

FALOWNIKI TYRYSTOROWE

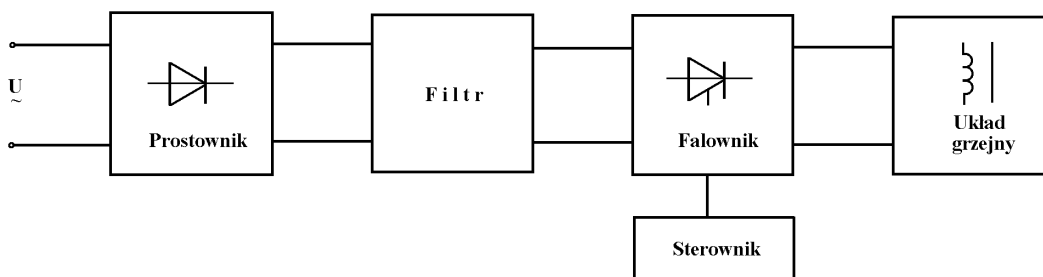
1. Wiadomości ogólne

Nagrzewanie indukcyjne jest bezpośrednią metodą grzejną, w której energia cieplna powstaje wewnątrz wsadu z energii pola elektromagnetycznego. Energia elektromagnetyczna przekazywana do wsadu indukuje w nim prądy wirowe, które wytwarzają ciepło Joule'a. Bezstykowy sposób doprowadzania energii oraz bezpośrednia metoda nagrzewania decydują o zaletach tej metody grzejnej, takich jak:

- duża szybkość nagrzewania,
- dzięki krótkim czasom nagrzewania straty wsadu na utlenianie są praktycznie pomijalne,
- brak bezpośredniego styku wsadu ze źródłem energii ułatwia mechanizację i automatyzację procesów technologicznych.

1.1. Schemat blokowy nagrzewarki

Schemat blokowy układu elektrycznego nagrzewarki indukcyjnej z zasilaczem falownikowym przedstawia rys.9.1.



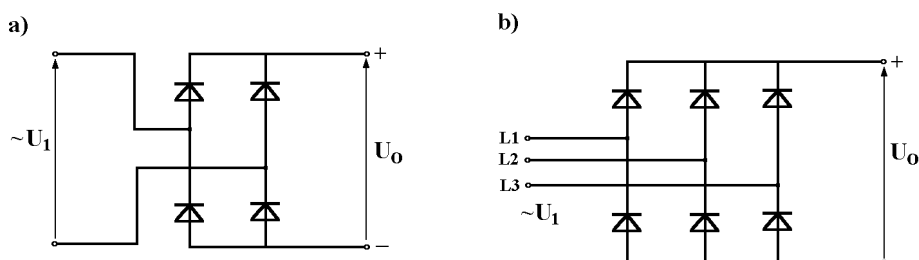
Rys.9.1. Schemat blokowy nagrzewarki indukcyjnej z zasilaczem falownikowym

Jak wynika z rys.9.1, w układzie elektrycznym nagrzewarki można wyróżnić następujące zespoły;

- układ prostowniczy,
- filtr dolnoprzepustowy,
- falownik ze sterownikiem,
- układ grzejny.

1.1.1. Układ prostowniczy

W nagrzewarkach indukcyjnych małej mocy (do kilku kW) może być stosowany układ prostowniczy mostkowy zasilany napięciem jednofazowym (rys.9.2a), natomiast przy większych mocach stosuje się układ mostkowy zasilany trójfazowo (rys.9.2b).



Rys.9.2. Układy prostownicze: a) mostkowy jednofazowy, b) mostkowy trójfazowy

Dla układu prostowniczego mostkowego jednofazowego (rys.9.2a); wartość średnia U_0 i skuteczna U_{0sk} napięcia wyjściowego oraz wartość napięcia tętnień U_T i współczynnika tętnień k_T , wynoszą:

$$U_0 = \frac{2}{\pi} U_m = 0,9 U_1 ; \quad U_{0sk} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U_1 \quad (9.1)$$

$$U_T = \sqrt{U_{0sk}^2 - U_0^2} ; \quad k_T = \frac{U_T}{U_0} = 0,48 \quad (9.2)$$

Dla układu mostkowego trójfazowego (rys.9.2b) wartości U_0 i k_T wynoszą:

$$U_0 = 1,35 U_{1f} = 1,35 \frac{U_1}{\sqrt{3}} ; \quad k_T = 0,04 \quad (9.3)$$

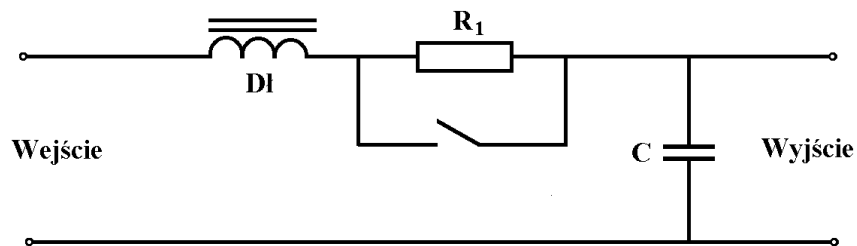
gdzie: U_1 - napięcie przewodowe trójfazowego zasilania prostownika.

1.1.2. Filtr dolnoprzepustowy

Dla właściwej pracy falownika, napięcie tętnień na jego wejściu powinno zawierać się w określonych granicach ($U_T \leq 0,1 U_m$). W celu zmniejszenia napięcia tętnień uzyskiwanego z prostownika, stosuje się filtr składający się z dławika włączonego szeregowo i kondensatora włączonego równolegle (rys.9.3). Wartości indukcyjności dławika i pojemności kondensatora są zależne od wartości napięcia i natężenia prądu falownika oraz od układu prostowniczego (wartość napięcia tętnień U_T).

Dla zapewnienia stałej reaktancji dławika rdzeń jego posiada szczelinę powietrzną.

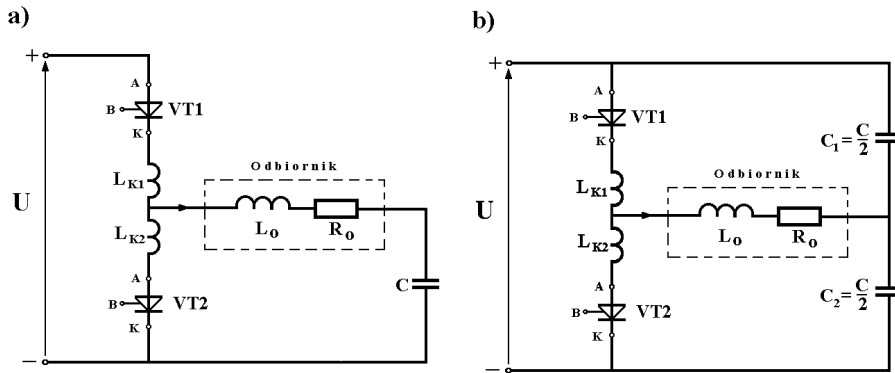
Dla zabezpieczenia zaworów prostownika przed dużym prądem udarowym w chwili włączenia układu do sieci, stosuje się rezystor R_1 włączony szeregowo z dławikiem przed kondensatorem (rys.9.3) ograniczający początkowy prąd ładowania kondensatora C . Po rozruchu układu rezystor R_1 jest zwierany.



Rys. 9.3. Filtr elektryczny dolnoprzepustowy

1.1.3. Falownik

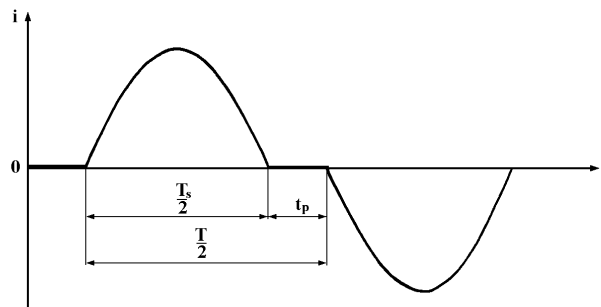
Falownik zamienia prąd stały na przemienny o regulowanej zwykle częstotliwości. Układ elektryczny falownika szeregowego przedstawia rys.9.4.



Rys.9.4. Falownik szeregowy: a) z jednym kondensatorem rezonansowym, b) z dzieloną pojemnością rezonansową

Rezonansowy obwód falownika (rys.9.4a) stanowi szeregowe połączenie kondensatora C , wzbudnika nagrzewarki o indukcyjności L_0 i rezystancji R_0 oraz dławika komutacyjnego L_k . Prąd i i napięcie przemiennie na obciążeniu otrzymuje się w wyniku cyklicznego przełączania tyrystorów $VT1$ i $VT2$ w obwodzie rezonansowym (rys.9.5).

Dla falownika z jednym kondensatorem (rys.9.4a), po załączeniu tyrystora $VT1$, kondensator C ładuje się przez odbiornik i dławik komutacyjny L_{k1} . Prąd i płynący przez odbiornik początkowo narasta, uzyskuje wartość szczytową, następnie maleje do zera gdy napięcie na kondensatorze zrówna się z napięciem U zasilającym falownik. Gdy impuls prądowy (rys.9.5) osiągnie wartość równą zero, wówczas tyrystor $VT1$ samoczynnie wyłącza się. Po załączeniu tyrystora $VT2$, następuje rozładowanie kondensatora C przez odbiornik, dławik L_{k2} i przewodzący zawór. Czasy trwania impulsu ładowania i rozładowania są takie same, lecz w obu tych czasach prądy płynące przez wzbudnik mają kierunki przeciwne.



Rys.9.5. Przebieg prądu w odbiorniku falownika szeregowego, gdzie: T_s - okres drgań własnych obwodu rezonansowego, T - okres załączania tyrystorów, t_p - przerwa czasowa między dodatnią a ujemną półfalą prądu w odbiorniku

Czas trwania impulsu prądowego T_s określa pulsacja drgań własnych obwodu rezonansowego,

$$\omega_s = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (9.4)$$

przy czym;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad ; \quad \alpha = \frac{R_0}{2L} \quad (9.5)$$

gdzie: ω_s - pulsacja drgań własnych obwodu rezonansowego z uwzględnieniem tłumienia,

ω_0 - pulsacja drgań własnych obwodu rezonansowego,

α - współczynnik tłumienia,

$L = L_0 + L_{k1}$ - sumaryczna indukcyjność obwodu szeregowego,

C - pojemność kondensatora,

L_0, R_0 - indukcyjność i rezystancja wzbudnika nagrzewarki.

Poprawna praca falownika jest możliwa przy spełnieniu warunku:

$$t_p + t_w \geq t_q \quad (9.6)$$

gdzie: t_p - przerwa czasowa (rys.9.5),

$$t_p = \frac{T}{2} - \frac{T_s}{2} \quad (9.7)$$

t_w - czas trwania napięcia wstecznego na wyłączonym tyrystorze, indukowanym w dławiku L_k ,
 t_q - katalogowy czas wyłączenia tyrystora.

W falownikach szeregowych częstotliwość impulsowania tyrystorów f_i jest zwykle mniejsza od częstotliwości f_s drgań własnych obwodu rezonansowego.

Dławik komutacyjny L_k przyspiesza wyłączanie tyrystorów z jednej strony, z drugiej zaś, ogranicza prąd zwarcia przy zakłóceniovym jednoczesnym załączaniu obu tyrystorów.

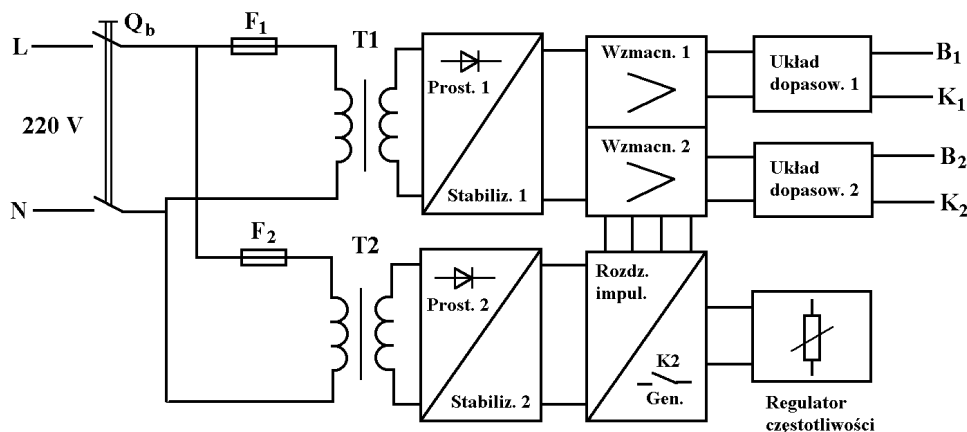
Układ falownika z jednym kondensatorem pobiera energię ze źródła zasilania tylko w jednym półokresie pracy (gdy przewodzi tyrystor VT1).

W falowniku szeregowym z dzieloną pojemnością (rys.9.4b) energia ze źródła jest pobierana w obu półokresach prądu obciążenia płynącego przez wzbudnik. Przy przewodzącym tyrystorze VT1, prąd odbiornika jest sumą prądów ładowania kondensatora C_2 i rozładowania kondensatora C_1 . Suma napięć na kondensatorach C_1 i C_2 jest zawsze równa napięciu U zasilającemu falownik. Podczas pracy falownika zmienia się jedynie potencjał punktu "A".

1.1.4. Sterownik

Zadaniem sterownika jest wytwarzanie impulsów prądowych, które umożliwiają załączanie poszczególnych tyrystorów w odpowiednio wybranych chwilach czasowych. Dla zagwarantowania pewności zadań tyrystorów musi być odpowiednia stromość narastania czoła impulsów sterujących.

Przykład schematu blokowego sterownika przedstawia rys.9.6.



Rys.9.6. Schemat blokowy sterownika

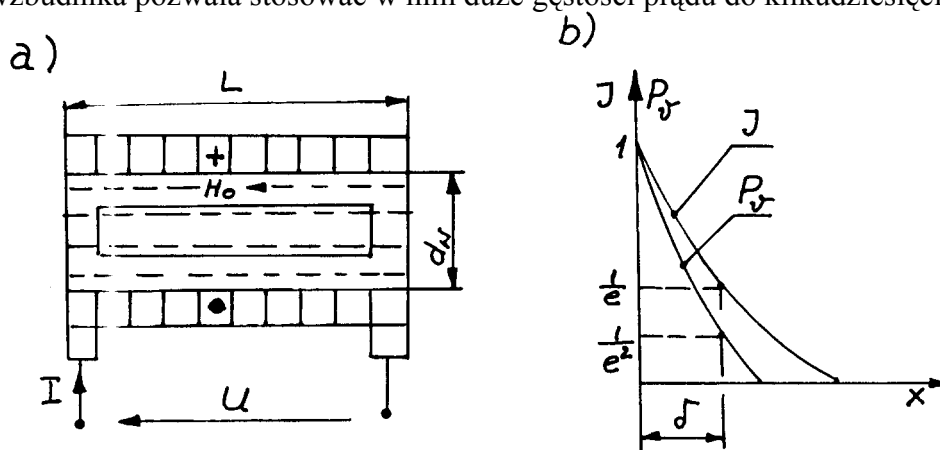
Można w nim wyróżnić:

- dwa zasilacze o stabilizowanych napięciach wyjściowych,
- generator impulsów prostokątnych o regulowanej częstotliwości,
- układ rozdzielacza impulsów,
- dwa wzmacniacze impulsów wyzwalających,
- dwa układy dopasowujące wartości impulsów ze wzmacniaczy do wejść sterujących tyrystorów (B_1 , B_2 - bramki; K_1 , K_2 - katody), układy te stanowią również separację obwodu prądowego falownika od układów sterownika.

Zastosowanie oddzielnych zasilaczy do generatora impulsów i wzmacniaczy ułatwia separację układów przed możliwością wzajemnych zakłóceń napięciami impulsowymi.

1.1.5. Układ grzejny

Układ grzejny składa się ze wzbudnika i sprzężonego z nim magnetycznie wsadu (rys.9.7). Wzbudnik jest cewką o niewielkiej liczbie zwojów nawiniętych wielowarstwowo przy niskich częstotliwościach (50÷200 Hz) i jednowarstwowo przy wyższych częstotliwościach. W praktyce przemysłowej wzbudniki są wykonywane z rurki miedzianej, zwykle profilowanej na prostokąt, przez wnętrze której przepływa woda chłodząca. Rozkład gęstości prądu w przekroju przewodu wzbudnika jest nierównomierny. Największa gęstość prądu występuje przy powierzchni zewnętrznej przewodu (zjawisko naskórkowości). Im wyższa częstotliwość prądu we wzbudniku, tym większa nierównomierność rozkładu gęstości prądu. Chłodzenie wodne wzbudnika pozwala stosować w nim duże gęstości prądu do kilkudziesięciu A/mm².



Rys.9.7. Nagrzewanie indukcyjne skośne: a) indukcyjny układ grzejny ze wzbudnikiem cylindrycznym, b) rozkład gęstości prądu J , mocy grzejnej objętościowej P_v oraz głębokości wnikania prądu δ

Podstawowymi wielkościami opisującymi nagrzewanie indukcyjne są:

- głębokość wnikania prądu δ ,
- jednostkowa moc objętościowa P_v ,
- jednostkowa moc powierzchniowa P_s .

Głębokość wnikania prądu do wsadu określa zależność,

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{\rho}{\mu f}} \quad (9.8)$$

gdzie: δ - głębokość wnikania prądu do wsadu, m,
 ρ - rezystywność wsadu, $\Omega \cdot m$,
 μ - przenikalność magnetyczna wsadu, H/m,
 f - częstotliwość napięcia zasilającego wzbudnik, Hz.

Głębokość wnikania zależy więc od własności wsadu (ρ i μ) oraz od częstotliwości zmian pola magnetycznego. W miarę postępowania w głąb wsadu gęstość prądu maleje wykładniczo (rys.9.7b) przy czym na głębokości δ maleje e ($e = 2,718$) razy w stosunku do gęstości przy powierzchni.

Wraz ze zmianą gęstości prądu, zmienia się moc grzejna objętościowa (moc grzejna wydzielająca się w jednostce objętości wsadu), która wyraża się wzorem;

$$P_{\vartheta} = J^2 \rho = H_0^2 \frac{2\rho}{\delta^2} e^{-\frac{2x}{\delta}} \quad (9.9)$$

gdzie: P_{ϑ} - moc grzejna objętościowa na głębokości x , W/m^3 ,
 J - gęstość prądu na głębokości x , A/m^2 ,
 H_0 - natężenie pola magnetycznego na powierzchni wsadu, A/m ,
 ρ - rezystywność wsadu, $\Omega \cdot m$,
 δ - głębokość wnikania dla danego wsadu, m .

Dla wzbudników „dostatecznie długich” ($L \gg d_w$ - rys.11.7a) natężenie pola magnetycznego H_0 w szczelinie pomiędzy wsadem a wzbudnikiem wyznacza się z zależności;

$$H_0 = \frac{I \cdot z}{L} \quad (9.10)$$

gdzie: I - natężenie prądu we wzbudniku, A ,
 z - liczba zwojów wzbudnika,
 L - długość wzbudnika, m .

Dla wsadów „dostatecznie grubych” ($d \gg \delta$ dla prętów) jednostkową moc powierzchniową określa zależność,

$$P_s = H_0^2 \frac{\rho}{\delta} \quad (9.11)$$

gdzie: P_s - jednostkowa moc powierzchniowa, W/m^2 ,
 H_0 , ρ , δ - jak w (11.9).

Oprócz mocy grzejnej, do wsadu jest również wprowadzana przez pole elektromagnetyczne moc bierna. Wartość mocy biernej dla wsadów stalowych jest większa od mocy grzejnej. Stąd też współczynnik mocy układu grzejnego jest niski i wynosi $\cos\varphi = 0,1 \div 0,2$ przy $f = 10$ kHz i $\cos\varphi = 0,25 \div 0,3$ przy $f = 50$ Hz. Nagrzewarki indukcyjne wymagają zatem urządzeń do kompensacji mocy biernej.

Układ grzejny wzbudnik - wsad w obwodzie elektrycznym można rozpatrywać jako szeregowe połączenie opornika o rezystancji R_w i reaktancji X_w określonych zależnościami:

$$R_w = \frac{P_w}{I_w^2} \quad ; \quad X_w = \frac{Q_w}{I_w^2} \quad (9.12)$$

gdzie: P_w - moc czynna pobierana przez wzbudnik ze źródła a tracona w uzwojeniu wzbudnika i wydzielana we wsadzie ,
 Q_w - moc bierna układu grzejnego związana ze strumieniem magnetycznym przenikającym szczelinę między wsadem a wzbudnikiem i strumieniem magnetycznym przenikającym wsad,
 I_w - prąd płynący przez wzbudnik.

Impedancja zastępcza układu grzejnego

$$Z_w = \sqrt{R_w^2 + X_w^2} = \frac{U_w}{I_w} \quad (9.13)$$

Moc pozorna S_w pobierana przez wzbudnik ze źródła zasilającego oraz współczynnik mocy $\cos\varphi_w$ układu grzejnego:

$$S_w = U_w I_w = Z_w I_w^2 \quad (9.14)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_w}{S_w} = \frac{I_w^2 R_w}{I_w^2 Z_w} = \frac{R_w}{Z_w} \quad (9.15)$$

Do zasilania nagrzewarek indukcyjnych oprócz sieci (50 Hz) i falowników z zaworami półprzewodnikowymi (do 4000 Hz i więcej) są stosowane maszynowe przetwornice częstotliwości (do 10 kHz) oraz magnetyczne mnożniki częstotliwości (150 - 300 Hz).

2. Wykonanie ćwiczenia

2.1. Układ elektryczny nagrzewarki indukcyjnej

W ćwiczeniu będzie badana nagrzewarka indukcyjna małej mocy współpracująca z zasilaczem falownikowym. Schemat układu elektrycznego nagrzewarki indukcyjnej wraz z przyrządami pomiarowymi przedstawiono na rys.9.8.

Do obserwacji przebiegów czasowych prądów roboczych użyć oscyloskopu przyłączanego do odpowiednich boczników rezystancyjnych $B_{p1} \div B_{p3}$.

2.2. Działanie układu elektrycznego nagrzewarki

Obwód prądowy nagrzewarki jest zasilany napięciem 220 V przez autotransformator T, łącznik ręczny Q_b z widoczną przerwą oraz stycznik Q3. Sterownik falownika i obwód sterowania nagrzewarki są zasilane nieregulowanym napięciem 220 V.

Rozruch układu jest dwustopniowy. W pierwszym stopniu następuje przygotowanie źródła zasilania falownika do pracy, w drugim - uruchomienie falownika i rozpoczęcie pracy wzbudnika.

Przygotowanie źródła do zasilania falownika

Łącznikiem ręcznym Q_b przyłączyć zasilacz falownika do autotransformatora.

Po naciśnięciu przycisku sterowniczego S1, następuje włączenie stycznika Q3, który zestykiem (7,8) zapewnia sobie podtrzymanie. Zestykami (1,2 i 3,4) przyłącza prostownik P_r do autotransformatora. Zestykiem (5,6) uruchamia układ zwłoki czasowej zwieracza rezystora R_1 w układzie filtra LC.

W torze prądowym nagrzewarki, kondensator C filtra ładuje się napięciem uzyskiwanym z prostownika P_r poprzez dławik DŁ i rezystor R_1 (rys.9.3). Kondensator C_3 włączony równoległe do cewki przełącznika K1 ładuje się przez diodę D i rezystor R. Napięcie na kondensatorze C_3 narasta.

Po uzyskaniu odpowiedniej wartości, zadziała przełącznik K1, który zestykiem (1,2) zewrze rezystor R_1 w filtrze LC oraz zestykiem (3,4) w obwodzie przełącznika K2 umożliwi uruchomienie falownika (zestyk 1,2 w generatorze).

Uruchomienie falownika

Po naciśnięciu przycisku sterowniczego S3 następuje załączenie przełącznika K2, który zestykiem (3,4) zapewnia sobie podtrzymanie oraz zestykiem (1,2) w generatorze, spowoduje podanie impulsów prądowych na bramki tyrystorów w falowniku. Rozpoczyna się praca falownika a tym samym i nagrzewarki, której cewka wzbudnika jest włączona w obwód rezonansowy falownika.

Zatrzymanie pracy nagrzewarki.

Zatrzymanie pracy nagrzewarki dokonuje się w celu:

- wyłączenia nagrzewarki,
- wymiany wsadu we wzbudniku.

W pierwszym przypadku, przyciskiem sterowniczym S2 wyłączamy stycznik Q3, który odłącza prostownik od sieci, wyłącza przełącznik zwłoki czasowej K1 a ten zestykiem (3,4) wyłącza przełącznik grzania K2.

W drugim przypadku, zasilacz falownika pozostaje pod napięciem, natomiast przyciskiem S4 wyłączamy przełącznik grzania K2 a tym samym zdejmujemy impulsy prądowe z tyrystorów falownika.

Po wymianie wsadu, przyciskiem S3 ponownie uruchamiamy impulsowanie tyrystorów a tym samym i pracę wzбудnika nagrzewarki.

2.3. Parametry znamionowe nagrzewarki

Wartości znamionowe poszczególnych wielkości w różnych punktach układu elektrycznego podane na tabliczce danych znamionowych zestawień w tabeli 9.1.

Tabela 9.1.

U	I	P	U_0	I_0	U_w	I_w	P_w	$\cos \varphi$	Z_w	R_w	X_w	f_i
V	A	W	V	A	V	A	W	-	Ω	Ω	Ω	Hz

Wielkości zamieszczone w tabeli 9.1 oznaczają:

- U; I; P - wartość napięcia, natężenia prądu oraz moc czynna zasilacza,
- U_0 ; I_0 - wartość napięcia i natężenia prądu przed falownikiem,
- U_w ; I_w P_w - wartość napięcia, natężenia prądu i moc czynna wzбудnika,
- $\cos \varphi$ - współczynnik mocy wzбудnika,
- Z_w ; R_w ; X_w - impedancja, rezystancja i reaktancja układu grzejnego,
- f_i - znamionowa częstotliwość impulsowania.

2.4. Pomiary

W ćwiczeniu wykonać następujące badania:

- $P_w = f(U)$ przy $f_i = \text{const.}$ i C_1 ; $C_2 = \text{const.}$
- $P_w = f(f_i)$ przy $U = \text{const.}$ i C_1 ; $C_2 = \text{const.}$
- $\Theta = f(t)$ przy $U = \text{const.}$; $f = \text{const.}$ i C_1 ; $C_2 = \text{const.}$

2.4.1. Wpływ napięcia zasilającego na moc układu grzejnego

Przyłączyć do falownika kondensatory rezonansowe C_1 i C_2 oraz nastawić w sterowniku częstotliwość impulsowania f_i (wartości C_1 i C_2 oraz f_i - podaje prowadzący ćwiczenia). Włączyć napięcie na autotransformator i obwody sterownicze. Przy zerowej nastawie napięcia wyjściowego z autotransformatora, zamknąć wyłącznik Q_b . Przyciskiem S2 przygotować do pracy zasilacz falownika. Autotransformatorem T nastawić napięcie $U = U_{\min} \approx 25$ V zasilające prostownik P_r . Przyciskiem S3 uruchomić impulsowanie tyrystorów. Zmieniając napięcie zasilające prostownik od $U_{\min} \approx 25$ V do U_n (tabela 9.1) wykonać pomiary w 6 punktach. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawień w tabeli 9.2.

Tabela 9.2.

$f_i = \dots\dots$ Hz ; $C_1 = \dots\dots$ μ F ; $C_2 = \dots\dots$ μ F													
Lp.	U	I	P	U_0	I_0	U_w	I_w	P_w	$\cos \varphi_w$	η	Z_w	R_w	X_w
	V	A	W	V	A	V	A	W	-	%	Ω	Ω	Ω

W obliczeniach korzystać z zależności:

Na podstawie otrzymanych wyników z pomiarów i obliczeń należy na jednym rysunku wykreślić następujące charakterystyki:

$$P_w = f(\vartheta) ; \cos\varphi_w = f(\vartheta) ; R_w = f(\vartheta) ; X_w = f(\vartheta) ,$$

oraz na oddzielnym rysunku wykreślić charakterystykę narastania temperatury wody ϑ w funkcji czasu t grzania.

Przeprowadzić dyskusję otrzymanych wyników badań.

2.4.4. Obserwacja przebiegów

Należy przeprowadzić obserwację następujących przebiegów:

- natężenia prądu przed prostownikiem,
- natężenia prądu przed falownikiem,
- natężenia prądu wzбудnika,
- impulsów prądowych włączających tyrystory.

Obserwację przebiegów czasowych w/w prądów przeprowadzić przy obniżonym napięciu zasilającym prostownik (wartość podaje prowadzący ćwiczenia) i pracującym wzбудniku z dowolnie wybraną częstotliwością impulsowania tyrystorów falownika.

Obserwację impulsów prądowych włączających tyrystory, przeprowadzić przy wyłączonym napięciu z obwodu prądowego falownika (wyłącznik Q_b - otwarty), dla różnych częstotliwości impulsowania nastawianych w sterowniku.

2.4.5. Zestawienie przyrządów

Przyrządy pomiarowe, urządzenia regulacyjne i przyrządy do obserwacji przebiegów wykorzystywane w badaniach zestawzić zgodnie z wymaganiami podanymi w części ogólnej skryptu.

Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Schemat blokowy nagrzewarki indukcyjnej z zasilaczem falownikowym.
2. Schemat elektryczny i działanie falownika szeregowego z jednym kondensatorem rezonansowym.
3. Schemat elektryczny i działanie falownika szeregowego z dzieloną pojemnością rezonansową.
4. Pulsacja drgań własnych obwodu rezonansowego i współczynnik tłumienia.
5. Układ grzejny nagrzewarki indukcyjnej.
6. Elektryczny schemat zastępczy układu grzejnego oraz jego elementy składowe.
7. Głębokość wnikania prądu: zależność, jednostki, interpretacja graficzna tej głębokości.
8. Moc grzejna objętościowa i moc grzejna powierzchniowa: zależności i jednostki.
9. Częstotliwości występujące w układzie elektrycznym nagrzewarki.
10. Wpływ napięcia zasilającego na moc czynną układu grzejnego przy stałej częstotliwości impulsowania.
11. Wpływ częstotliwości impulsowania na moc czynną układu grzejnego przy stałym napięciu zasilającym układ nagrzewarki.

