

DR INŻ. HENRYK KOWALOWSKI

Katedra Maszyn Elektrycznych

ELEKTROMAGNETYCZNA STAŁA CZASOWA ROTORA
TURBOGENERATORA

Streszczenie. Rozpatruje się stany przejściowe występujące w uzwojeniu wzbudzenia turbogeneratorsa przy rozwartym uzwojeniu twornika. Wprowadza się wygodną dla praktyki formułę pozwalającą na obliczenie elektromagnetycznej stałej czasowej wirnika turbogeneratorsa T_{do} z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych w stali rotora. Wykazuje się, że tłumiący wpływ stalowego bloku wirnika na szybkość zmiany strumienia przy zaburzeniach w obwodzie wzbudzenia turbogeneratorsa zmienia się znacznie w zależności od mocy maszyny.

Zmiany obciążenia maszyny, wahania napięcia i prędkości, włączanie i wyłączanie uzwojeń a także różne stany awaryjne naruszają elektromagnetyczną równowagę w obwodach maszyny i stają się przyczyną pracy jej w stanie nieustalonym.

Stan nieustalony, czyli przejście maszyny z pracy z jednego stanu równowagi na pracę w innym stanie równowagi nie może trwać nieskończenie krótko.

Bezwładność układu sprawia, że przemiana energii elektromagnetycznych pól a także energii wirujących mas maszyny wymaga pewnego dostatecznie krótkiego czasu.

Prądy i strumienie nie zmieniają nagle swych wielkości, lecz następuje to po czasie trwania stanu nieustalonego.

Przebieg zjawiska w stanie nieustalonym układu o pewnej bezwładności i tłumieniu charakteryzuje stzw. stała czasowa T .

Dokładne dane o wielkościach stałych czasowych obwodów maszyny synchronicznej (a także maszyn elektrycznych innych typów) potrzebne są przy obliczeniach prądów stanów nieustalonych jak również przy szeregu zagadnień związanych z projektowaniem i eksploatacją maszyny.

W niniejszym artykule opisuje się prostą metodę obliczenia stałej czasowej rotora turbogeneratorsa przy rozwartym uzwojeniu statora z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych w litym rotorze, pojawiających się przy wszelkich przełączeniach w obwodach maszyny. Wielkość ta, którą oznacza się symbolem T_{do} , określa czas narastania lub zaniku strumienia w generatorze przy rozwartym uzwojeniu statora i z jej pomocą oblicza się stałe czasowe składowych symetrycznych przejściowych prądów zwarcia. Waha się ona w granicach 3,0 do 13,0 sek i rośnie z wzrostem mocy maszyny.

Jak pokazują pomiary i obliczenia, stała czasowa T_{do} turbogeneratorsa znaleziona doświadczalnym sposobem (np. z oscylogramu prądu zwartego uzwojenia wzbudzenia) przewyższa znacznie stałą czasową tegoż uzwojenia, obliczoną za pomocą charakteryzującej go oporności czynnej i biernej.

Powiększenie "doświadczalnej" wielkości T_{do} w porównaniu z "obliczeniową", jak wiadomo, objaśnia się wpływem prądów wirowych w masywie rotora. Prądy wirowe osłabiają prędkość zmiany strumienia sprzężonego z uzwojeniem rotora.

Fizykalnie wpływ prądów wirowych można porównać z działaniem pewnego zamkniętego obwodu, równoważnego konturów prądów wirowych.

Przy obliczeniach T_{do} turbogeneratorsa trzeba zatem wziąć pod uwagę istnienie dodatkowego obwodu rotora silnie magnetycznie sprzężonego z uzwojeniem wzbudzającym, znacznie wpływającego na charakter zmian pola w obwodzie wzbudzenia maszyny.

Wpływ prądów wirowych przy stanach nieustalonych można uwzględnić posługując się jednym z następujących sposobów:

1. powiększenie stałej czasowej uzwojenia wzbudzającego za pomocą empirycznego współczynnika;

2. przedstawienie nieskończonej wielkiej ilości istniejących konturów wirowych prądów w masywnych częściach obwodu magnetycznego z pomocą jedyne go zwartego uzwojenia, traktując go jako wtórne uzwojenie transformatora, sprzężone z głównym strumieniem maszyny i mogące być charakteryzowane za pomocą odpowiednich parametrów;

3. rozpatrzenie prądów wirowych w litej części maszyny jako zjawisko występujące w całym poprzecznym przekroju danego obwodu przy założeniu stałości przenikalności magnetycznej materiału i przy przyjęciu dla strumieni prawa superpozycji.

Przodujący zakład wytwarzający turbogeneratory w ZSRR "Elektrosiła" poleca uwzględniać wpływ prądów wirowych na stałą czasową T_{do} rotora turbogeneratora wprowadzeniem do obliczeń poprawczego współczynnika $k = 1,33$; formuła dla T_{do} będzie wtedy:

$$T_{do} = k \cdot T_w = 1,33 \cdot \frac{2p W_2^2 f_{w2} \sigma \phi}{r_{2/75} i_{\delta} 10^8} \quad (\text{cek}) \quad (1)$$

gdzie: p - ilość par biegunów,
 W_2 - ilość zwojów uzwojenia wzbudzającego,
 f_{w2} - współczynnik uzwojenia rotora,
 σ - współczynnik rozproszenia uzwojenia rotora,
 ϕ - strumień w szczelinie przy biegu jałowym i nominalnym napięciu,
 $r_{2/75}$ - oporność czynna uzwojenia wzbudzającego, przeliczona do temperatury 75°C .
 i_{δ} - prąd rotora odpowiadający przepływowi (amperozwojom) szczeliny,
 k - współczynnik uwzględniający wpływ prądów wirowych w litej odkuwce rotora,
 T_w - stała czasowa uzwojenia wzbudzającego.

Zalecana przez "Elektrosiłę" wartość współczynnika k nie może jednak dać zadowalających rezultatów, jeśli przyjmujemy wielkość jego stałą dla szerokiego wachlarza mocy istniejących turbogeneratorów.

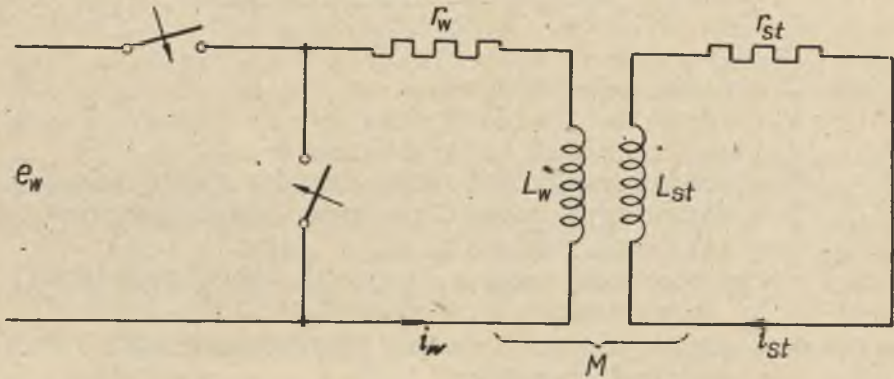
Reakcja prądów wirowych na procesy zachodzące w uzwojeniu wzbudzającym zależy w wielkim stopniu od wymiarów rotora, dlatego współczynnik k powinien przyjmować różne wartości w zależności od mocy maszyny.

Z pomocą przytoczonych przedtem metod uwzględniających wpływ prądów wirowych problem ten przeanalizujemy gruntowniej.

Oznaczając przez L_w , L_{st} , r_w , r_{st} i M odpowiednio indukcyjności, oporności czynne i indukcyjność wzajemną uzwojenia wzbudzenia (indeks w) i obwodu równoważnego obwodom prądów wirowych w stali rotora (indeks st) (rys.1) przebieg w czasie swobodnych prądów i_w i i_{st} w tych konfiguracjach możemy opisać przyrównując do zera sumę spadków napięć w każdym z nich.

$$L_w \frac{di_w}{dt} + r_w i_w + M \frac{di_{st}}{dt} = 0 \quad (2a)$$

$$L_{st} \frac{di_{st}}{dt} + r_{st} i_{st} + M \frac{di_w}{dt} = 0 \quad (2b)$$



Rys. 1. Obwód zastępczy
obwodów wirnika turbogeneratora

Rozwiązując równania różniczkowe 2a i 2b po pewnych przekształceniach otrzymamy wyrażenia dla swobodnych prądów:

$$i_w = \frac{I_w}{T_g} \left(T_w e^{-t/T_g} + T_{st} e^{-t/T_s} \right), \quad (3a)$$

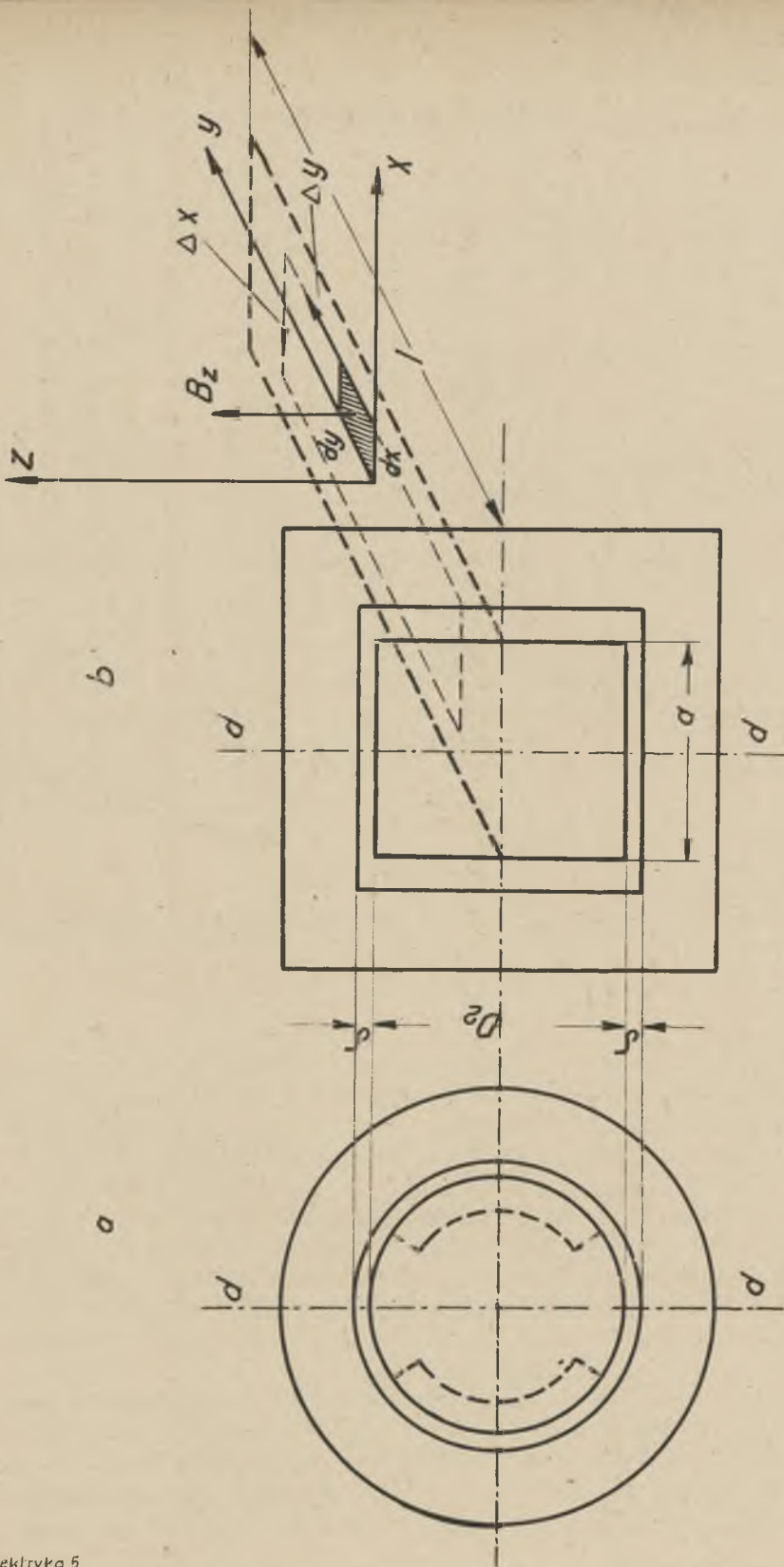
$$\sqrt{\frac{L_{st}}{L_w}} i_{st} = \frac{I_w}{T_g} \left(T_{st} e^{-t/T_g} - T_{st} e^{-t/T_s} \right). \quad (3b)$$

Pełny magnesujący prąd stanu nieustalonego będzie równy sumie prądów przejściowych i i i_{st} :

$$i_m = \frac{T_w + T_{st}}{T_g} I_w e^{-t/T_g} \quad (4)$$

W równaniach (2) do (4) oznaczają:

$T_g = T_w + T_{st} - T_s$ — stała czasowa strumienia głównego,



RYS. 2. Cbwód zastępczy obwodu magnetycznego rotora

$$T_w = \frac{L_w}{r_w} \quad \text{a} \quad T_{st} = \frac{L_{st}}{r_{st}} - \text{stałe czasowe uzwojenia wzbu-}$$

dzenia i obwodu równoważnego
obwodom prądów wirowych w sta-
li rotora,

$$T_s = \frac{G T_w T_{st}}{T_w + T_{st}} - \text{stała czasowa strumienia roz-}$$

proszczenia,

$$G = \frac{L_w L_{st} M^2}{L_w L_{st}} - \text{współczynnik rozproszenia sprzę-}$$

żonych magnetycznie obwodów,

J_w - początkowe znaczenie prądu wzbudzającego,

e - zasada logarytmów naturalnych.

Z prostych matematycznych rozważań wynika, że przy obliczeniach T_g można nie uwzględniać stałej czasowej strumienia rozproszenia (przyjmując dla analizy stosunkowo dużą wielkość współczynnika rozproszenia: $G = 0,36$, błąd wynikający z pominięcia T_s waha się dla różnych typów turbogeneratorów w granicach od 5% do 9%).

Wtedy:

$$T_g = T_w + T_{st} \quad (5)$$

a dla prądu i_m z wyrażenia (4) otrzymamy:

$$i_m = J_w e^{-t/T_g} \quad (6)$$

I tak jeśli od źródła prądu odłączyć uzwojenie wzbudzające turbogeneratorsa zwierając przy tym jego zaciski, to w ciągu pewnego czasu w dwóch sprzężonych magnetycznie obwodach rotora będą działać przejściowe prądy określone wyrażeniami (3a) i (3b).

Prąd w uzwojeniu wzbudzającym w pierwszej chwili szybko maleje do pewnej wartości określonej parametrami obwodu wtórnego, a prąd w obwodzie równoważnym obwodom prądów wirowych w stali rotora w tym samym czasie rośnie od zera do wartości równej umniejszeniu się prądu w uzwojeniu wzbudzenia.

Prąd magnesujący całkowity (równanie 6) zmienia się tak, jak gdyby wzbudzał tylko jedno uzwojenie o stałej czasowej T_g . Widać stąd, że wpływ, jaki wywiera prąd obwodu równoważnego obwodom prądów wirowych w beczcze rotora, polega głównie na powiększeniu się stałej czasowej

uzwojenia wzbudzenia o wielkość równą własnej stałej czasowej tego obwodu.

Znalezienie wielkości T_{st} rotora turbogeneratorsa bezpośrednio z stosunku parametrów L_{st} i r_{st} , które by mogły charakteryzować stalowy blok rotora w stanie nieustalonym, napotyka ogromne trudności. W rotorze występuje zjawisko nasycenia, skutkiem czego indukcyjność obwodu sprzężonego z strumieniem zmienia się i w bardzo wielkim stopniu zależy od wielkości prądu. Przy tym droga prądów wirowych w stali nie jest w pełni określona, gdyż prądy te rozmieszczają się z niejednakową gęstością i w różnych kierunkach w całej objętości stalowego masywu rotora.

Dla obwodów prądów wirowych trudno jest znaleźć wielkości ich oporności czynnych i biernych.

Dlatego przy obliczeniach takich obwodów celowe jest nie posługiwać się pomocniczymi pojęciami indukcyjności i rozpatrywać bezpośrednio proces indukowania sił elektromotorycznych, co w rezultacie pozwala także określać interesujące nas wielkości stałych czasowych T_{st} .

Możliwe jest również rozwiązanie postawionego zadania za pomocą analizy graficznej dla każdego konkretnego wypadku, jednak metoda ta wymaga wiele pracy i nie może być szeroko stosowana w praktyce inżynierskiej.

Przy analizie prądów wirowych mając na uwadze wygodę posługiwania się matematycznym aparatem, a także w celu możliwie pełnego uwzględnienia żłobków rotora przeprowadzono geometryczne przekształcenie rzeczywistej formy obwodu magnetycznego rotora turbogeneratorsa (rys. 2a) do pewnej równoważnej (rys. 2b).

Do obliczeń wprowadzono zastępczą szerokość becзки rotora po poprzecznej osi a , której wymiar określa się wychodząc z warunku zachowania stałości objętości stalowego masywu rotora i ekwiwalentnego graniastosłupa prostokątnego przy ich nie zmienionej długości l :

$$a = \frac{\pi D_2^2 / 4 - z_2 h_{z2} b_{z2}}{D_2} \quad (\text{cm}) \quad (7)$$

gdzie: z_2 - ilość żłobków rotora,
 h_{z2} - wysokość żłobka rotora,
 b_{z2} - szerokość żłobka rotora,
 D_2 - średnica becзки rotora.

Przy zamianie magnetyczna oporność dla strumienia pozostaje nie zmieniona.

W jarzmie statora utworzonym z izolowanych stalowych blach wpływ prądów wirowych jest tak nieznaczny, że można go pominąć.

Oś z prostokątnego układu współrzędnych x, y, z umieszczono wzdłuż osi podłużnej rotora, oś x i y w płaszczyźnie prostopadłej do niej (rys. 2b).

W przekształconym stalowym masywie rotora indukcja będzie posiadać jedną składową B_z , gęstość prądu wzbudzającego strumień Δ i natężenie pola elektrycznego E - tylko składowe wzdłuż osi x i y .

Przy tych założeniach, wykorzystując do rozważań metodykę R. Rűdenberga stosowaną przez niego przy badaniu procesów w maszynach częściach obwodu magnetycznego maszyn prądu stałego, wyprowadza się równanie różniczkowe opisujące w przestrzeni i w czasie przebieg indukcji w stali rotora turbogeneratorskiego:

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} = \frac{4\pi}{\varrho} \left(\frac{D_z \mu}{\delta\mu + D_2} \right) \frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (8)$$

Zakładając, że pole magnetyczne zmienia się w czasie według krzywej wykładniczej i przyjmując dla opisu przebiegu pola w osiach x i y funkcje trygonometryczne otrzymuje się rozwiązanie równania (8) w formie:

$$B_z = \sum_{nm} B_{nm} \cos \left(n\pi \frac{x}{a} \right) \cos \left(m\pi \frac{y}{l} \right) e^{-k_{nm} t} \quad (9)$$

gdzie współczynnik tłumienia:

$$k_{nm} = \frac{\varrho}{4\pi} \frac{\delta\mu + D_2}{D_2 \mu} \left[\left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 \right] \quad (10)$$

W ten sposób strumień w stali rotora po rozwarciu obwodu magnetycznego maszyny można przedstawić w formie sumy strumieni składowych. Przebieg ich w przekroju prostopadłym do osi rotora (osie x, y) opisuje sinusoidalna funkcja.

Zmiana strumienia w czasie w zależności od współczynnika tłumienia zachodzi tym szybciej, im większe są n i m . Ponieważ n i m występują w wyrażeniu (10) w drugiej potęgce, to wyższe harmoniczne składowe strumienia są szybko tłumione, gdy natomiast podstawowa fala odpowiadająca $n = m = 1$ trwa odpowiednio dłużej.

Stała czasowa będąca odwrotnością współczynnika tłumienia i określająca intensywność tłumienia podstawowej harmonicznej strumienia wyniesie:

$$T_{1,1} = T_{st} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu}{\rho(\delta\mu + D_2)} \cdot \frac{D_2 l}{\frac{a}{l} + \frac{l}{a}} \quad (\text{sek}) \quad (11)$$

gdzie: l - długość beczki rotora (w cm),
 D_2 - średnica beczki rotora (w cm),
 a - ekwiwalentna szerokość beczki rotora, w osi poprzecznej (w cm),
 ρ - oporność właściwa materiału beczki rotora (w cm^2/sek),
 μ - średnia przenikalność magnetyczna stali rotora.

Wartość T_{st} określa właśnie hamujący wpływ, jaki wywiera stalowy blok rotora na szybkość zmiany strumienia przy zaburzeniu stanu elektromagnetycznej równowagi w obwodzie wzbudzającym turbogenerators.

Znając zatem wymiary rotora, elektromagnetyczne charakterystyki materiału odkuwki, a także dane charakteryzujące uzwojenie wzbudzenia maszyny z pomocą formuły:

$$T_{do} = T_{gł} = T_w \left(1 + \frac{T_{st}}{T_w} \right) = k \cdot T_w \quad (12)$$

z uwzględnieniem (11) i (1) obliczyć możemy wielkość stałej czasowej rotora turbogenerators z uwzględnieniem wpływu prądów wirowych.

Wpływ, jaki wywierają wymiary rotora na stałą czasową T_{do} można prześledzić analizując dane przytoczonej poniżej tabeli, w której zebrane są obliczone za pomocą formuły (12) wartości T_{do} dla serii radzieckich turbogeneratorsów typu T-2 i TB-2.

Do obliczeń dla wszystkich rozpatrywanych maszyn przyjęto średnie znaczenia przenikalności magnetycznej μ i oporności właściwej ρ .

Analiza danych tabeli wykazuje, że przypisanie współczynnika k stałego znaczenia przywodzi do błędnych rezultatów, gdyż wielkość jego zmienia się stosunkowo silnie w zależności od mocy maszyny.

Autor artykułu przeprowadził serię doświadczeń nad T_{do} na modelu turbogenerators. Wyniki pomiarów i obliczeń dają minimalne odchylenia. Potwierdza to słuszność metodyki przyjętej przy rozpatrywaniu omawianego problemu.

| Typ turbo- generatora | $T_{do} = T_w + T_{st}$ (sek) $k = 1,33 = \text{const}$ | $T_{do} = T_w + T_{st}$ (sek) $k = \text{var}$ | $k = 1 + \frac{T_{st}}{T_w}$ |
|--------------------------|--|---|------------------------------|
| T2-2,5-2 | 4,44=3,33+1,11 | 5,75=3,33+2,42 | 1,72 |
| T2-4-2 | 5,6 = 4,2 + 1,4 | 6,59=4,2+2,39 | 1,57 |
| T2-6-2 | 7,1=5,32+1,68 | 8,88=5,32+3,56 | 1,67 |
| T2-12-2 | 8,0=6,0+2,0 | 10,78=6,0+4,78 | 1,79 |
| T2-25-2 | 10,2=7,65+2,55 | 11,85=7,65+4,2 | 1,55 |
| T2-50-2 | 11,6=8,69+2,91 | 13,65=8,69+4,96 | 1,57 |
| TB2-100-2 | 13,0=9,76+3,24 | 14,2=9,76+4,44 | 1,44 |
| TB2-150-2 | 10,5=7,7+2,63 | 10,71=7,87+2,84 | 1,36 |

LITERATURA

- [1] Р. Р ъ д е н б е р г, Переходные процессы в электроэнергетических системах, И.Л. 1955.
- [2] Г.Л. К о в а л е в с к и й, Исследование параметров роторных цепей неявнополюсных синхронных машин, Диссертация М.Э.И. 1955.

Резюме

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПОСТОЯННА ВРЕМЕНИ РОТОРА
ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Рассматриваются переходные процессы возникающие в обмотке возбуждения турбогенератора при разомкнутой обмотке яркого. Выводится удобную для практики формулу позволяющую рассчитать постоянную времени ротора T_{ω} с учетом влияния вихревых токов в стали ротора. Доказывается, что демпфирующие влияние стальной поковки ротора на скорость изменения потока при электромагнитных возмущениях в цепи возбуждения, изменяется сильно в зависимости от мощности машины.

R é s u m é

CONSTANTE ELECTROMAGNÉTIQUE DU TEMPS DE L'INDUIT
D'UNE TURBOGENERATRICE SYNCHROME

L'auteur explique les phénomènes transitoires dans l'enroulement de l'induit, avec l'enroulement stator ouvert. Il déduit une formule commode pour la pratique des calculs de la constante du temps de l'induit. Il met aussi à l'évidence, que l'influence noyau d'acier de l'induit sur la vitesse de changement du flux pendant les périodes des perturbations dans le circuit d'excitation-change d'une façon considérable avec la puissance des machines.