

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.103.0002

Mikołaj NOWAK*, Daniel KOWALAK*, Kazimierz JAKUBIUK*
Mirosław WOŁOSZYN*

BADANIE WPLYWU PARAMETRÓW UZWOJENIA GENERATORA MAGNETOKUMULACYJNEGO NA WSPÓLCZYNNIK WZMOCNIENIA PRĄDU

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zmian parametrów konstrukcyjnych cewki roboczej generatora magneto kumulacyjnego (FCG) na jego możliwości generacyjne, a zwłaszcza na współczynnik wzmocnienia prądu przy obciążeniu o charakterze indukcyjno-rezystancyjnym. W trakcie działania FCG jego indukcyjność i rezystancja maleją w wyniku zwierania uzwojenia przez rozszerzający się twornik. W wyniku tego pierwotny prąd zasilający uzwojenie generatora ulega wzmocnieniu. Zmieniając parametry konstrukcyjne cewki roboczej można wpływać na wartość współczynnika wzmocnienia prądu generatora. Przebieg zmian indukcyjności generatora w trakcie działania wyznaczono metodą numeryczną.

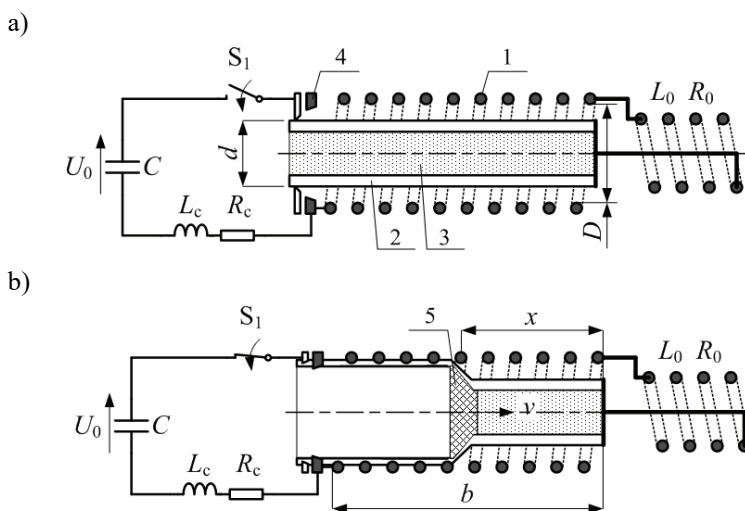
SŁOWA KLUCZOWE: generator magnetokumulacyjny, formowanie impulsów wielkiej mocy, symulacje komputerowe w obwodach elektrycznych.

1. WPROWADZENIE

Do przeprowadzania wielu badań o charakterze technicznym czy naukowym niezbędne jest wytwarzanie impulsów (ударów) prądowych o bardzo dużej amplitudzie (rzędu nawet MA) i stosunkowo dużych stromościach narastania (rzędu kA/ μ s). Uzyskanie tego rodzaju udaru prądowego, najczęściej w określonym obciążeniu o charakterze indukcyjno-rezystancyjnym (cewce indukcyjnej), może być realizowane z wykorzystaniem tzw. generatorów magnetokumulacyjnych (FCG) [1, 2] (rys. 1a). Zasada działania generatora FCG oparta jest o zjawisko kompresji pola magnetycznego wytworzonego w jego cewce roboczej, poprzez gwałtowną zmianę jej parametrów konstrukcyjnych (wymiarów lub liczby zwojów). Zmiana tych parametrów następuje w wyniku eksplozji odpowiednio ukształtowanego materiału wybuchowego. Początkowy strumień magnetyczny w cewce roboczej generatora może być wytworzony w wyniku przepływu prądu o wartości rzędu kA ze źródła pierwotnego, np. baterii kondensatorów C. W chwili osiągnięcia przez prąd wartości maksymalnej następuje zainicjowanie pracy generatora (np. detonacja materiału wybuchowego, który jest umieszczony współosiowo względem cewki roboczej generatora wewnątrz twornika (rys. 1b).

* Politechnika Gdańska

Deformacja twornika wywołana wybuchem powoduje w pierwszej chwili zwarcie zacisków wejściowych generatora – zwarcie źródła pierwotnego tzw. crowbarem (rys. 1) oraz połączenie z cewką generatora zewnętrznego obciążenia. Połączenie to realizowane jest za pomocą twornika. Dalsza deformacja twornika powoduje zmniejszenie przestrzeni wewnątrz cewki roboczej FCG. W efekcie dochodzi do szybkiego zwierania poszczególnych zwojów cewki roboczej, czyli zmiany jej indukcyjności, co przy stałej wartości strumienia magnetycznego prowadzi do znacznego wzrostu prądu nawet do wartości rzędu MA [1, 2, 3]. Zjawisku towarzyszy również wzrost indukcji magnetycznej, nawet do wartości rzędu dziesiątek T.



Rys. 1. Idea działania FCG: a) stan początkowy układu, b) kompresja pola magnetycznego wywołana procesem rozpękania twornika, 1 – uzwojenie generatora, 2 – twornik, 3 – materiał wybuchowy, 4 – crowbar, 5 – fala uderzeniowa wywołana detonacją materiału wybuchowego, C – bateria kondensatorów naładowana do napięcia U_0 , L_c , R_c – indukcyjność, rezystancja połączeń, L_0 , R_0 – indukcyjność, rezystancja cewki obciążenia, b – całkowita długość cewki generatora, x – efektywna długość cewki generatora w trakcie procesu generacji d – zewnętrzna średnica twornika, D – wewnętrzna średnica uzwojenia

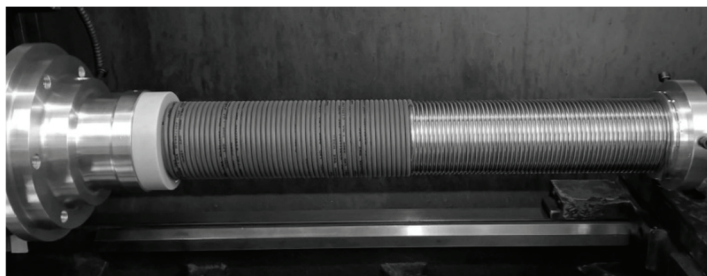
Uzyskanie udaru prądowego w obciążeniu generatora o zadanych parametrach jest związane z jednej strony z samym procesem generacji (kompresji pola magnetycznego), jak również zależy od wzajemnych korelacji pomiędzy parametrami obciążenia i generatora. W związku z tym, celowe jest przeprowadzenie analizy umożliwiającej dobór takich parametrów konstrukcyjnych FCG, aby uzyskać zadany efekt prądowy w odbiorniku o określonych parametrach technicznych, tj. indukcyjności L_0 i rezystancji R_0 .

Pomimo, że jedynie kilka procent energii zgromadzonej w materiale wybuchowym zamienia się w energię pola elektromagnetycznego, to ogromna gęstość tej energii daje pożądany efekt [1].

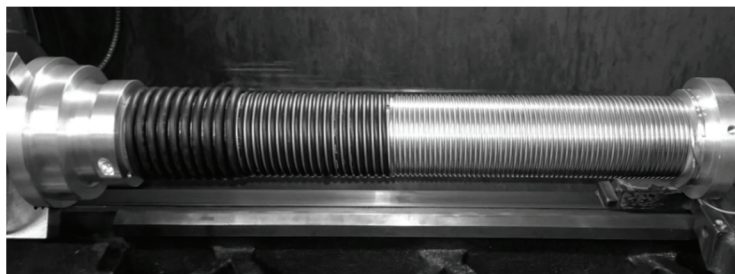
2. OGÓLNY OPIS MODELU GENRATORA

Przedmiotem analizy są parametry konstrukcyjne cewki roboczej FCG zasilającej określone obciążenie o charakterze indukcyjno-rezystancyjnym. Przykładowy widok poszczególnych sekcji uzwojenia cewki modelu FCG przedstawia rys. 2.

a)



b)



Rys. 2. Widok dwu (a) oraz trzysekccyjnej (b) cewki roboczej modelu FCG

Analizie poddano wpływ wymiarów twornika i cewki generatora nawiniętego drutem o różnym przekroju poprzecznym na uzyskiwane wzmocnienie prądowe, wyrażone zależnością:

$$k = \frac{i_{g \max}}{i_w} \quad (1)$$

gdzie: i_w – wartość szczytowa prądu wzbudzenia ze źródła pierwotnego, $i_{g \max}$ – wartość maksymalna generowanego prądu.

Badania optymalizacyjne, wykorzystujące podejście oparte o metodę kolejnych przybliżeń, składały się z dwóch etapów, w których analizowano kolejno: wpływ liczby sekcji uzwojenia generatora, nawiniętego drutem o różnym przekroju

poprzecznym, przy zachowaniu stałej długości generatora b oraz wpływ wymiarów: średnicy twornika d i cewki generatora D dla przypadku generatora jednostopniowego. Obciążeniem generatora jest cewka powietrzna. Proces optymalizowania konstrukcji generatora przeprowadzono przy ustaleniu kluczowych parametrów technicznych poszczególnych uzwojeń, takich jak: grubość warstwy izolacyjnej i maksymalny stosunek średnicy uzwojenia do średnicy twornika, który ze względu na właściwości materiałowe, związane z procesem plastycznej deformacji aluminiowego twornika, nie może przekroczyć dwukrotnej wartości (w przeciwnym przypadku dochodzi do przzerwiania ciągłości struktury krystalicznej materiału – pojawiają się pęknięcia).

Uzwojenia rozważanych wersji generatorów składają się z określonej liczby sekcji n połączonych szeregowo, o średnicy wewnętrznej uzwojenia D oraz liczbie zwojów z , nawiniętych drutem o średnicy d na długości l_i , gdzie i oznacza numer sekcji. Każda z sekcji posiada izolację w postaci powietrznej (określonego odstępu powietrznego między zwojami) lub stałej w celu zwiększenia międzyzwojowej wytrzymałości elektrycznej modelu generatora. Szczegółowe parametry cewki analizowanych modeli generatorów przedstawiono w tabelicy 1. Zamieszczono również wartości początkowych indukcyjności cewki generatora wraz z oddziaływaniem twornika w chwili t_0 tuż po inicjacji detonacji materiału wybuchowego.

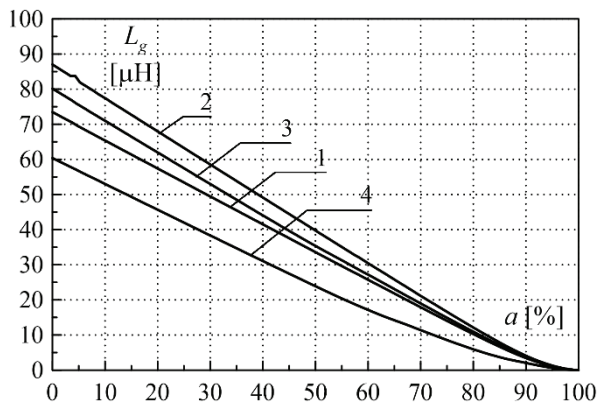
Tabela 1. Parametry konstrukcyjne uzwojeń analizowanych wariantów konstrukcyjnych FCG.

Wersja generatora	Sekcja	Liczba zwojów	Średnica drutu	Długość sekcji	Średnica wewnętrzna uzwojenia	Średnica zewnętrzna twornika	Indukcyjność początkowa uzwojenia
–	–	[zwoje]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[μH]
1	1	105	3,5	420	60	30	75,8
2	1	115	2,6	420	60	30	89,8
3	1	60	2,6	220	60	30	82,9
	2	50	3,5	200			
4	1	60	2,6	220	60	30	63,3
	2	20	3,5	92			
	3	10	6,0	80			
5	1	46	3,5	180	100	50	74,9
6	1	52	2,6	188	100	50	89,3

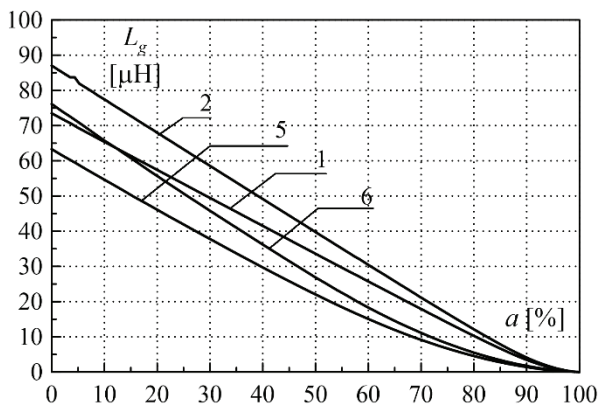
W celu doboru optymalnych parametrów cewki roboczej FCG opracowano model numeryczny, w którym indukcyjność uzwojenia FCG obliczano metodą elementów skończonych dla różnych etapów zwierania generatora. Na podstawie obliczeń otrzymano charakterystykę zmian indukcyjności w funkcji stopnia zwarcia uzwojenia.

Zmiana indukcyjności cewki generatora L_g występuje w trakcie procesu detonacji materiału wybuchowego w tworniku, w wyniku czego poszczególne zwoje cewki ulegają zwarceniu. Na rys. 3–4 przedstawiono zależności indukcyjności L_g oraz zmian indukcyjności dL_g/dt generatora w funkcji procentowego stopnia zwarcia generatora a dla dwóch wariantów: sekcjonowania uzwojenia oraz zmiany średnicy efektywnej. Dla tych przypadków porównano również wyniki symulacji dla różnego poskoku uzwojenia wynikającego z zastosowania drutu miedzianego o różnej średnicy.

a)

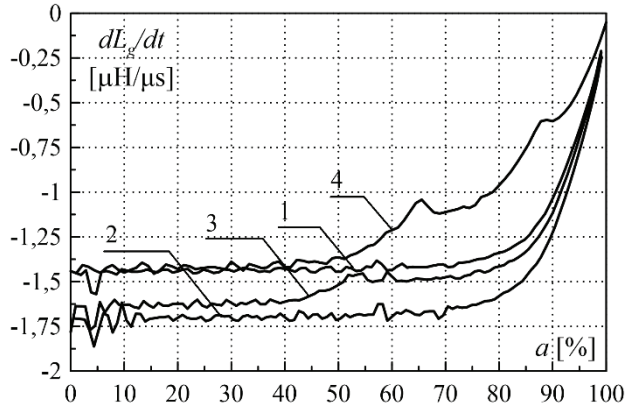


b)

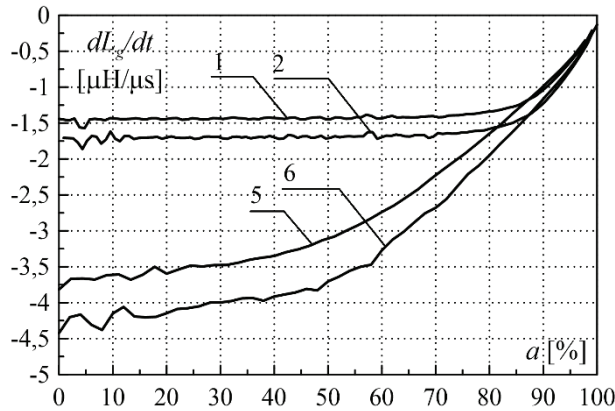


Rys. 3. Charakterystyki indukcyjności generatora L_g w funkcji stopnia zwarcia a uzwojenia generatora dla (a) pierwszego oraz (b) drugiego schematu optymalizacji

a)

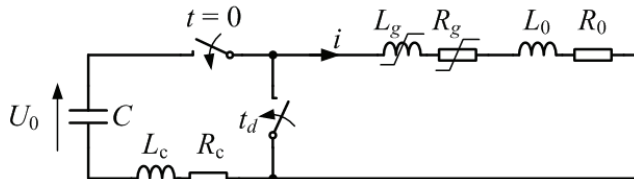


b)



Rys. 4. Charakterystyki zmian indukcyjności generatora dL_g/dt w funkcji stopnia zwarcia a uzwojenia generatora dla (a) pierwszego oraz (b) drugiego schematu optymalizacji

Obliczenia symulacyjne generacji prądu w FCG przeprowadzono w obwodzie jak na rys. 5.



Rys. 5. Schemat obwodowy modelu FCG

W chwili $t = 0$ s kondensator C rozładowuje się w układzie z FCG, reprezentowanym jako szeregowe połączenie indukcyjności L_g i rezystancji R_g z cewką obciążenia, o indukcyjności L_0 i rezystancji R_0 . Elementy L_c oraz R_c modelują parametry pasozytnicze połączeń oraz źródła. W chwili t_d rozpoczyna się proces detonacji, który w pierwszej fazie zwiera kondensator C oraz początek generatora L_g, R_g z cewką obciążenia L_0, R_0 . Następuje kompresja pola magnetycznego, czego wynikiem jest wzrost prądu generatora. Wartość prądu generowanego podczas kompresji pola w uzwojeniu generatora i w obciążeniu obliczono na podstawie równania:

$$i \frac{d}{dt} L_g(t) + (L_g(t) + L_0) \frac{di}{dt} + i(R_g + R_0) = 0 \quad (4)$$

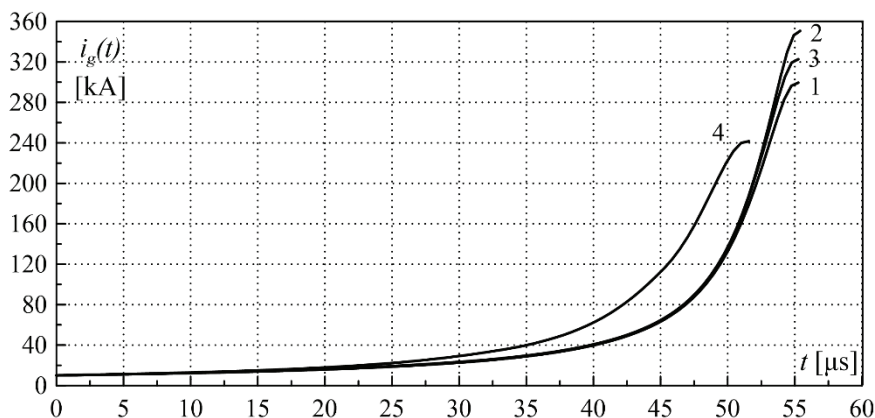
Równanie (4) rozwiązano za pomocą metody typu predyktor-korektor. Pożądaną dokładność obliczeń uzyskano wykorzystując schemat kolejnych przybliżeń kroku całkowania.

3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

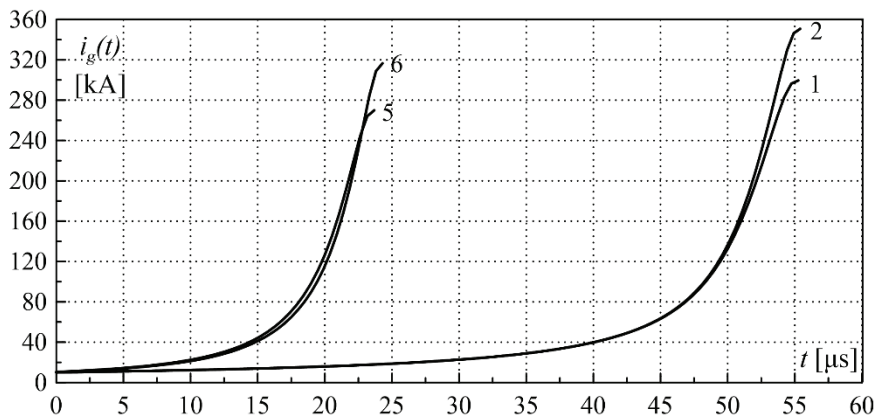
Na podstawie przygotowanego modelu obliczeniowego przeprowadzono symulacje komputerowe, których celem było określenie wpływu parametrów konstrukcyjnych cewki generatora na współczynnik wzmocnienia prądu generatora k (1). Analizę przeprowadzono dla indukcyjności obciążenia $L_0 = 2 \mu\text{H}$ oraz rezystancji cewki obciążenia $R_0 = 30 \text{ m}\Omega$. Wartości te odpowiadają wielkościom rzeczywistym cewek obciążenia stosowanych podczas prób eksperymentalnych i zostały wyznaczone jako optimum wielokryterialnej analizy zawartej w pracach [6, 7].

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi prądu generowanego w analizowanych wariantach, gdzie numer przebiegu odpowiada numerowi porządkowemu konstrukcji FCG w tab.1.

a)

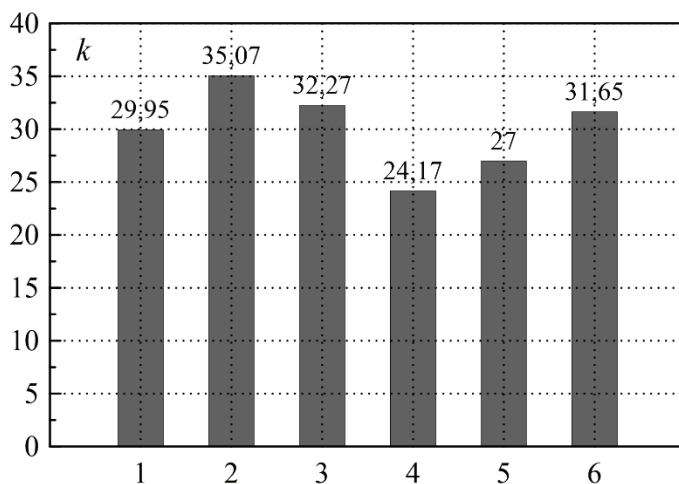


b)



Rys. 6. Porównanie przebiegów prądu generowanego w obciążeniu L_0, R_0 dla (a) różnych konfiguracji i liczby sekcji uzwojeń oraz (b) różnej średnicy uzwojenia i twornika dla różnych parametrów konstrukcyjnych FCG – tab. 1

Na rys. 7 przedstawiono zestawienie współczynników wzmocnienia k dla wszystkich wariantów konstrukcyjnych zamieszczonych w tab. 1.



Rys. 7. Zestawienie współczynnika wzmocnienia prądu k dla rozważanych parametrów konstrukcyjnych FCG – tab.1

4. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych dla przyjętych do analizy modeli konstrukcyjnych FCG wynikają następujące wnioski:

- Uzyskanie zadowalającego wzmocnienia prądu w obciążeniu o założonych z góry parametrach R_0 , L_0 jest uzależnione od wartości początkowej indukcyjności uzwojenia generatora oraz dynamiki zmian tej indukcyjności, w szczególności w końcowym fragmencie procesu generacji. W związku z tym, najbardziej korzystne rozwiązanie konstrukcyjne generatora, spośród analizowanych przypadków, występuje dla generatora posiadającego uzwojenie wykonane z możliwie małym poskokiem. Pozwala to uzyskać przy zadanej długości uzwojenia możliwie dużą indukcyjność roboczą, jak również największą jej zmianę w trakcie deformacji twornika;
- Duża wartość współczynnika wzmocnienia prądowego FCG uzależniona jest głównie od dynamicznej zmiany indukcyjności uzwojenia w końcowym etapie generacji. W związku z tym, możliwe jest zwiększenie wartości prądu generowanego poprzez zastosowanie ostatniej sekcji generatora w postaci stożkowej lub wielowarstwowej;
- Podział uzwojenia generatora na sekcję nawiniętą drutem o różnej średnicy wykazuje niewielki wpływ na współczynnik wzmocnienia prądu. Jednakże jest to konieczne ze względu na występujące w końcowym procesie generacji duże wartości prądu (efekt cieplny i elektrodynamiczny) i napięcia (wytrzymałość elektryczna izolacji międzyzwojowej generatora).

Badania wykonano w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – nr umowy DOB-1-1/1/PS/2014.

LITERATURA

- [1] Altgilbers L. L., et. al.: Magnetocumulative Generators. With a Foreword by C. M. Fowler. Springer Verlag. New York, 2000.
- [2] Knoepfel H., E.: Magnetic fields. A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000.
- [3] Neuber A., A.: Explosively Driven Pulsed Power. Helical Magnetic Flux Compression Generators. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] Wołoszyn M., Jakubiuk K., Zimny P., Kowalak D.: Comparative Analysis of Coaxial Magnetocumulative Generators. Archives of Electrical Engineering, vol. 66, pp. 681-692, 2017.
- [5] Jakubiuk K., Kowalak D., Nowak M.: The forming and emission of high power electromagnetic pulses, ITM Web Conference, Volume 19, 2018 Computer Applications in Electrical Engineering (ZKwE'2018).
- [6] Wołoszyn M., Kowalak D., Jakubiuk K., Nowak M.: The flux compression generator load parameters selection, ITM Web of Conferences 28, vol. 01002, pp. 1–2, 2019.
- [7] Wołoszyn M., Kowalak D., Jakubiuk K., Nowak M., Optymalizacja parametrów obciążenia generatora magnetokumulacyjnego, Poznan University Of Technology Academic Journals, No 97 Electrical Engineering, 2019.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF FLUX COMPRESSION GENERATOR
WINDING PARAMETERS ON CURRENT AMPLIFICATION FACTOR**

In the paper the results of research on the flux compression generator (FCG) parameters influence on its generation factor have been presented. During the operation of the FCG, its inductance and resistance decrease as a result of the winding being short-circuited by the expanding armature. As a result, the primary current supplying the generator is amplified. By the change of the coil parameters, the value of the generator current amplification factor can be influenced. The change of the generator inductance during the operation has been determined with the numerical methods.

(Received: 12.03.2020, revised: 03.04.2020)