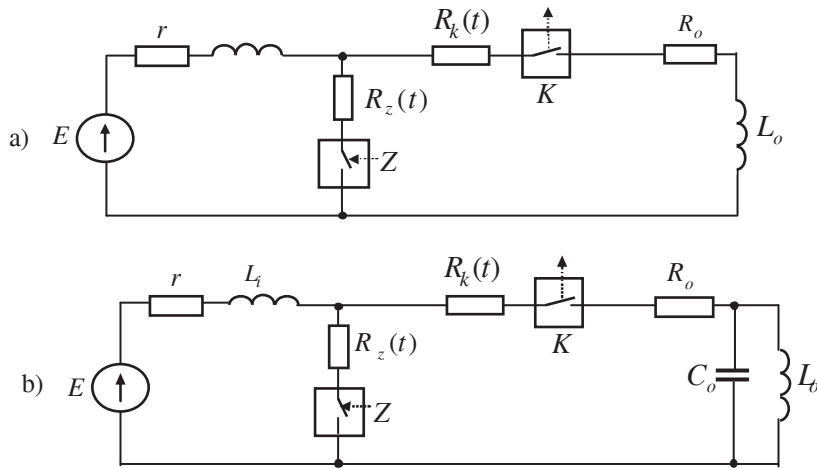
Przy rozwarciu za pomocą klucza K prąd I_k , napięcia U_k w kanale rozładowania i rezystancja R_k kanału wyładowania elektrycznego są następujące:

$$\left. \begin{aligned} I_k = I_{ust}, \quad U_k = U_{k_0}, \quad R_k \approx 0 & \quad \text{dla } t=0 \\ I_k = I_k(t), \quad U_k = U_k(t), \quad R_k = R_k(t) & \quad \text{dla } 0 \leq t \leq t_w \\ I_k = 0, \quad U_k = 0, \quad R_k \approx \infty & \quad \text{dla } t > t_w \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

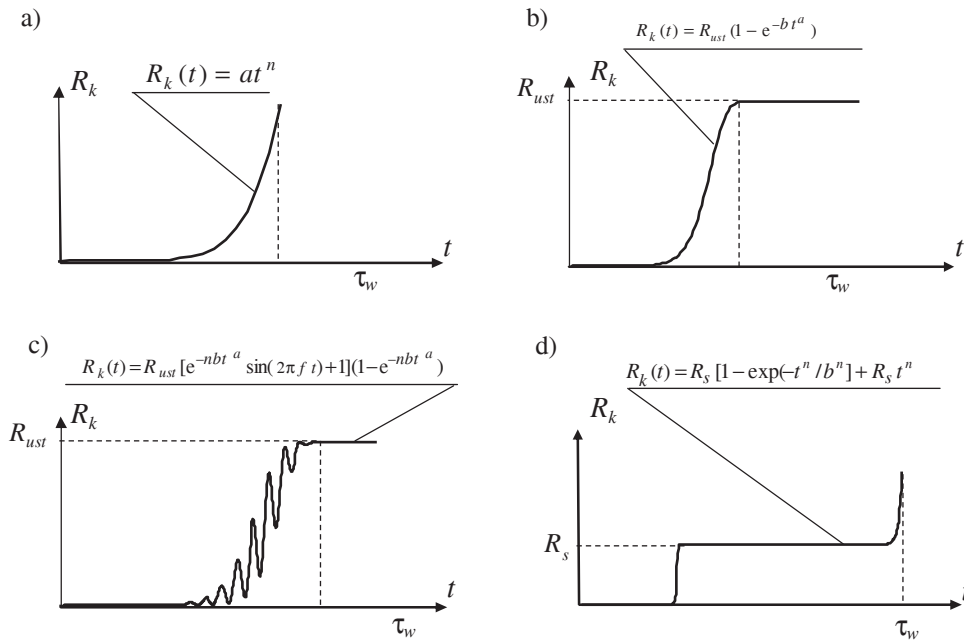
W celu uproszczenia analizy założono następujące prawdopodobne warianty symulacji przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania (rys. 4), a mianowicie:

- charakter potęgowy $R_k(t) = at^n$,
- charakter wykładniczy $R_k(t) = R_{ust} (1 - e^{-bt^a})$,
- charakter wykładniczo-oscylacyjny według zależności $R_k(t) = R_{ust} [e^{-nbt^a} \sin 2\pi f t + 1] (1 - e^{-nbt^a})$,
- charakter z uwzględnieniem „samodopasowania” impedancji wejściowej kanału wyładowania do impedancji wyjściowej źródła energii elektrycznej $R_k(t) = R_s [1 - \exp(-t^n/b^n)] + R_s t^n$, gdzie przez R_{ust} oznaczono wartość rezystancji kanału wyla-

dowania dla $t > t_w$, R_s jest wartością rezystancji kanału wyładowania w trybie dopasowania, a , b i n są współczynnikami aproksymacji.



Rys. 3. Podstawowe schematy zastępcze układu elektrycznego w trybie rozwarcia
Fig. 3. Basic substitute schemes of the electric system in breaking mode



Rys. 4. Warianty przebiegu funkcji $R_k(t)$ w procesie wyładowania podczas rozwierania obwodu elektrycznego
Fig. 4. Variants of the course of $R_k(t)$ function in a discharge process during breaking the electric circuit

Dla schematów zastępczych przedstawionych na rysunku 3 wartość energii elektrycznej pochłanianej w kanale jest również determinowana sumą wartości energii pochodzącej od źródła zasilania i energii zgromadzonej w poszczególnych elementach reaktancyjnych L_o , L_i , C_o .

W odniesieniu do schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 3a można zapisać

$$W_E = \int_0^{t_w} [I_E(t)]^2 R_k(t) dt \quad (19)$$

gdzie $I_E(t)$ – prąd w kanale wyładowania elektrycznego wymuszony przez oddziaływanie źródła zasilania.

W chwili $t=0^-$ $R_z(0^-) \approx \infty$, $R_k(0^-) \approx 0$, a prąd pobierany ze źródła zasilania $I_{\Sigma\Sigma}(0^-) = E/r + R_o + r_{L_o}$. W dalszym ciągu można zapisać

$$I_{\Sigma\Sigma}(t) = \frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i + L_o} \cdot [r + R_z(t)] \right\} t \quad (20)$$

$$I_E(t) = \frac{E - I_{\Sigma\Sigma}(t)r}{R_k(t) + R_o + r_{L_o}} \quad (21)$$

a następnie

$$W_{L_o} = \int_0^{t_w} [I_{L_o}(t)]^2 R_k(t) dt \quad (22)$$

$$I_{L_o}(t) = -\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_o} \cdot [R_o + r_{L_o} + R_k(t) + R_z(t)] \right\} t \quad (23)$$

$$W_{L_i} = \int_0^{t_w} \left[\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} - I_{L_i}(t)r \right]^2 \cdot \frac{1}{R_k(t)} dt \quad (24)$$

$$I_{L_i}(t) = -\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{L_i} \cdot [r + R_z(t)] \right\} t \quad (25)$$

We wzorach (20) i (25)

$$R_z(t) = \frac{R_z(t) [R_k(t) + R_o + r_{L_o}]}{R_z(t) + R_k(t) + R_o + r_{L_o}} \quad (26)$$

Z kolei, w odniesieniu do schematu zastępczego, przedstawionego na rysunku 3b, charakter prądu rozładowania zależy od relacji między wartościami elementów R_o , L_o , C_o oraz funkcjami $R_k(t)$ i $R_z(t)$. Ograniczono się do rozpatrzenia tylko aperiodycznego, tzn. najbardziej „wydajnego”, procesu wyzwiania energii elektromagnetycznej zgromadzonej w pojemności C_o i indukcyjności L_o .

W chwili $t=0^-$ prąd pobierany ze źródła zasilania $I_{ZZ}(0^-) = I_{L_i}(0^-) = I_{L_o}(0^-) = E/r + R_o + r_{L_o}$, $U_{C_o} = E$. Energię dostarczoną do kanału wyładowania ze źródła zasilania W_E określa się z wykorzystaniem wzorów (19), (20), (21) i (26), natomiast W_{L_o} i W_{L_i} określa się za pomocą wzorów (22), (23), (24) i (25), a W_{C_o} w tym przypadku można określić za pomocą wzorów:

$$W_{C_o} = \int_0^{t_w} [I_{C_o}(t)]^2 R_k(t) dt \quad (27)$$

$$I_{C_o}(t) = - \frac{U_{C_o}}{R_o + R_k(t) + R_z(t)} \cdot \exp \left\{ - \frac{1}{[R_o + R_k(t) + R_z(t)] C_o} t \right\} \quad (28)$$

3. PRZYKŁAD OKREŚLANIA WPŁYWU INDUKCYJNOŚCI WEWNĘTRZNEJ ŹRÓDŁA ZASILANIA PRZY POWSTANIU AWARYJNEGO ROZWARCIA W OBWODZIE WYJŚCIOWYM TYPU LR

W nawiązaniu do rysunku 3a można założyć następujące różne wartości parametrów obwodu elektrycznego:

$$E = 12, 24, 36, 48 \text{ i } 60 \text{ VDC};$$

$$r = 2 \Omega;$$

$$L_i = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3} \text{ i } 10^{-4} \text{ H};$$

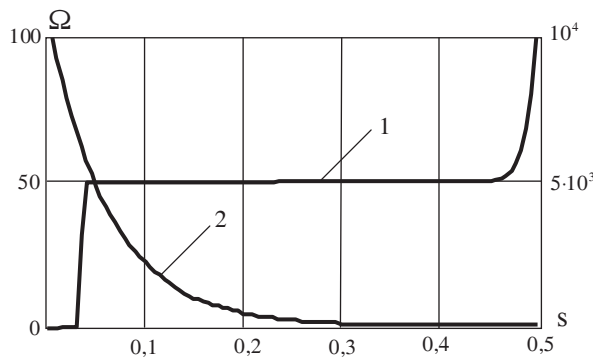
$$R_o = 20, 50 \Omega;$$

$$r_{L_o} = 2 \Omega;$$

$$R_k(t) = R_s [1 - \exp(-t^n/b^n)] + R_s t^n, R_s = 50 \Omega, b = 0,1, n = 100;$$

$$R_z(t) = R(0) - \exp(-at), R(0) = 10^4 \Omega, a = 10.$$

Wykresy funkcji $R_k(t)$ (krzywa 1) i $R_z(t)$ (krzywa 2) dla założonych parametrów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 5. Wykresy funkcji: 1 – $R_k(t)$ i 2 – $R_z(t)$

Fig. 5. Graphs of functions: 1 – $R_k(t)$ and 2 – $R_z(t)$

Wartość energii dostarczonej do kanału wyładowania elektrycznego za okres od 0 do 0,5 s wskutek wyzwania energii magnetycznej zgromadzonej w indukcyjności L_i określa się na podstawie wzorów (24), (25) i (26) jako

$$W_{L_i} = \int_0^{0,5} \left[\frac{E}{r + R_o + r_{L_o}} \right]^2 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{1}{L_i} [r + R_{\Sigma}(t)] t \right] \right\}^2 \frac{1}{R_k(t)} dt \quad (29)$$

Całkę (29) obliczono w sposób numeryczny z wykorzystaniem programu matematycznego Mathcad. Obliczenie W_{L_i} wykonano dla różnych wartości E , L_i , R_o , zaś wyniki obliczeń przedstawiono w tablicach 1 i 2.

Tablica 1. Wartość energii W_{L_i} wyzwanej w kanale wyładowania elektrycznego bez oddziaływania układu ochronnego zawierającego zaciski wyjściowe źródła zasilania

				E, VDC				
				12	24	36	48	60
R_o	20 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	2,5·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁵	2,2·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁵
			10 ⁻³ H	2,5·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁴	2,2·10 ⁻⁴	4,1·10 ⁻⁴	6,2·10 ⁻⁴
			10 ⁻² H	2,5·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	2,2·10 ⁻³	4,1·10 ⁻³	6,2·10 ⁻³
			10 ⁻¹ H	2,5·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	2,2·10 ⁻²	4,1·10 ⁻²	6,2·10 ⁻²
	50 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	4,9·10 ⁻⁷	1,9·10 ⁻⁶	4,4·10 ⁻⁶	7,9·10 ⁻⁶	1,2·10 ⁻⁵
			10 ⁻³ H	4,9·10 ⁻⁶	1,9·10 ⁻⁵	4,4·10 ⁻⁵	7,9·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁴
			10 ⁻² H	4,9·10 ⁻⁵	1,9·10 ⁻⁴	4,4·10 ⁻⁴	7,9·10 ⁻⁴	1,2·10 ⁻³
			10 ⁻¹ H	4,9·10 ⁻⁴	1,9·10 ⁻³	4,4·10 ⁻³	7,9·10 ⁻³	1,2·10 ⁻²

Tablica 2. Wartość energii W_{L_i} wyzwanej w kanale wyładowania elektrycznego przy zwarciu zacisków wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej typu „rozwarcie”

				E, VDC				
				12	24	36	48	60
R_o	20 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	1,1·10 ⁻¹¹	2,2·10 ⁻¹¹	3,3·10 ⁻¹¹	4,4·10 ⁻¹¹	5,5·10 ⁻¹¹
			10 ⁻³ H	1,5·10 ⁻¹⁰	3,0·10 ⁻¹⁰	4,6·10 ⁻¹⁰	5,1·10 ⁻¹⁰	7,2·10 ⁻¹⁰
			10 ⁻² H	1,7·10 ⁻⁹	2,3·10 ⁻⁹	2,2·10 ⁻⁹	5,3·10 ⁻⁹	8,2·10 ⁻⁹
			10 ⁻¹ H	2,5·10 ⁻⁸	5,1·10 ⁻⁸	6,2·10 ⁻⁸	9,1·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁷
	50 Ω	L_i	10 ⁻⁴ H	2,6·10 ⁻¹²	5,0·10 ⁻¹²	6,6·10 ⁻¹²	9,9·10 ⁻¹²	1,1·10 ⁻¹¹
			10 ⁻³ H	1,7·10 ⁻¹¹	3,0·10 ⁻¹¹	5,0·10 ⁻¹¹	6,9·10 ⁻¹¹	8,1·10 ⁻¹¹
			10 ⁻² H	3,6·10 ⁻¹⁰	7,0·10 ⁻¹⁰	1,0·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻⁹	1,7·10 ⁻⁹
			10 ⁻¹ H	2,1·10 ⁻⁹	4,0·10 ⁻⁹	6,1·10 ⁻⁹	7,9·10 ⁻⁹	1,0·10 ⁻⁸

PODSUMOWANIE

Uzyskane analityczne wyrażenia do estymacji energii elektrycznej wydzielonej w kanale wyładowania elektrycznego wskutek oddziaływania źródła zasilania, jego indukcyjności wewnętrznej oraz parametrów obciążenia pozwalają, z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego, a priori określić stopień iskrobezpieczeństwa obwodu

elektrycznego, jak również dokonać analizy wrażliwości iskrobezpieczeństwa tego obwodu w zależności od zmian parametrów elektrycznych poszczególnych jego elementów.

Można stwierdzić, że wpływ indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania zależy od impedancji wejściowej obwodu chronionego, jak również od charakteru komutacji awaryjnej, zwarcia lub rozwarcia w tym obwodzie.

Przy pojemnościowym charakterze obciążenia w chwili powstania zwarcia na wyjściu źródła zasilania obecność indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania łagodzi jego oddziaływanie i zmniejsza szybkość wzrostu prądu i wartości energii elektrycznej wyzwalanej w punkcie zwarcia, zmniejszając także skutki opóźnienia zadziałania układu ochronnego.

Przy obciążeniu typu RL , w chwili powstania rozwarcia na wyjściu źródła zasilania około 20% energii magnetycznej, zgromadzonej w indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania jest wydzielane w kanale wyładowania elektrycznego, natomiast przy zadziałaniu układu ochronnego, dokonującego zwarcia zacisków wyjściowych źródła zasilania w chwili powstania komutacji awaryjnej, wartość ta jest do pominięcia. Oczywiście w warunkach rzeczywistych występuje opóźnienie zadziałania układu ochronnego od chwili powstania komutacji awaryjnej.

Opóźnienie to powinno być uwzględnione przy symulacji zmiany w czasie rezystancji układu ochronnego lub przy obliczeniu odpowiednich całek w sposób numeryczny.

Literatura

1. Ciok Z. (1983): Procesy łączeniowe w układach energetycznych. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
2. Frączek J. (1995): Aparatura przeciwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym. Katowice, Śląskie Wydaw. Techniczne.
3. Lindmanowski W. (1988): Zarys teorii wyładowań w dielektrykach. Wyd. I. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
4. PN-EN 60079-11 Ed. 5.0: Electrical apparatus for explosive gas atmospheres Part 11: Intrinsic safety „i”.
5. PN-EN 60079-25. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 25: Systemy iskrobezpieczne.
6. Osowski J. (1981): Zarys rachunku operatorowego. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Henryk Passia