

Tadeusz SKOCZKOWSKI

WPLYW ZMIAN CZĘSTOTLIWOŚCI, TEMPERATURY I PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH NA REZYSTANCJĘ I REAKTANCJĘ WSADU RUROWEGO

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ zmian pewnych wielkości konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na parametry elektromagnetyczne wsadu ferromagnetycznego nagrzewanego indukcyjnie. Rozważania przeprowadzono wykorzystując znaną z literatury metodę iteracyjną, której idea polega na podziale grubego elementu ferromagnetycznego na cienkie warstwy o ustalonych wartościach stałych materiałowych ρ i μ . Przedstawiono i szczegółowo przedyskutowano wpływ zmian rezystywności i jej współczynnika temperaturowego, charakterystyki magnesowania, wymiarów geometrycznych, temperatury i jej rozkładu, częstotliwości na rezystancję i reaktancję wsadu w postaci nieskończonej długości rury ferromagnetycznej. Uzasadniono potrzebę znajomości spodziewanych zmian obciążenia przy projektowaniu tyrystorowych źródeł zasilania. Zaprezentowane wyniki są przykładem charakterystyk, jakie powinien posiadać projektant nagrzewnicy indukcyjnej.

1. Wstęp

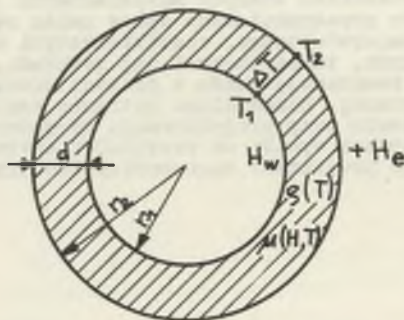
Podstawowym źródłem zasilania nagrzewnic indukcyjnych średniej częstotliwości są obecnie przekształtniki tyrystorowe. Nagrzewnica indukcyjna z uwagi na swój polowy, nieliniowy i niestacjonarny charakter stanowi interesujące i specyficzne obciążenie zasilaczy tyrystorowych. Zaprojektowanie takiego zasilacza nie stanowi z punktu widzenia energoelektroniki problemu, o ile tylko projektant zna parametry obciążenia w czasie całego cyklu nagrzewania. Musi on umieć oszacować wartość obciążenia przy zmianach asortymentu wsadu, rozrzucie jego właściwości materiałowych, zmianach warunków zasilania, a nade wszystko temperatury. Ważna jest więc znajomość nie tylko wartości obciążenia w pewnym punkcie pracy, ale i obszaru spodziewanych jego zmian.

Pożądane wydaje się być określenie wpływu różnych czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na parametry wsadu. Próbę określenia zależności rezystancji i reaktancji od częstotliwości w przypadku nagrzewania masywnego walca zaprezentowano w pracy [1].

2. Ocena wpływu pewnych czynników na parametry wsadu

Opisana w pracy [2] metoda wyznaczania parametrów elektromagnetycznych wsadu ferromagnetycznego może zostać wykorzystana do realizacji tego celu. Na podstawie algorytmu tej metody napisany został w języku FORTRAN program na EMC (ODRA 1305 lub IBM PC). Wykorzystany on został do określenia wpływu zmian rezystancji i jej współczynnika temperaturowego, charakterystyki magnesowania, wymiarów geometrycznych, temperatury i jej rozkładu, częstotliwości na rezystancję i reaktancję wsadu w postaci nieskończonej długości rury ferromagnetycznej.

Uzyskane przykładowe wyniki zostaną zaprezentowane na kolejnych rysunkach. Przedstawione na nich wartości R i X wsadu są obliczone dla 1 m jego długości. Podstawowe parametry układu, o ile nie zostało to inaczej

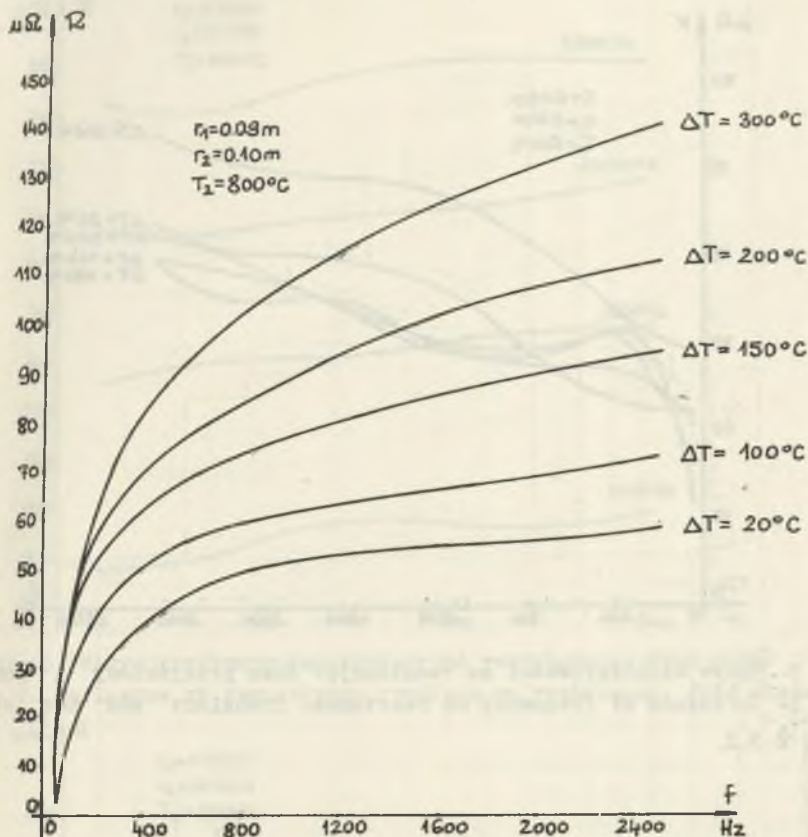


Rys. 1. Przekrój nagrzewanej rury
Fig. 1. Cross section of the heated pipe

zaznaczone na rysunkach, były następujące (rys. 1): promień zewnętrzny rury $r_2 = 0,10$ m, natężenie pola magnetycznego na zewnętrznej powierzchni rury $H_w = 10^5$ A/m, rezystywność materiału rury w temperaturze 20°C $\rho_{20^\circ\text{C}} = 2 \times 10^{-7}$ Ωm , współczynnik temperaturowy rezystywności $\beta = 0,000421$ 1/K, wykorzystywano uśrednioną charakterystykę magnesowania obowiązującą dla stali o zawartości węgla od 0,22 do 0,99%. Obliczenia prowadzono dla zakresu częstotliwości od 50 do 2500 Hz, gdzie górna granica odpowiada mniej więcej zakresowi częstotliwości krajowych jednostak-

towych falowników prądu. Określając wpływ charakterystyki magnesowania w obliczeniach posługiwano się charakterystykami "+20%" i "-20%" otrzymanymi z charakterystyki uśrednionej odpowiednio przez zmniejszenie lub zwiększenie rzędnych krzywej o 20%. Przy analizie wpływu ρ zakres przyjmowanych wartości $\rho_{20^\circ\text{C}}$ wynosił od 1×10^{-6} do 2×10^{-6} Ωm , a współczynnika β od 0,00421 do $0,00620 \times 1/\text{K}$.

A oto omówienie uzyskanych wyników. Ze wzrostem częstotliwości rezystancja wsadu rośnie, reaktancja w zależności od gradientu temperatury w ścianie rury może posiadać kilka ekstremów lokalnych, szczególnie w stanie przejściowych (rys. 2.3). Ze wzrostem temperatury rezystancja, reaktancja i impedancja maleją, a stosunek tych zmian nie przekracza stosunku 3:1 (rys. 4).

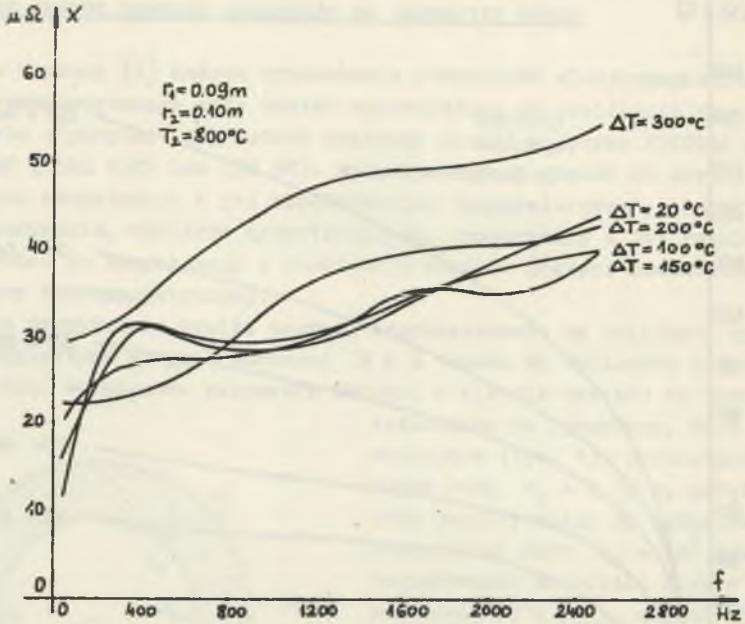


Rys. 2. Wpływ częstotliwości na rezystancję. Stan przejściowy i gorący

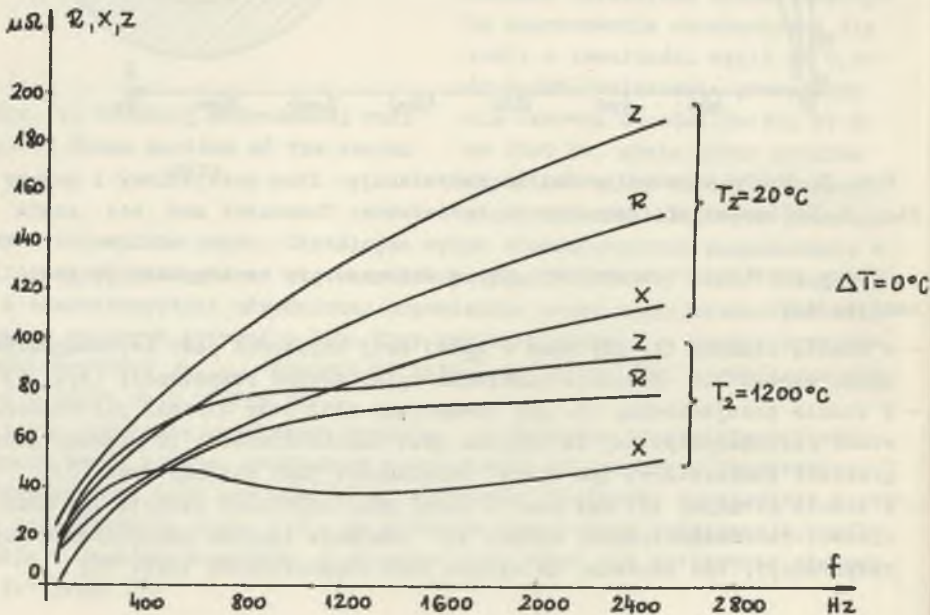
Fig. 2. Influence of frequency on resistance. Transient and hot state

Wpływ gradientu temperatury ΔT w ścianie rury na rezystancję jest następujący:

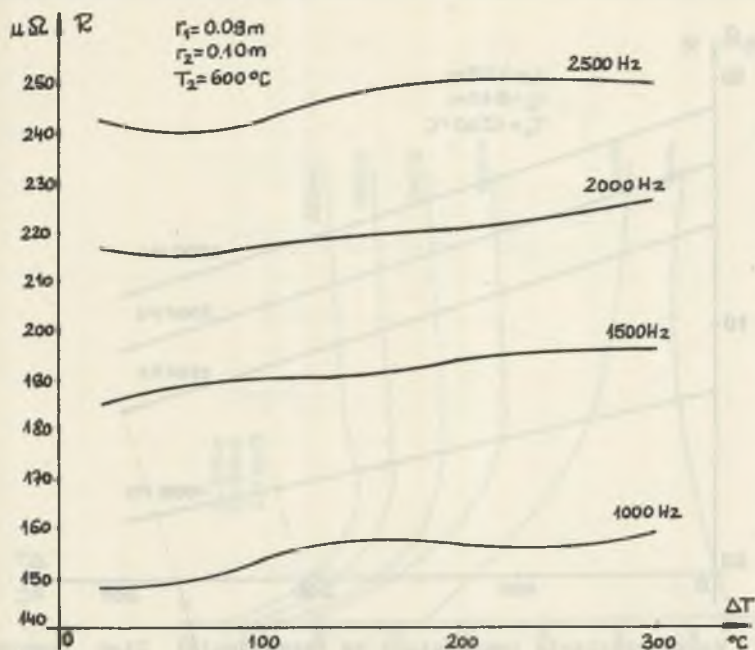
- w stanie zimnym, tj. gdy wsad w całej swej objętości jest ferromagnetykiem, wzrost ΔT powoduje niewielki tylko wzrost rezystancji (rys. 5)
- w stanie przejściowym, tj. gdy zewnętrzny słuź rury utracił już właściwości ferromagnetyczne, im większa jest częstotliwość i im większy jest gradient temperatury, tym wzrost rezystancji jest większy (rys. 6),
- w stanie gorącym, tj. gdy wsad w całej swej objętości utracił już właściwości ferromagnetyczne, wzrost ΔT powoduje liniowe zmniejszenie się rezystancji, tym szybsze, im wyższa jest częstotliwość (rys. 7),



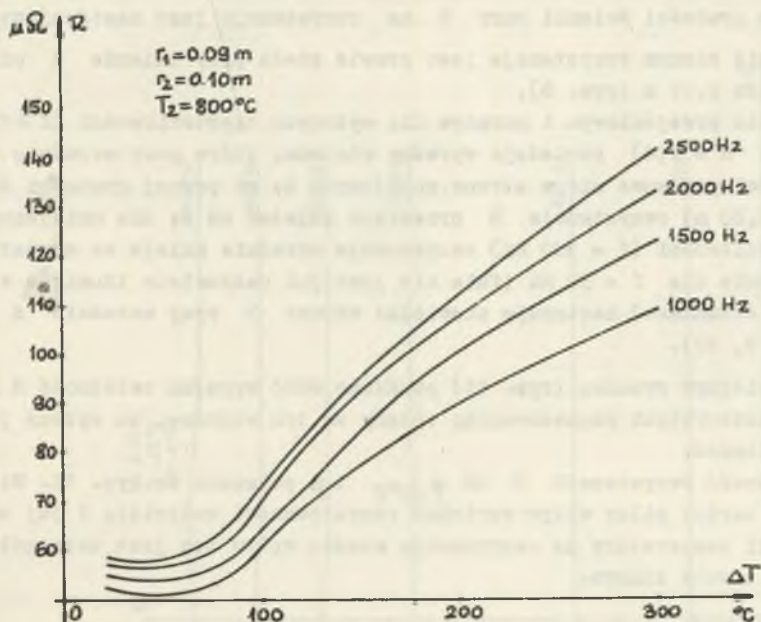
Rys. 3. Wpływ częstotliwości na reaktancję. Stan przejściowy i gorący
 Fig. 3. Influence of frequency on reactance. Transient and hot state



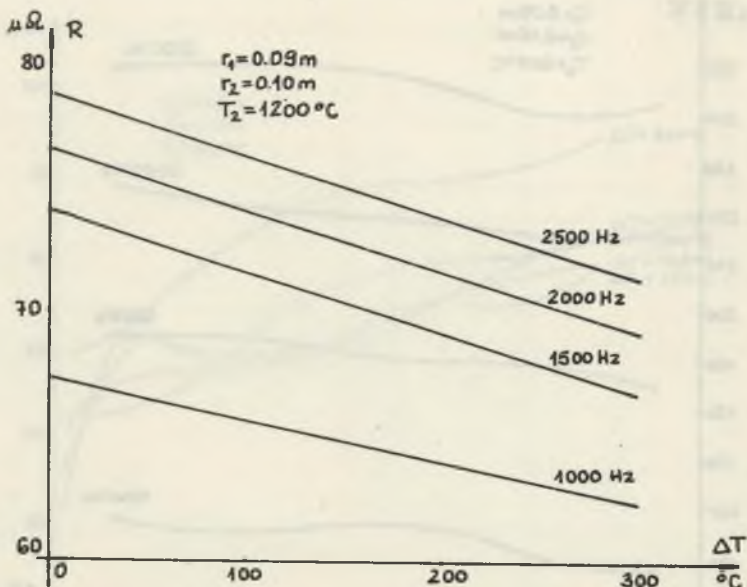
Rys. 4. Wpływ częstotliwości na R, X, Z rury. Stan zimny i gorący
 Fig. 4. Influence of frequency on R, X, Z of the pipe. Transient and hot state



Rys. 5. Wpływ gradientu temperatury na rezystancję. Stan zimny
 Fig. 5. Influence of temperature gradient on resistance. Cold state



Rys. 6. Wpływ gradientu temperatury na rezystancję. Stan przejściowy
 Fig. 6. Influence of temperature gradient on resistance. Transient state



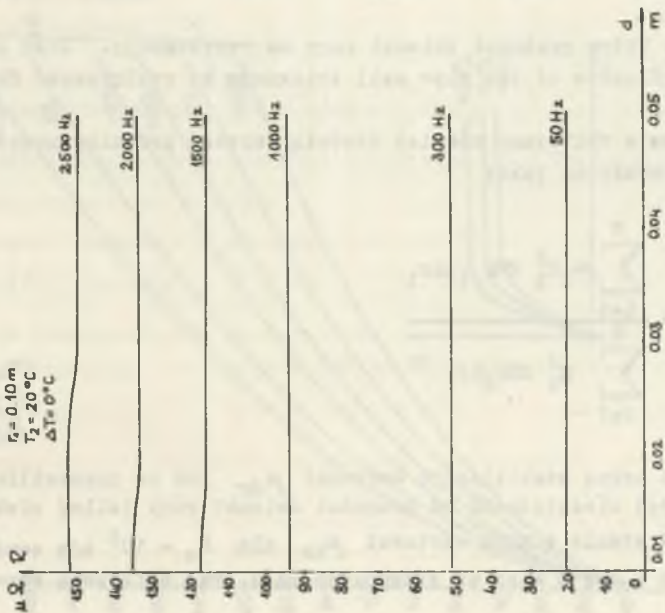
Rys. 7. Wpływ gradientu temperatury na rezystancję. Stan gorący
 Fig. 7. Influence of temperature gradient on resistance. Hot state

Wpływ grubości ścianki rury d na rezystancję jest następujący:

- w stanie zimnym rezystancja jest prawie stała przy zmianie d od 0,001 do 0,05 m (rys. 8),
- w stanie przejściowym i gorącym dla wyższych częstotliwości ($f \geq 1000 \text{ Hz}$) krzywe $R = f(d)$ posiadają wyraźne minimum, które przy wzroście częstotliwości przesuwa się w stronę mniejszych d ; od pewnej grubości ścianki ($d = 0,03 \text{ m}$) rezystancja R przestaje zależeć od d ; dla mniejszych częstotliwości ($f = 300 \text{ Hz}$) rezystancja wyraźnie maleje ze wzrostem d , a jedynie dla $f = 50 \text{ Hz}$ (fala nie jest już całkowicie tłumiona w cieńszych ściankach) następuje niewielki wzrost R przy wzroście d (rysunek 9, 10).

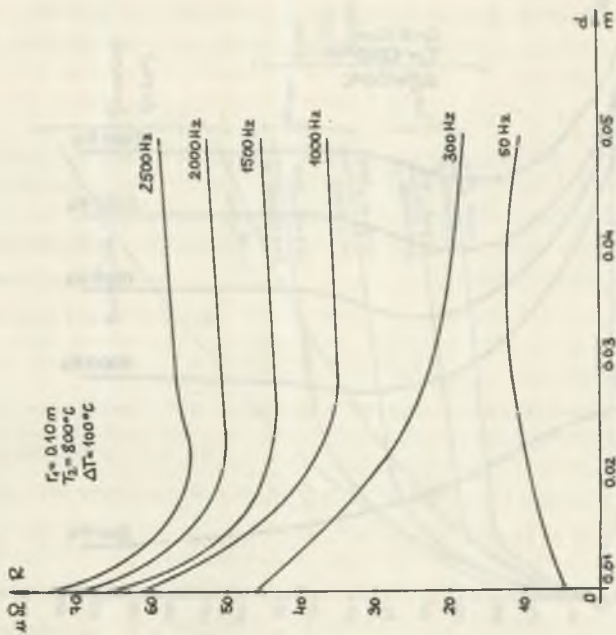
Na kolejnym rysunku (rys. 11) pokazano dość wyraźną zależność R i X od charakterystyki magnesowania; zmiany są tym większe, im wyższa jest częstotliwość.

Zależność rezystancji R od $\varphi_{20^\circ\text{C}}$ i β pokazano na rys. 12. Widać wyraźny bardzo silny wpływ wartości rezystywności materiału i jej zmian w funkcji temperatury na rezystancję wsadu; wpływ ten jest szczególnie silny w stanie zimnym.



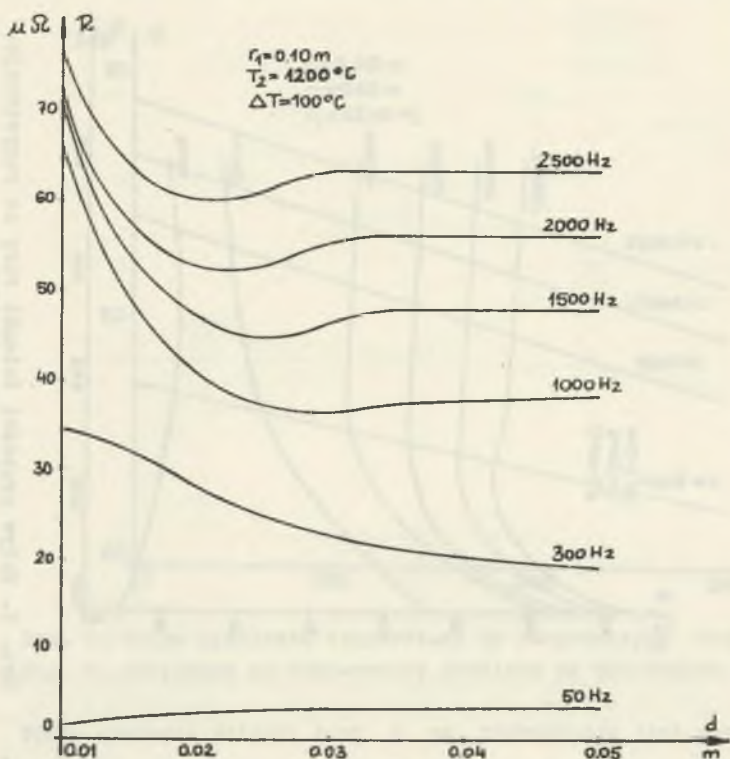
Rys. 8. Wpływ grubości ścianki rury na rezystancję.
Stan zimny

Fig. 8. Influence of the pipe wall thickness on re-
sistance. Cold state



Rys. 9. Wpływ grubości ścianki rury na rezystancję.
Stan przejściowy

Fig. 9. Influence of the pipe wall thickness on re-
sistance. Transient state

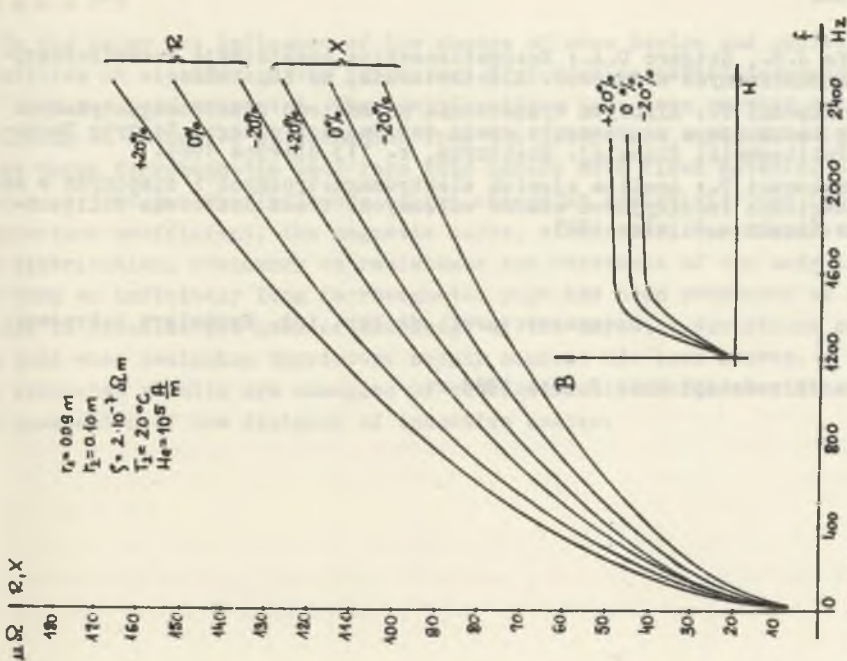


Rys. 10. Wpływ grubości ścianki rury na rezystancję. Stan gorący
 Fig. 10. Influence of the pipe wall thickness on resistance. Hot state

W programie obliczano również średnią wartość przenikalności magnetycznej wsadu określoną jako:

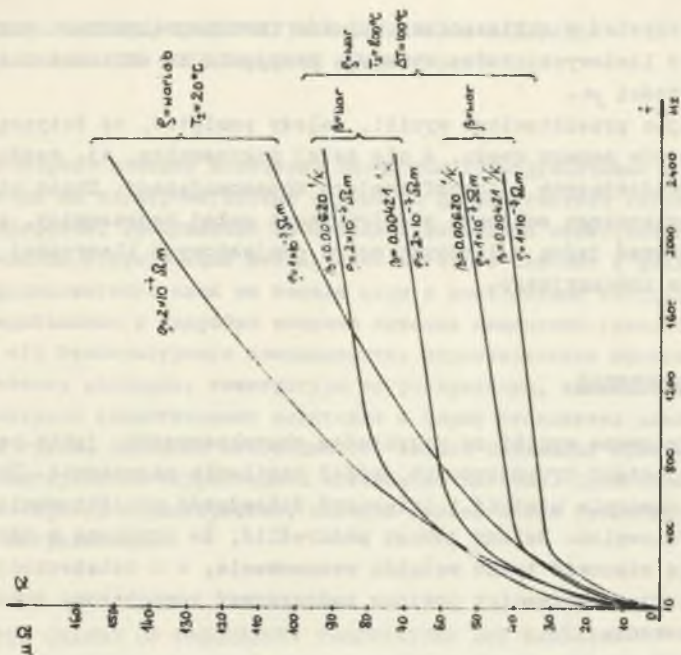
$$\mu_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i H_i^2 2\pi r_i \Delta r_i}{\sum_{i=1}^n H_i^2 2\pi r_i \Delta r_i}$$

Stwierdzono pewną stabilizację wartości μ_{sr} już od częstotliwości ok. 300 Hz i jej niezależność od grubości ścianki rury (silny efekt powierzchniowy). W stanie zimnym wartości μ_{sr} dla $H_e = 10^5 \text{ A/m}$ zawierają się pomiędzy 20 a 36, a więc są stosunkowo małe. Tak obliczoną wartość μ_{sr}



rys. 11. Wpływ charakterystyki magnesowania na rezystancję i impedancję

Fig. 11. Influence of the magnetization curve on resistance and impedance



rys. 12. Wpływ rezystywności i jej współczynnika temperaturowego na rezystancję. Stan zimny i przejściowy

Fig. 12. Influence of resistivity and its temperature coefficient on resistance. Cold and transient state

można wykorzystać w obliczeniach układów ferromagnetycznych przy zastosowaniu metod liniowych, które wymagają przyjęcia do obliczeń określonej stałej wartości μ .

Analizując przedstawione wyniki, należy pamiętać, że dotyczą one jedynie parametrów samego wsadu, a nie całej nagrzewnicy, tj. wsadu, wzbudnika, szyn doprowadzających i transformatora dopasowującego. Chcąc otrzymać parametry zastępczego schematu elektrycznego całej nagrzewnicy, projektant musi zastosować jedną z licznych metod projektowych klasycznej teorii grzejnictwa indukcyjnego.

3. Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki są przykładem charakterystyk, jakie powinien posiadać projektant tyrystorowych źródeł zasilania nagrzewnic. Ich znajomość może znacznie ułatwić i zwiększyć dokładność projektowania obwodów siłowych falownika. Należy jednak podkreślić, że uzyskane w ten sposób wyniki mogą stanowić tylko wstępne oszacowanie, a o ostatecznej poprawności projektu nagrzewnicy powinna zdecydować komputerowa symulacja procesu nagrzewania.

LITERATURA

- [1] Joffe J.S., Gitgarc D.A.: Energeticzeskije czastotnyje charakterystyki indukcyjnych ustanowok. Elektrotermia, nr 52, 1966.
- [2] Skoczkowski T.: Algorytm wyznaczania parametrów elektromagnetycznych przy indukcyjnym nagrzewaniu wsadu ferromagnetycznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka, z. 113 Gliwice 1989.
- [3] Skoczkowski T.: Analiza zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w nagrzewnicach indukcyjnych wsadów walcowych. Praca doktorska Politechniki Śląska - Gliwice 1985.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski

Wpłynęło do redakcji dnia 2 maja 1988 r.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА
НА ОМИЧЕСКОЕ И РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Р е з ю м е

В статье оговорено влияние изменений некоторых конструкционных и эксплуатационных величин на электромагнитные параметры ферромагнитной заготовки с индукционным нагревом. Рассуждения проводились используя известный по литературным источникам итерационный метод, идея которого состоит в разделении массивного ферромагнитного слоя на тонкие слои с постоянными коэффициентами материала. Представлено и подробно описано влияние изменений удельного сопротивления и его температурного коэффициента, характеристики намагничивания, геометрических размеров, температуры ее распределения, частоты на омического и реактивное сопротивление заготовки в форме бесконечно длинной ферромагнитной трубы. Доказана необходимость знания ожидаемых изменений нагрузки при проектировании тиристорных источников питания. Представленные результаты, это пример характеристик, которые должен иметь проектировщик индукционного нагревателя.

INFLUENCE OF THE CHANGE OF FREQUENCY, TEMPERATURE AND MATERIAL
PARAMETERS ON RESISTANCE AND REACTANCE OF TUBULAR FERROMAGNETIC BODY

S u m m a r y

In the paper the influence of the change of some design and operating quantities on electromagnetic parameters of induction heated ferromagnetic body has been presented. The considerations have been carried out employing an iterative method known from the literature which idea is to slice thick ferromagnetic body into thin layers with fixed material constants ρ and μ . The influence of the change of resistivity and its temperature coefficient, the magnetic curve, dimensions, temperature and its distribution, frequency on resistance and reactance of the body in the form an infinitely long ferromagnetic pipe has been presented and discussed in details. The need of knowledge of the expected variations of the load when designing thyristory supply sources has been proved. The presented results are examples of characteristics which should be in the possession of the designer of induction heater.