

WŁADYSŁAW MIZIA

Instytut Metrologii
i Maszyn Elektrycznych

WPLYW ODDZIAŁYWANIA TWORNIKA I PARAMETRÓW TURBOGENERATORA NA WYMAGANY PRZEPŁYW WZBUDZENIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ znamionowego współczynnika mocy, reaktancji oddziaływania twornika, przeciążalności oraz reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika na wymagany przepływ wzbudzenia przy uwzględnieniu stanu nasycenia obwodu magnetycznego generatora. Wpływ ten zilustrowano niezbędnymi wykresami pozwalającymi na ocenę możliwości zmniejszenia wymaganego przepływu wzbudzenia.

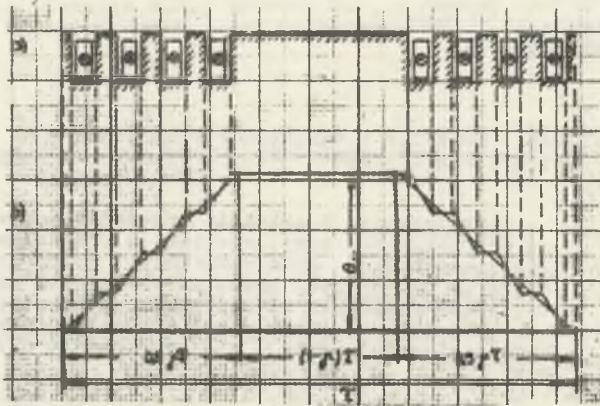
1. Wstęp

Moc systemów energetycznych krajów wysoko uprzemysłowionych są zwykle tak duże, że nie wprowadzają ograniczenia odnośnie maksymalnej mocy poszczególnych generatorów synchronicznych. W tych warunkach moc generatorów instalowanych w elektrowniach ciepłych jest ograniczona technicznymi możliwościami w zakresie ich budowy. Wymiary twornika, indukcja magnetyczna w szczelinie i znamionowe napięcie generatorów o mocach powyżej 200 MW ulegają tylko nieznacznym zmianom. Z tego powodu zwiększanie mocy generatorów uzyskuje się przez zwiększenie przepływów wzbudzenia i oddziaływania twornika co prowadzi do wzrostu okładów prądowych stojana i wirnika. Powiększanie mocy generatorów wymaga więc wprowadzenia coraz bardziej skutecznych systemów chłodzenia. Określenie wymaganego przepływu wzbudzenia (okładu prądowego wirnika) pozwala więc na ustalenie wymagań odnośnie chłodzenia uzwojenia wzbudzenia.

Z uwagi na indukcyjny znamionowy współczynnik mocy generatora, przepływ wzbudzenia jest większy od przepływu oddziaływania twornika. Określenie wymaganego przepływu wzbudzenia wymaga ustalenia zależności między przepływem wzbudzenia a przepływem oddziaływania twornika w warunkach znamionowych przy uwzględnieniu stanu nasycenia obwodu magnetycznego generatora i jego parametrów, takich jak: reaktancja oddziaływania twornika, przeciążalność, znamionowy współczynnik mocy.

2. Wpływ parametrów generatora na wymagany przepływ wzbudzenia

Rozkład przestrzenny przepływu wzbudzenia wzdłuż rozwiniętego obwodu wirnika ma kształt podany na rys. 1 b, który z dostatecznym przybliżeniem traktować można jako trapezowy.



Rys. 1

a - rozwinięty obwód wirnika, b - rozkład przestrzenny przepływu wzbudzenia

Pierwsza harmoniczna rozkładu przestrzennego przepływu wzbudzenia

$$\theta_{w1}(x) = \frac{8\theta}{\pi^2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{\tau}\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right), \quad (2.1)$$

natomiast pierwsza harmoniczna przepływu oddziaływania twornika

$$\theta_a(x) = \theta_a \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right), \quad (2.2)$$

przy czym

τ - podziałka biegunowa

θ_w - amplituda przepływu wzbudzenia o kształcie trapezowym

θ_a - amplituda pierwszej harmonicznej przepływu oddziaływania twornika.

Wygodnie jest sprowadzić przepływ oddziaływania twornika na stronę wzbudzenia. Wówczas

$$\theta_a(x) = \theta_a' \frac{8}{\pi^2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{x}{\tau}\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right). \quad (2.3)$$

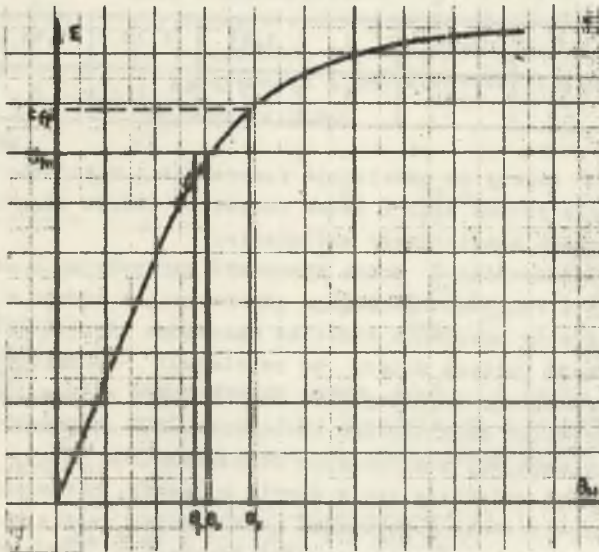
Porównując zależności (2.2) i (2.3) otrzymuje się wyrażenie na współczynnik sprowadzający przepływ oddziaływania twornika na stronę wzbudzenia

$$k_a = \frac{\theta_a^*}{\theta_a} = \frac{\pi^2 \psi}{8 \sin \frac{\pi}{2} \psi} \quad (2.4)$$

Wartości współczynnika k_a dla wartości stosunku ψ stosowanych w generatorach dwubiegunowych podaje tabela 1.

Tabela 1

ψ	0,625	0,667	0,7	0,75	0,8
k_a	0,923	0,943	0,97	1,0	1,035



Rys. 2. Charakterystyka biegu jałowego

Mając wprowadzone pojęcie współczynnika sprowadzającego przepływ oddziaływania twornika do przepływu wzbudzenia można wykreślić wykres wektorowy (rys. 3) dla pracy generatora w warunkach znamionowych, który łącznie z charakterystyką biegu jałowego (rys. 2) pozwala określić stosunek przepływu wzbudzenia do przepływu oddziaływania twornika w warunkach znamionowych. Na podstawie charakterystyki biegu jałowego można wpisać zależności

$$\theta_0 = \sigma_0 \theta_s \quad (2.5)$$

$$\theta_E = \sigma \theta_0 \quad (2.6)$$

przy czym

- θ_c - przepływ wzbudzenia odpowiadający napięciu znamionowemu przy biegu jałowym generatora
- θ_E - wypadkowy przepływ w generatorze pracującym w warunkach znamionowych
- σ_0, σ - współczynniki liczbowe.

Przed zakończeniem obliczeń elektromagnetycznych generatora charakterystyka biegu jałowego nie jest znana i tym samym nie można z góry określić współczynnika σ_0 . Charakterystyki biegu jałowego generatorów dwubiegunowych są zbliżone do charakterystyki normalnej (tablica 2) dla której $\sigma_0 = 1.1$. Przy wstępnym wyznaczeniu przepływu wzbudzenia z wystarczającą dokładnością można się więc posłużyć wartością współczynnika σ_0 dla normalnej charakterystyki biegu jałowego

Tablica 2

E_r	0	0,58	1	1,21	1,33	1,46	1,51
θ_{Er}	0	0,5	1	1,5	2	3	3,5

Współczynnik σ zależy od reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika znamionowego współczynnika mocy i stanu nasycenia obwodu magnetycznego generatora w warunkach znamionowego obciążenia.

Wartość współczynnika σ można wyznaczyć korzystając z charakterystyki biegu jałowego i wykresu wektorowego generatora, w którym w miejsce reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika wprowadza się tzw. reaktancję Potierá. Reaktancja Potierá zależy od reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika, znamionowego współczynnika mocy i stanu nasycenia obwodu magnetycznego w warunkach znamionowego obciążenia. Dla generatorów dwubiegunowych spotykane wartości znamionowych współczynników mocy wynoszą 0,8; 0,85; 0,9, a więc zmieniają się w wąskim zakresie, natomiast stan nasycenia obwodu magnetycznego w warunkach znamionowych jest w przybliżeniu jednakowy. W tych warunkach można operować reaktancją Potierá uzależnioną tylko od reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika. Według pracy [9] dla generatorów dwubiegunowych można przyjmować:

$$X_p = 0,85 X'_d,$$

gdzie

X_p - reaktancja Potierá

X'_d - reaktancja przejściowa w osi wzdłużnej.

Korzystając z zależności (2.10), (2.11) i wyrażenia na względną reaktancję oddziaływania twornika

$$X_{\text{adr}} = \frac{k_a \theta_{\text{an}}}{\delta} \quad (2.12)$$

oraz z zależności trygonometrycznych trójkąta przepływów OCA otrzymuje się

$$\theta_{\text{wn}} = k_a \theta_{\text{an}} \sqrt{M^2 + (1 + X_{\text{sr}} M)^2 + 2 M(1 + X_{\text{sr}} M) \sin \phi_n}, \quad (2.13)$$

przy czym

θ_{wn} - przepływ wzbudzenia w warunkach znamionowych

θ_{an} - przepływ oddziaływania twornika w warunkach znamionowych

$$M = \frac{\sigma \sigma_0}{k_E X_{\text{adr}}}$$

Wprowadzając oznaczenie

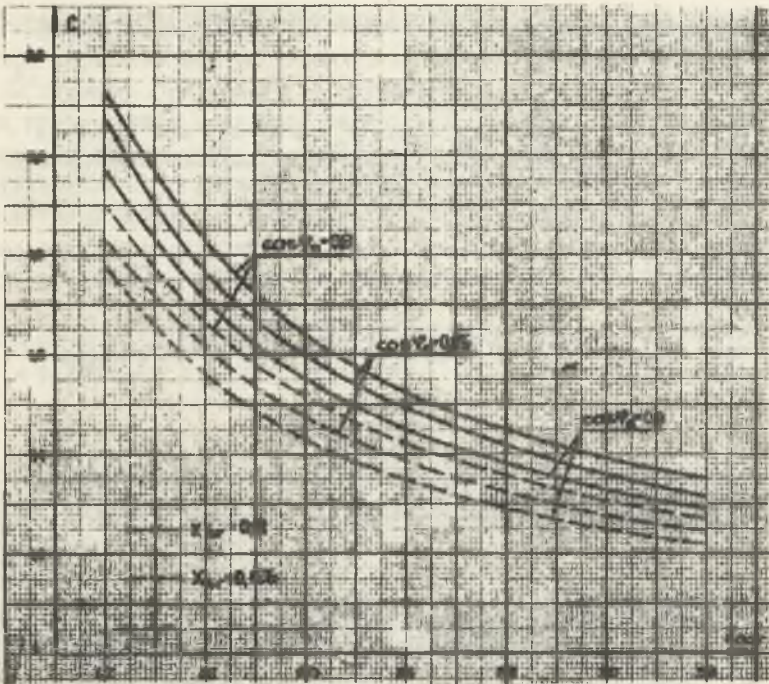
$$C = \sqrt{M^2 + (1 + X_{\text{sr}} M)^2 + 2 M(1 + X_{\text{sr}} M) \sin \phi_n} \quad (2.14)$$

otrzymuje się ostatecznie

$$\theta_{\text{wn}} = C k_a \theta_{\text{an}}. \quad (2.15)$$

Z wyrażeń (2.14) i (2.15) wynika, że stosunek przepływu wzbudzenia do przepływu oddziaływania twornika w znamionowych warunkach pracy generatora zależy głównie od reaktancji oddziaływania twornika, reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika i znamionowego współczynnika mocy. Stosunek ten maleje zarówno ze wzrostem reaktancji oddziaływania twornika jak i współczynnika mocy, natomiast rośnie przy powiększeniu reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika. Przebieg zależności $C = f(X_{\text{adr}})$ dla znamionowych współczynników mocy generatorów 0,8; 0,85 i 0,9 przedstawiono na rys. 4. Z rys. 4 wynika, że wymagany przepływ wzbudzenia w znamionowych warunkach pracy generatora zależy w znacznym stopniu od reaktancji oddziaływania twornika. Powiększenie reaktancji oddziaływania twornika, korzystne ze względu na wymagany przepływ wzbudzenia, prowadzi jednak do zmniejszenia przeciążalności.

Aby określić wymagany przepływ wzbudzenia przy zadanej przeciążalności należy ustalić zależność między względną reaktancją oddziaływania twornika a przeciążalnością generatora.



Rys. 4. Stosunek przepływu wzbudzenia do przepływu oddziaływania twornika w znamionowych warunkach pracy generatora w funkcji względnej reaktancji oddziaływania twornika przy różnych współczynnikach mocy

3. Zależność względnej reakcji oddziaływania twornika od przeciążalności

Przeciążalność generatora określona jest zależnością

$$S_p = \frac{\beta_{wp}}{(X_a \sin \theta_{an} + X_{sr} \sin \theta) \cos \phi_n} \tag{3.1}$$

Wprowadzając do wzoru (3.1) wyrażenia (2.12) i (2.15) otrzymuje się:

$$S_p = \frac{c X_{adr}}{(X_{adr} + X_{sr}) \cos \phi_n} \tag{3.2}$$

Podstawiając wzór (2.14) do wzoru (3.2) po przekształceniach otrzymuje się:

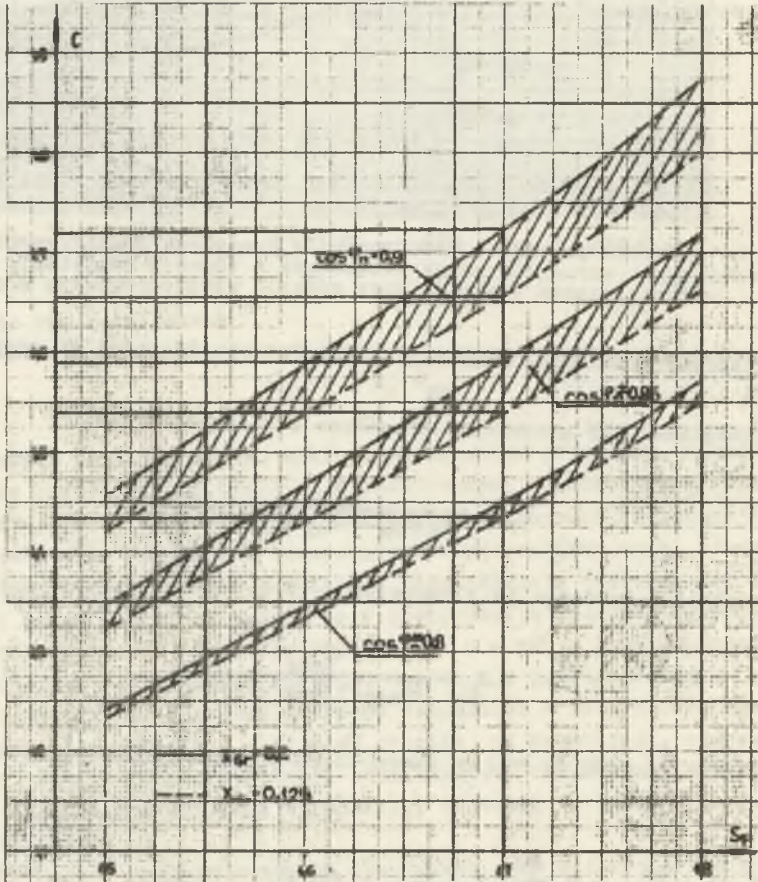
$$(\sigma_0)^2 + X_{adr}^2 + 2 \frac{\sigma_0}{k_E} X_{adr} (X_{sr} + \sin \phi_n) = S_p (X_{adr} + X_{sr}) \cos \phi_n \tag{3.3}$$

Z równania (3.3) wynika zależność względnej reaktancji oddziaływania twornika od przeciążalności

$$X_{\text{adr}} = \frac{\frac{\sigma\sigma_0}{k_E} (X_{\text{sr}} + \sin \varphi_n) - S_p^2 X_{\text{sr}} \cos^2 \varphi_n + \sqrt{A}}{S_p^2 \cos^2 \varphi_n - 1}, \quad (3.4)$$

przy czym

$$A = \left[\frac{\sigma\sigma_0}{k_E} (X_{\text{sr}} + \sin \varphi_n) - S_p^2 X_{\text{sr}} \cos^2 \varphi_n \right]^2 - \left[S_p^2 \cos^2 \varphi_n - 1 \right] \left[S_p^2 \cos^2 \varphi_n X_{\text{sr}}^2 - (\sigma\sigma_0)^2 \right]. \quad (3.5)$$



Rys. 5. Stosunek przepływu wzbudzenia do przepływu oddziaływania twornika w znamionowych warunkach pracy generatora w funkcji przeciążalności przy różnych współczynnikach mocy

Zależność względnej reaktancji oddziaływania twornika od przeciążalności $X_{adr} = f(S_p)$ przedstawiono na rys. 5 przy założeniu normalnej charakterystyki biegu jałowego. Zależność tę przedstawiono dla zakresu' względnej reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika $X_{sr} = (0,125 \div 0,2)$ oraz dla trzech wartości znamionowego współczynnika mocy 0,8; 0,85; 0,9. Zależność przedstawiona na rys. 5 pozwala wyznaczyć względną reaktancję oddziaływania twornika przy założonej przeciążalności generatora.

Przykładowo dla przeciążalności $S_p = 1,7$ (zalecana przez GOST) otrzymuje się następujące zakresy względnej reaktancji oddziaływania twornika

$$\cos \phi_n = 0,8 \quad - \quad X_{adr} = (2,3 \div 2,7)$$

$$\cos \phi_n = 0,85 \quad - \quad X_{adr} = (1,8 \div 2)$$

$$\cos \phi_n = 0,9 \quad - \quad X_{adr} = (1,4 \div 1,6)$$

przy czym wartości minimalne odpowiadają $X_{sr} = 0,125$, natomiast maksymalne $X_{sr} = 0,2$. Zależność $X_{adr} = f(S_p)$ pozwala również na określenie zależności $C = f(S_p)$.

4. Zależność stosunku przepływu wzbudzenia od przepływu oddziaływania twornika w warunkach znamionowych od przeciążalności

Z zależności (3.2) wynika, że

$$C = S_p \cos \phi_n \left(1 + \frac{X_{sr}}{X_{adr}} \right). \quad (4.1)$$

Podstawiając wyrażenie (3.4) do (4.1) otrzymuje się:

$$C = S_p \cos \phi_n \left[1 + X_{sr} \frac{S_p^2 \cos^2 \phi_n - 1}{\frac{\sigma \sigma}{k_E} (X_{sr} + \sin \phi_n - S_p^2 X_{sr} \cos^2 \phi_n + \sqrt{A})} \right], \quad (4.2)$$

przy czym: A - określa wyrażenie (3.5).

Przebieg zależności $C = f(S_p)$ dla znamionowych współczynników mocy 0,8; 0,85; 0,9 i zakresu względnej reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika $X_{sr} = (0,125 \div 0,2)$ przedstawiono na rys. 6. Współczynniki σ i σ_0 przyjęto zakładając, że charakterystyka biegu jałowego jest charakterystyką normalną.

Zależności te pozwalają na ocenę wpływu przeciążalności i reaktancji rozproszenia uzwojenia twornika na stosunek przepływów wzbudzenia i oddziaływania twornika w warunkach znamionowych. Stosunek ten maleje przy zmniejszeniu przeciążalności i reaktancji rozproszenia.

Przykładowo dla przeciążalności $S_p = 1,7$ otrzymuje się:

$$\text{dla } \cos \varphi_n = 0,8 \quad - \quad C = (1,44 \div 1,455)$$

$$\text{dla } \cos \varphi_n = 0,85 \quad - \quad C = (1,54 \div 1,59)$$

$$\text{dla } \cos \varphi_n = 0,9 \quad - \quad C = (1,66 \div 1,73),$$

przy czym wartości mniejsze odpowiadają $X_{sr} = 0,125$, natomiast większe $X_{sr} = 0,2$.

Zmniejszenie przeciążalności jest zatem korzystne ze względu na wymagany przepływ wzbudzenia, ale powoduje wzrost strat na powierzchni stojana i wirnika. Straty te wytworzone przez wyższe harmoniczne pola magnetyczne w szczelinie zwiększają się, ponieważ ulega zmniejszeniu szczelina powietrzna. Zmniejszenie szczeliny powietrznej powoduje również zmniejszenie efektywności systemu chłodzenia generatora.

Jeżeli system chłodzenia generatora umożliwia odprowadzenie zwiększonych strat powierzchniowych, to wymagana przeciążalność zależy od własności systemu energetycznego, w którym pracuje generator i można ją zmniejszyć przez powiększenie szybkości działania regulatora napięcia. Dobór właściwej przeciążalności dla generatora o określonej mocy wymaga kompleksowych badań nad warunkami pracy generatora w określonym systemie energetycznym. Problem ten jest szczególnie ważny w przypadku generatorów największych mocy, gdzie uzyskanie wymaganego przepływu wzbudzenia napotyka na duże trudności i zmusza konstruktorów do stosowania skomplikowanych i kosztownych systemów chłodzenia.

LITERATURA

1. Aniempodistiw W.P., Koszarskij E.G., Urusow J.D.: Problemy krupnogo turbogeneratorostrojenia. Izdatielstwo AN SSSR, Moskwa - Leningrad 1960.
2. Harms E.: Wasserstoffgekühlte Generatore grosser Leistung. ETZ-A Nr 3 1957.
3. Issledowanije elektromagnietnych polej, paramietrow i potier w moszoznyh elektriozeskich maszinach. Izdatielstwo "Nauka" Moskwa-Leningrad 1966.
4. Mizia W.: Analiza i optymalizacja obwodu elektrycznego i magnetyczne go dwubiegunowych generatorów synchroicznych. Praca doktorska. Gliwice 1969.
5. Mizia W.: Zagadnienie doboru długości szczeliny w turbogeneratorach. Rozprawy elektrotechniczne tom XII. Zeszyt 3/1966.
6. Moskwitin A.J.: Nieposriedstwiennoje odkażdżenije elektriozeskich maszin. Izdatielstwo AN SSSR, 1962.
7. Park R., Robertson B.: The Reactance of Synchronous Machines Tr. AIEE p. 352, 1926.
8. Schuisky W.: Vorausbestimmung der Erregung von Synchroinmaschinen. ETZ-A, Bd. 84, H. 10, 1963.

9. Teoria, raszoziet i isledowanije wysokospolzowanych elektrioceskich maszin. Izd. "Nauka" Moskwa-Leningrad 1965.
10. Titow W.W., Hutorieckij G.H., Zagorodnaja G.A., Wartanian G.P., Zaszawskij D.J., Smotrow J.A.: Turbogienieratory, rasziet i konstrukcija Izdatielstwo "Energiya" 1967.
11. Ungruh F.: Felder und Stromkrafte in der Mickelkopfen von Turbogeneratoren. ETZ-A Nr 9 1963.
12. Woldek A.J.: O wiektornych diagrammach i induktywных soprotiwlienjach sinchronnych maszin. Elektrotechnika Nr 3 1962.

ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ ЯКОРА И ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ТРЕБУЕМЫЙ ПОЛНЫЙ ТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ

Резюме

В статье показано влияние номинального коэффициента мощности, реактанции реакции якоря, перегружаемости а также реактанции рассеяния обмотки якоря на требуемый полный ток возбуждения при учёте насыщения магнитной цепи генератора. Влияние это проиллюстрировано с помощью необходимых графиков позволяющих оценить возможность уменьшения требуемого полного тока возбуждения.

THE EFFECT OF ARMATURE REACTION AND TURBO-GENERATOR PARAMETERS ON REQUIRED TOTAL EXCITATION CURRENT

Summary

The paper presents effect of rated power factor, armature reaction reactance, overload capacity and armature winding leakage reactance on required total excitation current considering the saturation of the generator magnetic circuit. Presented graphs, illustrating this effect, allow estimate possibilities of reduction of needed total excitation current.