



PODZESPOŁY I UKŁADY SCALONE MOCY

Ćwiczenie A11

Charakterystyki stanu przewodzenia diod dużej mocy

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2019

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Parametry stanu przewodzenia i ich zastosowanie	7
2.1. Dwuodcinkowa aproksymacja charakterystyki stanu przewodzenia.....	7
2.1.a. Definicja.....	7
2.1.b. Zastosowanie parametrów statycznych do wyznaczania mocy strat.....	8
2.1.c. Wyznaczanie parametrów statycznych w arkuszu kalkulacyjnym.....	9
2.2. Parametry prostowników istotne dla doboru przyrządów półprzewodnikowych	11
2.2.a. Wprowadzenie	11
2.2.b. Układ gwiazdowy jednopulsowy	11
2.2.c. Układ z transformatorem separującym	13
2.2.d. Parametry przekształtników związane z pracą zaworu.....	13
2.3. Prostownik gwiazdowy trójpulsowy.....	15
2.3.a. Najprostszy układ trójpulsowy	15
2.3.b. Układ trójpulsowy z transformatorem	17
C Doświadczenie.....	19
3. Pomiary	19
3.1. Układ pomiarowy	19
3.2. Wykonanie pomiarów.....	21
D Wyniki.....	25
4. Opracowanie i analiza wyników	25
4.1. Wyznaczenie wartości parametrów	25
4.2. Wykorzystanie aproksymacji dwuodcinkowej.....	27
4.3. Parametry struktury półprzewodnikowej.....	29
E Informacje	31
5. Literatura	31

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z metodą pomiaru i praktycznym znaczeniem podstawowych parametrów opisujących stan przewodzenia diod (jak również tyrystorów) energetycznych dużej mocy – o prądach znamionowych rzędu setek amperów i napięciach znamionowych rzędu kilowoltów. Wyznaczone dla dwóch diod parametry zostaną wykorzystane do doboru przyrządu półprzewodnikowego do hipotetycznego prostownika.

Diody mocy oraz ich parametry opisane zostały w instrukcji [1]. Niniejsze ćwiczenie dotyczy diod do zastosowań częstotliwości sieciowej.

2. Parametry stanu przewodzenia i ich zastosowanie

2.1. Dwuodcinkowa aproksymacja charakterystyki stanu przewodzenia

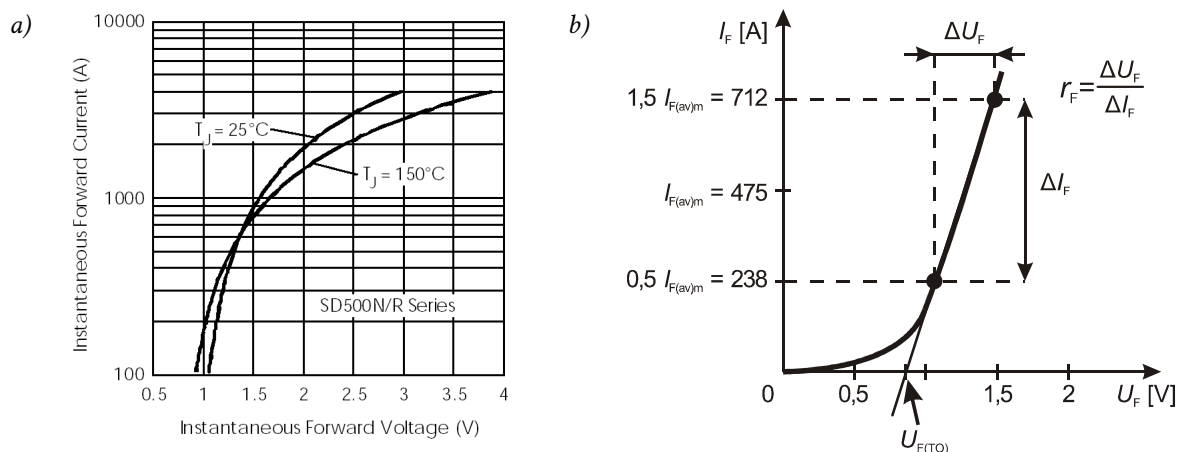
2.1.a. Definicja

Przykładową charakterystykę statyczną stanu przewodzenia $I_F = f(U_F)$ przedstawiono na rys. 1. Charakterystyka ta ma charakter nieliniowy. Dlatego, aby umożliwić prowadzenie obliczeń w prosty sposób, aproksymuje się ją dwuodcinkową linią łamaną, opisywaną za pomocą dwóch parametrów: napięcia progowego i rezystancji przyrostowej.

Aproksymacja dwuodcinkowa posiada ściśle określoną definicję (zob. rys. 1b, na którym przedstawiono przykład dla konkretnej diody):

- 1) prowadzi się prostą przez punkty odpowiadające 0,5 prądu znamionowego $I_{F(av)m}$ i 1,5 prądu znamionowego $I_{F(av)m}$;
- 2) punkt przecięcia prostej z osią U_F określa **napięcie progowe** $U_{F(TO)}$ (indeks „TO” od ang. *threshold*);
- 3) odwrotność współczynnika kierunkowego prostej jest równa **rezystancji przyrostowej w stanie przewodzenia** r_F ,

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}. \quad (1)$$



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka statyczna stanu przewodzenia diody serii SD500N/R firmy International Rectifier o prądzie znamionowym $I_{F(av)m} = 475$ A: a) w skali liniowo-logarytmicznej; b) we współrzędnych liniowych wraz z definicją parametrów aproksymacji dwuodcinkowej ($T_J = 150^\circ\text{C}$)

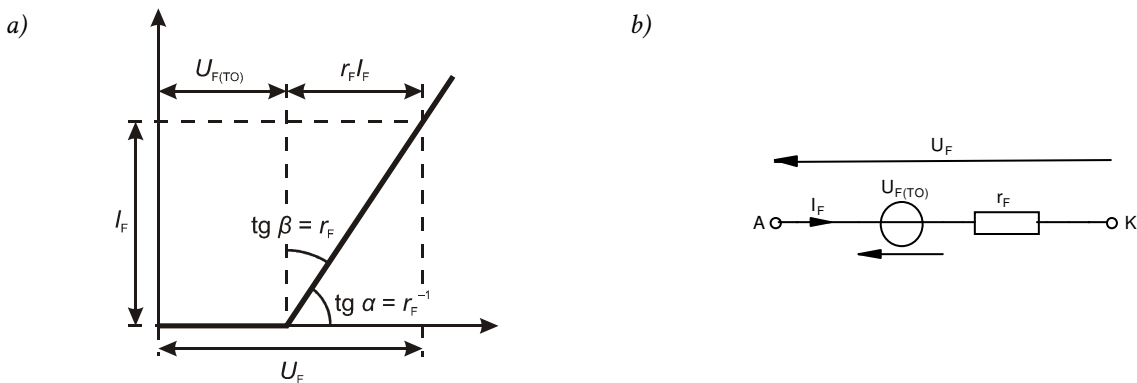
Rezystancji przyrostowej nie należy mylić z rezystancją statyczną diody w stanie przewodzenia R_F , która spełnia zależność

$$R_F = \frac{U_F}{I_F}. \quad (2)$$

Znajomość wartości R_F pozwala wprowadzić natychmiast obliczyć spadek napięcia na przyrządzie dla danego prądu, jednak rezystancja statyczna w każdym punkcie charakterystyki jest inna. (Łatwo to stwierdzić zauważając, że jest ona równa odwrotności współczynnika kierunkowego prostej łączącej dany punkt (U_F , I_F) z początkiem układu współrzędnych.) Z tego powodu parametr ten byłby kłopotliwy w stosowaniu. Parametry $U_{F(TO)}$ i r_F obowiązują natomiast dla całego zakresu przewodzenia, co pozwala wykorzystać je w obliczeniach, w których prąd diody jest zmienny. Do tego celu napięcie na przewodzącej diodzie przedstawia się jako (zob. rys. 2a)

$$U_F = U_{F(TO)} + r_F I_F. \quad (3)$$

Zwróćmy uwagę, że równanie to opisuje schemat zastępczy przewodzącej diody przedstawiony na rys. 2b.



Rys. 2. Dioda w stanie przewodzenia: a) dwuodcinkowa aproksymacja charakterystyki statycznej; b) schemat zastępczy odpowiadający aproksymacji

2.1.b. Zastosowanie parametrów statycznych do wyznaczania mocy strat

Dwuodcinkowej aproksymacji charakterystyki statycznej stanu przewodzenia używa się do szacowania mocy strat w przyrządzie w układach, w których straty podczas stanów dynamicznych nie odgrywają znacznej roli, a prawie cała energia wydziela się, gdy dioda znajduje się w stanie ustalonym przewodzenia.

Chwilowa moc strat w diodzie wyraża się wzorem

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (4)$$

przypomnijmy jednak, że rozważamy tu układy, w których dynamikę zjawisk można zaniedbać – punkt pracy diody przesuwa się zawsze po charakterystyce statycznej. Dlatego wartości chwilowe można zamienić na wartości stałe, pochodzące z charakterystyki statycznej:

$$p(t) = U_F I_F. \quad (5)$$

Użyliśmy indeksów „F”, gdyż zakładamy, że prąd wsteczny jest zerowy, więc moc strat przy polaryzacji wstecznej można pominąć. Podstawiając (3) otrzymujemy:

$$p(t) = U_{F(TO)} I_F + r_F I_F^2. \quad (6)$$

Należy zwrócić uwagę, że zależność (3) opisuje poprawnie wyłącznie stan przewodzenia; natomiast dla napięć mniejszych od $U_{F(TO)}$ napięcie na diodzie jest wymuszone przez obwód zewnętrzny i nie zależy od prądu. Mimo to równość (6) jest prawdziwa również dla stanu zaporowego. Wynika to z założenia, że w stanie zaporowym prąd przyrządu jest zerowy. Wówczas (6) dla tego stanu pracy daje wynik $p = 0$, co jest zgodne z prawdą (przy przyjętych założeniach upraszczających). Tak więc zależność (6) możemy wykorzystać do opisanie mocy strat w diodzie w każdej chwili jej pracy.

Obliczmy teraz średnią moc strat w przyrządzie za okres pracy¹ (zwykle okres napięcia sieci):

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (U_{F(TO)} I_F + r_F I_F^2) dt = U_{F(TO)} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_F dt + r_F \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_F^2 dt. \quad (7)$$

Przedstawmy drugą całkę w nieco innej postaci:

$$P_{av} = U_{F(TO)} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_F dt + r_F \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_F^2 dt} \right)^2. \quad (8)$$

Jak nietrudno teraz zauważyć, z definicji pierwsza całka wyraża wartość średnią prądu $I_{F(av)}$, zaś druga – kwadrat jego wartości skutecznej² $I_{F(rms)}$. Można więc ostatecznie napisać:

$$P_{av} = U_{F(TO)} I_{F(av)} + r_F I_{F(rms)}^2. \quad (9)$$

Otrzymaliśmy w ten sposób zależność pozwalającą wyznaczyć moc strat w diodzie na podstawie parametrów charakterystyki statycznej $U_{F(TO)}$ i r_F . Należy pamiętać, że wynik ten uwzględnia wyłącznie wydzielanie energii w stanie przewodzenia, dlatego jest stosowany do układów, w których dioda pracuje z niską częstotliwością i moc strat związana z jej przełączaniem ma mały udział w mocy średniej (czynnej). Jak wskazano w [1], przykładem takich układów są np. prostowniki współpracujące z siecią energetyczną 50 Hz. Układy te zostaną przybliżone w podrozdziałach 2.2–2.3.

2.1.c. Wyznaczanie parametrów statycznych w arkuszu kalkulacyjnym

Załóżmy, że w arkuszu kalkulacyjnym posiadamy dane liczbowe odpowiadające charakterystyce statycznej stanu przewodzenia w postaci dwóch kolumn, napięcia i prądu. Na podstawie tych danych chcemy obliczyć napięcie progowe i rezystancję przyrostową diody.

Jest to zadanie łatwe, jeżeli przyjmiemy założenie upraszczające, że między punktami $I_F = 0,5 I_{F(av)m}$ i $I_F = 1,5 I_{F(av)m}$ charakterystyka stanowi linię prostą. W takim przypadku sieczną wykresu można aproksymować prostą regresji liniowej wyznaczoną dla wszystkich punktów z zakresu I_F od $0,5 I_{F(av)m}$ do $1,5 I_{F(av)m}$.

Parametry prostej regresji można obliczyć za pomocą funkcji arkusza kalkulacyjnego *nachylenie* (w wersji angielskiej: *Slope*) oraz *odcięta* (ang. *Intercept*). Wyniki działania tych funkcji – odpowiednio współczynniki m i b – opisują prostą o równaniu $y = mx + b$ obliczoną metodą regresji liniowej, a więc przechodzącą pomiędzy punktami z podanego zbioru. Nazwy obu funkcji są te same w pakietach LibreOffice i Microsoft Office, a ich opis załączono poniżej.

¹ Średnia za okres z mocy chwilowej jest z definicji tożsama z mocą czynną, oznaczaną zwykle przez P . W rozpatrywanym przypadku używa się jednak tradycyjnie pojęcia mocy średniej i oznaczenia P_{av} , aby odróżnić moc czynną obliczaną za okres pracy od stałej mocy w ustalonym stanie przewodzenia P .

² Podstawowym oznaczeniem prądu skutecznego jest I_F bez dodatkowego indeksu. Ponownie jednak, aby odróżnić tę wartość od prądu stałego czy też quasi-stałego, występującego na charakterystyce statycznej stanu przewodzenia, stosuje się tradycyjnie oznaczenie $I_{F(rms)}$.

Funkcja **NACHYLENIE(znane_y;znane_x)** daje w wyniku nachylenie prostej regresji liniowej poprowadzonej przez podane punkty. Argumentami mogą być tablice lub adresy komórek (zakresy adresów), które zawierają liczby.

Funkcja **ODCIĘTA(znane_y;znane_x)** daje w wyniku wartość punktu (współrzedną y) przecięcia się prostej regresji liniowej, poprowadzonej przez podane punkty, z osią y . Innymi słowy, jest to wartość zmiennej zależnej (y) dla zerowej wartości zmiennej niezależnej (x). Argumentami mogą być tablice lub adresy komórek (zakresy adresów), które zawierają liczby.

Jeżeli wszystko zostanie wykonane poprawnie, obliczona prosta odpowiadać będzie zależności

$$I_F = mU_F + b, \quad (10)$$

gdzie b jest pewną wartością prądu, dla której nastąpiłoby przecięcie się prostej regresji z osią I_F .

Mając odciętą b i nachylenie m , możemy przystąpić do ostatniej czynności, czyli obliczenia szukanych parametrów $U_{F(TO)}$ i r_F . Pomocne może być wykonanie schematycznego rysunku otrzymanej prostej w układzie współrzędnych U_F-I_F i porównanie go z rys. 2a.

2.2. Parametry prostowników istotne dla doboru przyrządów półprzewodnikowych

2.2.a. Wprowadzenie

Źródłem energii dla układów elektronicznych jest najczęściej jedno- lub trójfazowa sieć energetyczna napięcia przemiennego o napięciu fazowym 230 V i częstotliwości 50 Hz (w Ameryce i Japonii: 120 V, 60 Hz). Ponieważ jednak bardzo często układy te muszą być zasilane napięciem stałym lub przemiennym o wyższej częstotliwości, niezbędne jest stosowanie odpowiednich przekształtników energii elektrycznej. Przekształtniki zamieniające energię prądu przemiennego na energię prądu stałego (AC/DC) nazywa się prostownikami.

Należy zauważyć, że z ekonomicznego punktu widzenia przekształtniki powinny cechować wysoka sprawność energetyczna, tj. stosunek czynnej mocy wyjściowej do czynnej mocy wejściowej

$$\eta = \frac{P_{wy}}{P_{we}}. \quad (11)$$

powinien być bliski jedności.

Moc wejściową przekształtnika (pobieraną z sieci) można przedstawić jako sumę mocy strat w kluczach półprzewodnikowych należących do samego przekształtnika ΔP i mocy wyjściowej (dostarczanej do odbiornika). Wówczas

$$\eta = \frac{P_{wy}}{P_{wy} + \Delta P}. \quad (12)$$

Dążenie do wysokiej sprawności prostownika diodowego można więc zrealizować wyłącznie przez zapewnienie niskiej mocy strat w diodach ($\Delta P \rightarrow 0$). Stąd płynie wymaganie niskiego spadku napięcia w stanie przewodzenia U_F oraz niskiej rezystancji przyrostowej, jako że wartość prądu jest zawsze narzucona przez obwód zewnętrzny – por. wzór (6).

Układy prostowników można podzielić na:

- jednokierunkowe (gwiazdowe) – gdy gałęzie z zaworami półprzewodnikowymi – diodami lub tyrystorami – zbiegają się w jednym punkcie (najprostszym przykładem jest jedna gałąź z jednym zaworem);
- dwukierunkowe (mostkowe) – gdy gałęzie z zaworami półprzewodnikowymi tworzą mniej lub bardziej skomplikowane połączenia mostkowe (najprostszym przykładem jest popularny mostek Graetza z czterema zaworami).

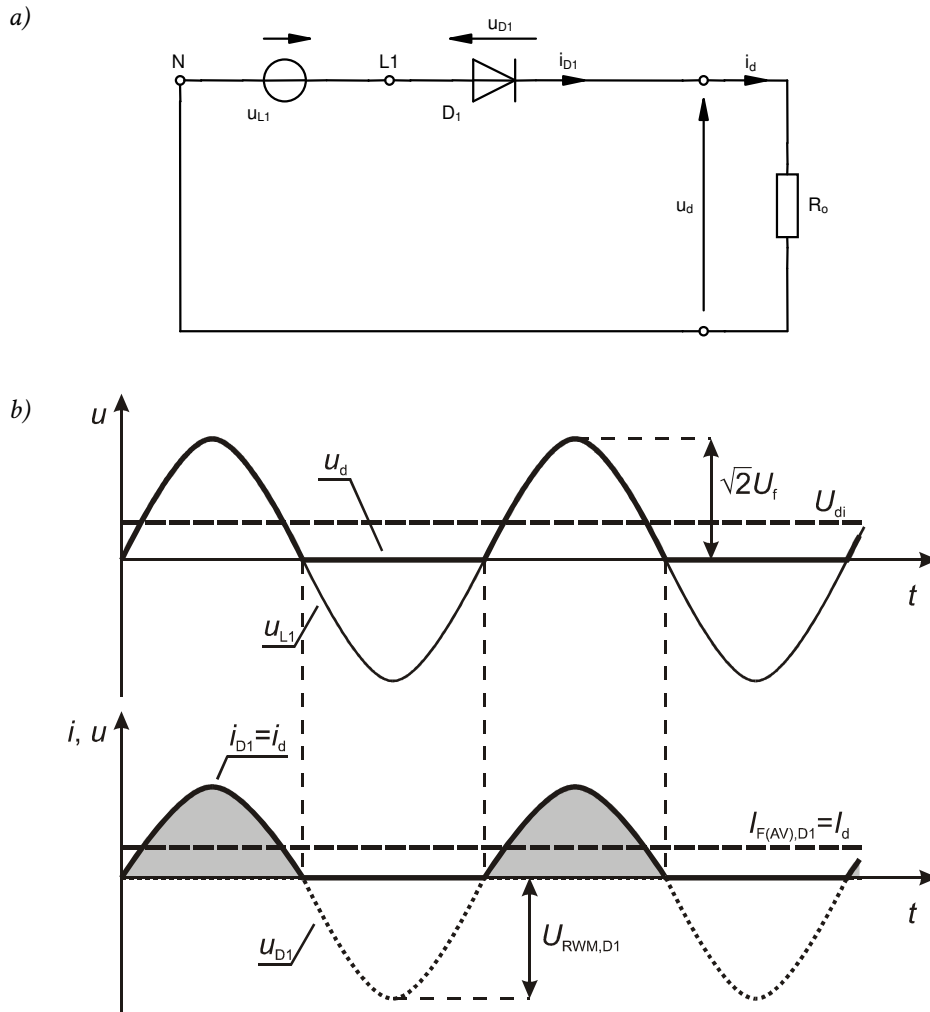
W niniejszym ćwiczeniu ograniczymy się do prostszych w analizie układów gwiazdowych.

2.2.b. Układ gwiazdowy jednopulsowy

Zacznijmy od najprostszego układu gwiazdowego, przedstawionego na rys. 3a. Przyjmijmy dla ustalenia uwagi, że jest on zasilany z typowego gniazda sieciowego, a więc na jego wejściu występuje napięcie fazowe o wartości skutecznej $U_f = 230$ V i częstotliwości $\omega = 2\pi f = 100\pi$ Hz. Przypomnijmy, że pierwszy przewód fazowy sieci (potocznie „fazę”) oznacza się przez L1, zaś przewód neutralny (potocznie „zero”) – przez N.

W skład rozważanego układu wchodzi: źródło napięciowe reprezentujące sieć energetyczną, zawór półprzewodnikowy (dioda) oraz odbiornik (dla uproszczenia – rezystancja). Równanie źródła, czyli napięcia sieciowego, ma jak wiadomo postać

$$u_{L1} = \sqrt{2}U_f \sin \omega t. \quad (13)$$



Rys. 3. Prostownik jednopulsowy: a) schemat; b) przebiegi w układzie

Ponieważ amplituda napięcia zasilającego jest o 2–3 rzędy wielkości większa od napięcia progowego diody, więc w niezauważalnie krótkim czasie po przejściu sinusoidy napięcia przez zero następuje załączenie przyrządu. Jeżeli zaniedbać rezystancję klucza diodowego w stanie przewodzenia, można przyjąć, że w tej fazie

$$\begin{aligned}
 u_{D1} &= 0 \\
 u_d &= u_{L1} - u_{D1} = u_{L1} \\
 i_d &= i_{D1} = \frac{u_d}{R_o}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Kiedy natomiast napięcie źródła przejdzie na wartości ujemne, dioda wyłączy się; wówczas przez odbiornik nie będzie płynął prąd, a całe napięcie źródła odłoży się na diodzie:

$$\begin{aligned}
 i_d &= i_{D1} = 0 \\
 u_d &= i_d R_o = 0 \\
 u_{D1} &= u_{L1} - u_d = u_{L1}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Wyniki powyższej analizy posłużyły do wykreślenia przebiegów z rys. 3b. Jak widać, napięcie wyjściowe u_d (indeks „d” pochodzi od ang. *direct* – stałe, gdyż dla idealnego prostownika powinno ono być idealnie stałe) pokrywa się z napięciem wejściowym u_{L1} , kiedy dioda przewodzi; natomiast

kiedy dioda nie przewodzi, napięcie wyjściowe jest równe zero. Prąd wyjściowy i_d jest oczywiście proporcjonalny do napięcia u_d i równy prądowi zaworu i_{D1} .

Ponieważ w jednym okresie sieci zasilającej na wyjściu pojawia się jeden sinusoidalny impuls napięcia, rozważany układ nazywa się *jednopulsowym*.

2.2.c. Układ z transformatorem separującym

Układy prostowników często są zasilane nie bezpośrednio z sieci, ale przez transformator. Są ku temu dwa podstawowe powody: 1° transformator zapewnia separację galwaniczną od sieci (względny bezpieczeństwa) oraz 2° pozwala dowolnie dobrać poziom napięcia wyjściowego (względny praktyczne). Układ z transformatorem przedstawiono na rys. 4a. Jeżeli przyjąć, że transformator jest idealny o przekładni zwojowej $n = 1:1$, przy czym

$$n = \frac{N_p}{N_s}, \quad (16)$$

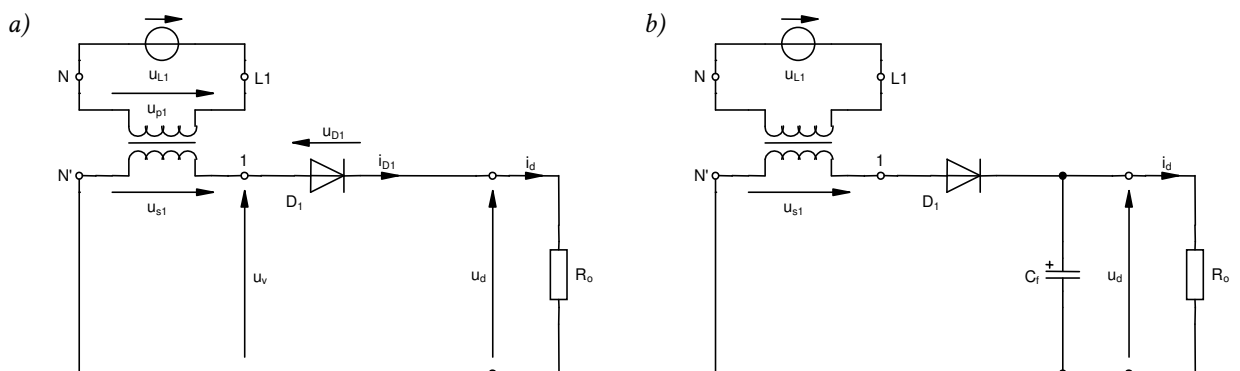
gdzie N_p – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, N_s – liczba zwojów uzwojenia wtórnego, to napięcie na uzwojeniu wtórnym będzie równe

$$u_{s1} = u_{p1} \cdot \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^{-1} = u_{p1} \cdot n^{-1} = u_{L1} \cdot \frac{1}{1} = u_{L1}, \quad (17)$$

gdzie u_{p1} – napięcie na uzwojeniu pierwotnym (indeks od ang. *primary*), u_{s1} – napięcie na uzwojeniu wtórnym (indeks od ang. *secondary*).

Wymuszenie w gałęzi z diodą będzie więc identyczne jak w układzie bez transformatora. Przebiegi napięć i prądów pozostaną dokładnie takie, jak na rys. 3b, tylko oznaczenie „ u_{L1} ” należy zmienić na „ u_{s1} ”. (Zmieni się natomiast przebieg prądu fazy L1, nie będziemy się tu jednak zajmować zjawiskami po stronie pierwotnej transformatora.)

Oczywiście w tym dość prymitywnym układzie przebiegom wyjściowym daleko do *direct*. Dlatego z reguły uzupełnia się go o kondensator o dużej pojemności jak na rys. 4b. Jak wiadomo, kondensator przeciwstawia się szybkim zmianom napięcia, spowoduje więc jego wygładzenie. Dla idealnego filtra ($C_f = \infty$) i braku obciążenia ($R_o = \infty$), napięcie u_d byłoby idealnie stałe i równe średniemu idealnemu, oznaczanemu przez U_{di} (zob. rys. 3b). Prąd wyprostowany I_d płynący przez odbiornik będzie proporcjonalny do U_{di} , zgodnie z prawem Ohma (w przybliżeniu, gdyż napięcie na wyjściu obciążonego prostownika jest zawsze nieco niższe niż U_{di}).



Rys. 4. Prostownik jednopulsowy z transformatorem separującym: a) układ bez filtra; b) układ z filtrem

2.2.d. Parametry przekształtników związane z pracą zaworu

Stałe (wyprostowane, średnie) napięcie wyjściowe U_{di} oraz stały (wyprostowany) prąd wyjściowy I_d są dla nas interesujące z punktu widzenia pracy układu jako całości. Naszym głównym

obiektem zainteresowania w tym ćwiczeniu jest jednak dioda i jej warunki pracy. Aby poprawnie dobrać diodę do układu, należy przede wszystkim wziąć pod uwagę jej dwa podstawowe parametry znamionowe omówione w podrozdziale 2.1: maksymalny średni prąd przewodzenia $I_{F(av)m}$ i maksymalne powtarzalne napięcie wsteczne U_{RRM} . Aby stwierdzić, czy wartości te nie zostaną przekroczone, należy w danym układzie wyznaczyć średni prąd zaworu $I_{F(av)}$ i maksymalne powtarzalne napięcie robocze U_{RWM} , które to wielkości zostały zaznaczone na rys. 3b.

Wartości parametrów U_{di} , $I_{F(av)}$ i U_{RWM} dla różnych typowych prostowników można wyznaczyć analitycznie. W praktyce korzysta się jednak ze współczynników proporcjonalności podawanych w tablicach [3] (które zawierają również takie dane jak moc pobierana z sieci, prąd skuteczny zaworu, prądy uzwojeń transformatorów i in.)

Ponieważ skorzystanie z tablic będzie konieczne w ćwiczeniu, poniżej podano najważniejsze unormowane oznaczenia:

- p – liczba pulsów napięcia wyjściowego u_d w jednym okresie sieci zasilającej;
- U_v lub U_{v0} – napięcie skuteczne międzyprzewodowe od strony zaworu (indeks „v” od ang. *valve* – zawór; zob. rys. 4a); tablice zawsze zawierają rysunek objaśniający, między którymi punktami po stronie wtórnej mierzy się to napięcie;
- albo U_s , U_2 – napięcie skuteczne na uzwojeniu wtórnym transformatora; podobnie jak poprzednio, tablice zawierają rysunek definicyjny;
- U_{di} lub U_{di0} – stałe napięcie wyjściowe w układzie idealnym (czyli średnia wartość u_d w układzie idealnym);
- U_{RWM} – szczytowe powtarzalne napięcie robocze zaworu, czyli maksymalne napięcie wsteczne występujące na zaworze podczas pracy układu;
- I_d – stały prąd wyjściowy (czyli średnia wartość i_d);
- $I_{T(av)}$ – średni prąd zaworu (indeks „T” oznacza stan przewodzenia tyrystora; używa się go, ponieważ prostownik tyrystorowy jest w pewnym sensie uogólnieniem prostownika diodowego);
- $I_{T(rms)}$ – skuteczny prąd zaworu;
- I_{TM} – maksymalna chwilowa wartość prądu zaworu.

2.3. Prostownik gwiazdowy trójpulsowy

2.3.a. Najprostszy układ trójpulsowy

Lepsze właściwości od prostownika jednopulsowego mają układy trójpulsowe. W układzie takim występują trzy gałęzie z zaworami półprzewodnikowymi. Na rys. 5a pokazano schemat układu trójpulsowego bez transformatora, w którym każda gałąź jest zasilana napięciem innej fazy sieci. Przypomnijmy, że w sieci trójfazowej definicja napięć fazowych jest następująca:

$$\begin{aligned} u_{L1} &= \sqrt{2}U_f \sin \omega t \\ u_{L2} &= \sqrt{2}U_f \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_{L3} &= \sqrt{2}U_f \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (18)$$

Oznacza to, że sinusoida każdego napięcia fazowego jest opóźniona o 120° względem poprzedniej fazy. W naszych analizach dotyczących sieci trójfazowych będziemy zakładać, że są one idealnie symetryczne, tzn. przebiegi dla każdej fazy są takie same, jedynie przesunięte względem siebie.

Przyjmijmy jak poprzednio, że napięcie progowe diody jest pomijalnie małe i przeanalizujmy działanie układu w oparciu o przebiegi z rys. 5b. Zaczniemy od chwili t_1 , w której obserwujemy pierwsze maksimum napięcia wyjściowego u_d . Jak widać, przebieg u_d pokrywa się w tym miejscu z przebiegiem napięcia fazowego u_{L1} . Świadczy to o tym, że dioda D_1 przewodzi, zwierając punkt L1 z wyjściem prostownika (punktem zbiegu katod). Napięcia pozostałych faz są mniejsze od napięcia u_{L1} .

Dalej za pierwszym maksimum napięcie u_{L1} zaczyna opadać, a wraz z nim opada napięcie u_d . Jednocześnie opóźnione o 120° napięcie fazy L2 narasta. W ten sposób osiągamy chwilę t_2 , w której przebiegi napięć u_{L1} i u_{L2} przecinają się. Dalej $u_{L2} > u_{L1}$, a ponieważ do tej pory $u_d = u_{L1}$, to napięcie na diodzie D_2 staje się dodatnie:

$$u_{D2} = u_{L2} - u_d = u_{L2} - u_{L1} > 0. \quad (19)$$

Dioda D_2 załącza się więc (napięcie progowe zaniedbaliśmy) i zaczyna zwierzać punkt L2 z wyjściem prostownika. Na anodzie diody D_1 mamy więc potencjał u_{L1} (względem punktu N), zaś na katodzie – $u_{L2} > u_{L1}$. Stąd

$$u_{D1} = u_{L1} - u_{L2} < 0, \quad (20)$$

dlatego dioda D_1 przechodzi w chwili t_2 w stan zaworowy.

Od tego momentu prąd przewodzi dioda D_2 , a jej prąd musi być równy prądowi wyjściowemu i_d , gdyż pozostałe diody są wyłączone (zarówno u_{L1} , jak i u_{L3} są mniejsze od u_{L2}). Napięcie wyjściowe u_d jest równe napięciu fazy L2, gdyż – jak już stwierdziliśmy – załączona dioda D_2 zwierza punkt L2 z wyjściem prostownika.

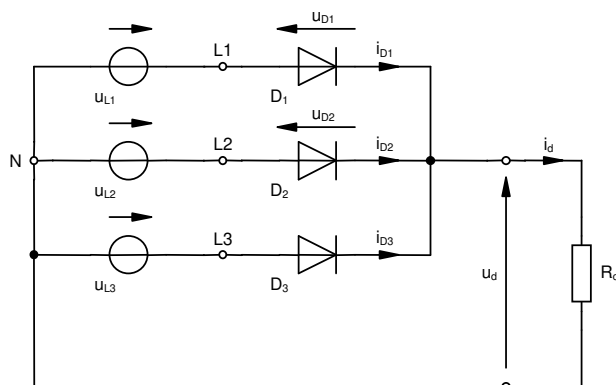
Kiedy przebieg napięcia u_{L2} przetnie się z przebiegiem u_{L3} (chwila t_3), dioda D_2 wyłączy się, a przewodzenie prądu wyjściowego i przenoszenie napięcia fazowego (fazy L3) na wyjście zacznie być realizowane przez diodę D_3 . Następnie w chwili t_4 zajdzie wymiana (komutacja) prądu między diodami D_3 i D_1 i cały cykl zacznie się od początku.

Podsumowując:

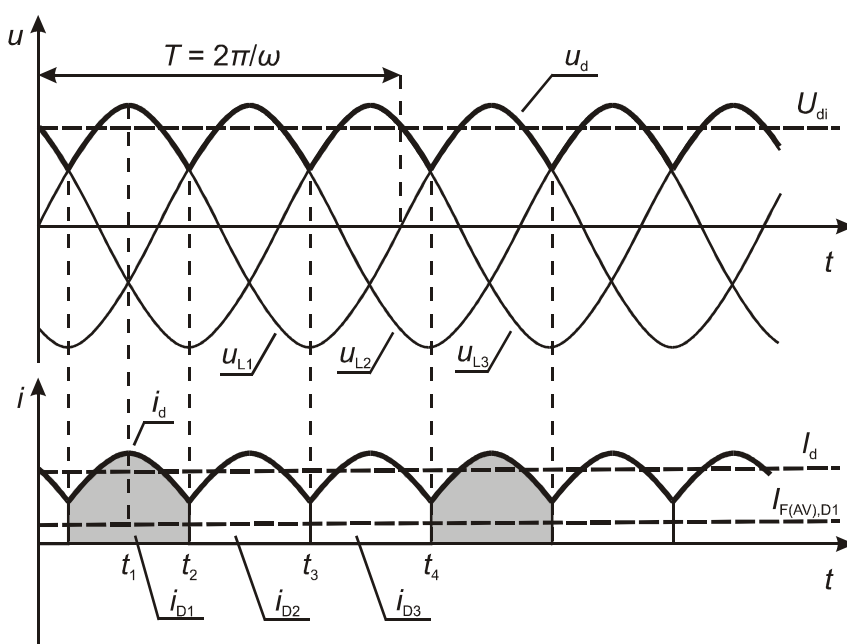
- napięcie wyjściowe u_d jest zawsze równe największemu z trzech napięć fazowych u_{L1} , u_{L2} i u_{L3} (pogrubiona linia na górnym wykresie rys. 5b);
- prąd wyjściowy i_d jest zgodnie z prawem Ohma proporcjonalny do napięcia u_d , czyli pulsuje tak samo jak napięcie (pogrubiona linia na dolnym wykresie rys. 5b);

- prąd wyjściowy jest kolejno przewodzony przez poszczególne diody: D_1 (szary obszar na wykresie), D_2 , D_3 i ponownie D_1 , D_2 itd.;

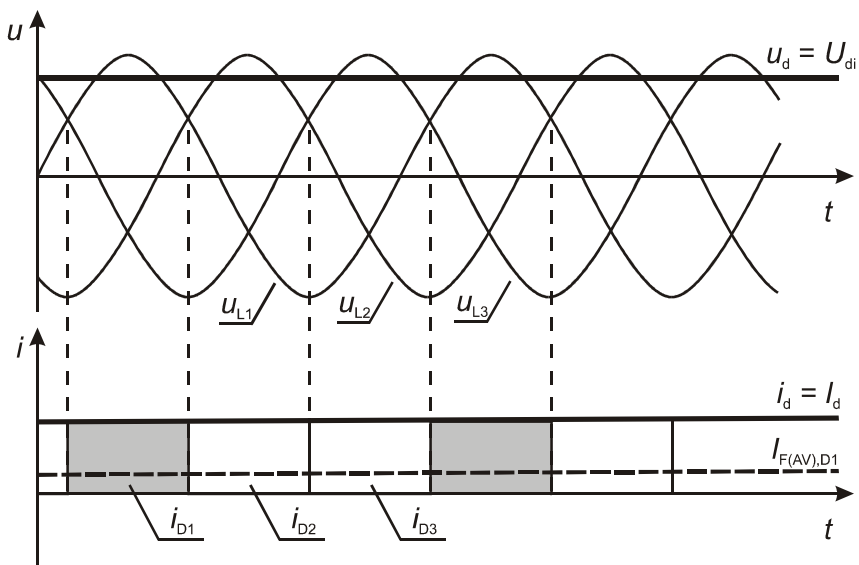
a)



b)



c)



Rys. 5. Prostownik gwiazdowy trójpulsowy: a) schemat; b) przebiegi w układzie bez filtracji prądu; c) przebiegi w układzie z idealną filtracją prądu

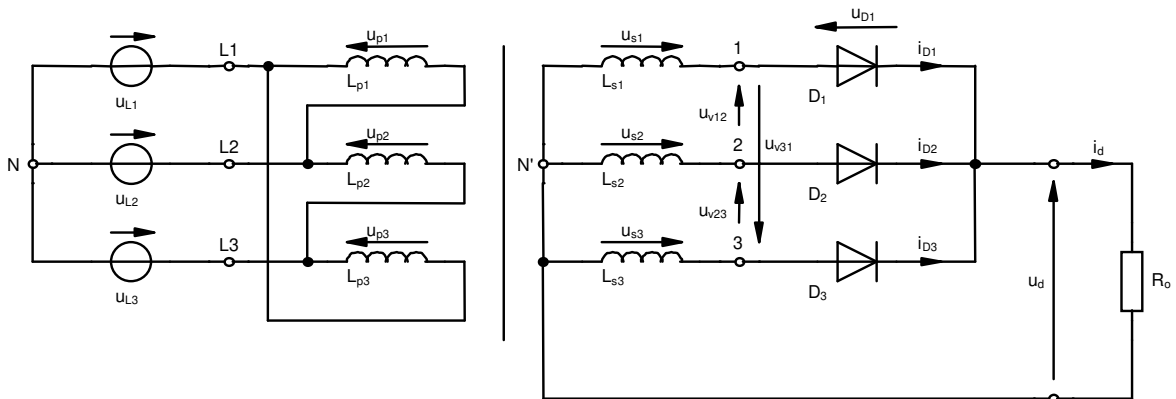
- układ jest istotnie trójpulsowy, gdyż w jednym okresie sieci $T = 2\pi/\omega$ występują $p = 3$ pulsy napięcia wyjściowego u_d .

Jak widać, przebiegi wciąż nie są stałe, ale ich tętnienia są wyraźnie mniejsze niż w przypadku układu jednopulsowego. Takie przebiegi można już dużo łatwiej odfiltrować. W tej sytuacji można przyjąć, że prąd wyjściowy jest stały i równy wartości średniej I_d i podobnie napięcie wyjściowe jest stałe i równe wartości średniej idealnej U_{di} . Zobrazowano to na rys. 5c. Z reguły tablice prostowników pokazują takie właśnie, idealnie wyprostowane przebiegi. Zasada działania układu pozostaje jednak taka sama: prąd jest na zmianę przejmowany przez kolejne diody.

2.3.b. Układ trójpulsowy z transformatorem

Na koniec przyjrzyjmy się jeszcze rys. 6, który przedstawia układ trójpulsowy z transformatorem separującym. Napięcia fazowe u_{L1} , u_{L2} , u_{L3} występują teraz po stronie pierwotnej transformatora, zaś źródła w gałęziach z zaworami po stronie wtórnej zostają zastąpione uzwojeniami wtórnymi L_{s1} , L_{s2} , L_{s3} .

Tak jak w przypadku układu jednopulsowego, przebiegi w układzie z transformatorem będą identyczne jak w układzie bez transformatora (rys. 5b i 5c), jedynie oznaczenia u_{L1} , u_{L2} , u_{L3} należy zamienić na u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} . Trzeba jednak wiedzieć, że transformator dla sieci trójfazowej jest nieco bardziej skomplikowany niż dla sieci jednofazowej. Dla jednej z najprostszych możliwych konstrukcji, oznaczanej przez Dy5 i wykorzystanej w układzie z rys. 6:



Rys. 6. Prostownik gwiazdowy trójpulsowy z transformatorem separującym o prostej konfiguracji uzwojeń Dy5 (trójkąt-gwiazda)

- uzwojenia wtórne są oczywiście połączone w gwiazdę, gdyż rozpatrujemy prostownik gwiazdowy (środek gwiazdy to punkt N' , w którym zbiegają się końce uzwojeń wtórnych L_{s1} , L_{s2} i L_{s3});
- jeżeli by „rozplątać” połączenia po stronie pierwotnej, to okaże się, że uzwojenia pierwotne są połączone w trójkąt (wierzchołki stanowią punkty $L1$, $L2$ i $L3$, zaś boki to uzwojenia pierwotne L_{p1} , L_{p2} i L_{p3}).

Przyjmijmy ponownie, że transformator jest idealny o przekładni zwojowej $n = 1:1$, czyli

$$\frac{u_{s1}}{u_{p1}} = \frac{u_{s2}}{u_{p2}} = \frac{u_{s3}}{u_{p3}} = \frac{N_s}{N_p} = n^{-1} = \frac{1}{1}. \quad (21)$$

Trzeba zauważyć, że w takim przypadku napięcie na uzwojeniu wtórnym u_{s1} jest większe niż u_{L1} – podczas gdy w układzie jednopulsowym były one sobie równe. Na stronę wtórną transformuje się tu bowiem napięcie międzyfazowe, nie fazowe – wynika to z włączenia uzwojeń pierwotnych nie między punkty $L1$, $L2$ i $L3$ a punkt N , ale kolejno między punkty $L1$ i $L2$, $L2$ i $L3$, $L3$ i $L1$.

3. Pomiar

3.1. Układ pomiarowy

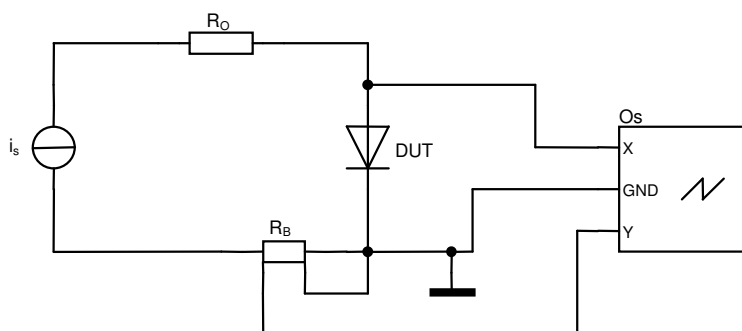
Schemat układu pomiarowego do badania charakterystyk statycznych stanu przewodzenia przedstawiono na rys. 7. Składa się on z charakterografu, do którego należy generator prądu i_s o regulowanej amplitudzie I_{sm} , opornik obciążający R_o i bocznik R_B , oraz oscyloskopu Os. Wygląd charakterografu przedstawia rys. 8. Urządzenie to jest przystosowane do badania zarówno diod, jak i tyrystorów energetycznych jedno- i dwukierunkowych.

Element badany DUT (ang. *Device Under Test*) umieszcza się na płycie izolacyjnej charakterografu i włącza w obwód pomiarowy za pomocą przewodów z zaciskami – osobnymi dla obwodu prądowego i dla pomiaru napięcia. Bocznik R_B o rezystancji $1\text{ m}\Omega$, służący do pomiaru prądu elementu badanego, włączony jest w obwód wewnątrz obudowy. Napięcia na elemencie badanym i na boczniku wyprowadzone są do gniazd BNC znajdujących się z tyłu obudowy charakterografu.

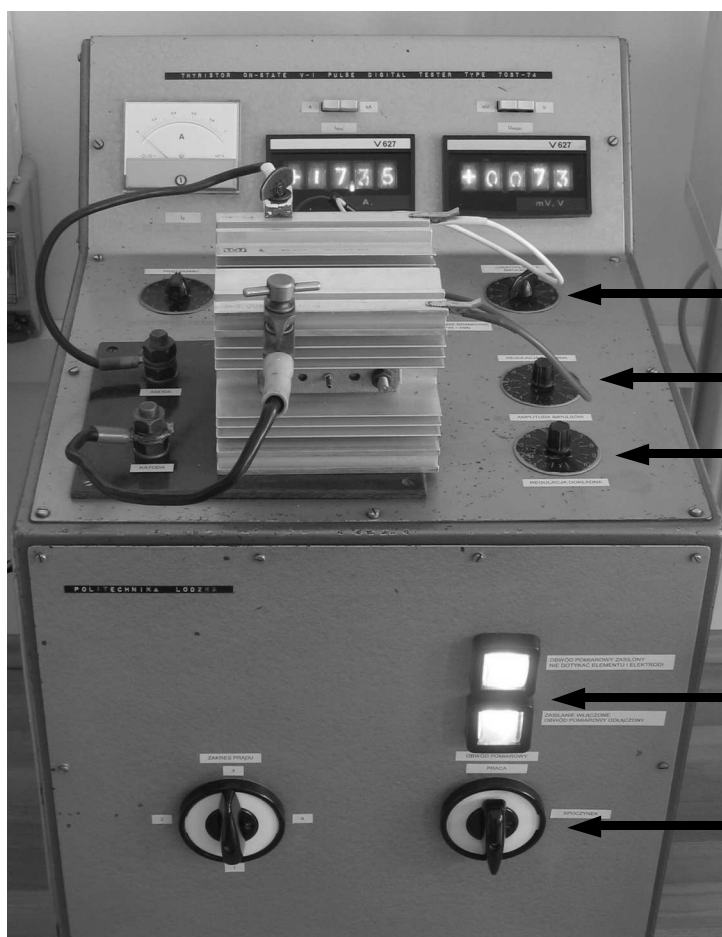
Zasada działania charakterografu jest następująca. Źródło prądowe i_s wymusza przepływ prądu przez badany element. Prąd ten ma kształt dodatniej połówki sinusoidy o amplitudzie i okresie powtarzania regulowanych odpowiednimi pokrętkami. Bieżącą amplitudę prądu I_{sm} odczytuje się z ekranu oscyloskopu, natomiast znajomość okresu powtarzania nie jest istotna. Ze względu na to, że długość półokresu sinusoidy jest dużo większa od stałych czasowych związanych z procesami dynamicznymi zachodzącymi w diodzie, można uznać, że w każdej chwili mamy do czynienia ze stanem quasi-ustalonym. Tak więc sinusoidalne impulsy prądu powodują przesuwanie się punktu pracy diody w górę i w dół po jej charakterystyce statycznej. Mierząc jednocześnie prąd przyrządu i napięcie na nim za pomocą oscyloskopu (w funkcji czasu), a następnie wykreślając pierwsze w funkcji drugiego (odrzucając czas), uzyskuje się zbiór punktów ułożonych na charakterystyce statycznej, której typowy przebieg przedstawiono już na rys. 1b.

Impulsy prądu są odpowiednio krótkie i powtarzane z odpowiednio małą częstotliwością, aby przyrząd nie zdążył się nagrzać. Dzięki temu uzyskujemy charakterystyki izotermiczne, tzn. dla stałej temperatury (w naszym przypadku – temperatury pokojowej w laboratorium, ok. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$). W przeciwnym wypadku, gdyby pomiary wykonywać przepuszczając przez diodę prąd stały lub wolno zmienny, każdy kolejny punkt pomiarowy (przy rosnącym prądzie) byłby uzyskany dla innej, coraz

wyższej temperatury, gdyż wydzielana moc powodowałaby stopniowe nagrzewanie struktury półprzewodnikowej. Takie charakterystyki byłyby bezużyteczne w projektowaniu układów.



Rys. 7. Uproszczony schemat układu pomiarowego



Rys. 8. Widok charakterografu do pomiaru charakterystyk stanu przewodzenia – opisano funkcje wykorzystywane w ćwiczeniu

3.2. Wykonanie pomiarów

Uwaga! Należy bezwzględnie przestrzegać poniższych wskazówek bezpieczeństwa!

1. W obwodzie pomiarowym nie występują duże wartości napięć, a obudowa charakterografu jest odpowiednio zabezpieczona. Jednak ze względu na zasilanie urządzenia z sieci 400 V należy pamiętać o zachowaniu odpowiedniej ostrożności – szczególnie niedotykania elementów metalowych wtedy, gdy nie jest to potrzebne.

2. W obwodzie pomiarowym wymuszany jest przepływ prądu o natężeniu rzędu nawet kiloamperów. Ze względów bezpieczeństwa bezwzględnie nie należy zbliżać się do śrub mocujących, końcówek przewodów obwodu prądowego oraz elektrod lub radiatora badanego elementu, kiedy świeci się czerwona lampa ostrzegawcza!

3. Z powyższych względów należy też dbać o to, by radiator badanego elementu znajdował się zawsze w pewnej odległości (min. 2 cm) od śrub mocujących przewody obwodu prądowego.

1. Upewnić się, że zasilanie obwodu pomiarowego jest odłączone – przełącznik *Obwód pomiarowy* w pozycji *Spoczynek*, nie świeci się czerwona lampa ostrzegawcza.

Sieć zasilającą 400 V, o ile jest odłączona, załącza i wyłącza w odpowiednim momencie prowadzący.

2. Sprawdzić poprawność połączeń gniazd z tyłu charakterografu z oscyloskopem:
 - napięcie (*NAP*) do kanału 1,
 - prąd (*PRĄD*) do kanału 2,
 - synchronizacja (*SYN*) do wejścia wyzwalania zewnętrznego (Ext Trig).
3. Wszystkie pokręta regulacyjne charakterografu (nie dotyczy przełączników *Zakres prądu* i *Obwód pomiarowy*) skrócić do lewego skrajnego położenia.
4. Zamocować (lub skontrolować poprawność i pewność mocowania) pierwszą z diod do zacisków obwodu prądowego (*Anoda*, *Katoda*). Zwrócić szczególną uwagę na poprawną polaryzację zgodnie z opisem przy śrubach mocujących na płycie izolacyjnej.

Zamiana zacisków anody i katody grozi zniszczeniem przyrządu, uszkodzeniem charakterografu i oscyloskopu oraz może stanowić zagrożenie zdrowia osoby obsługującej charakterograf! To samo stosuje się do punktu 5.

5. Przyłączyć do diody zaciski pomiarowe napięcia (*Pomiar napięcia A-K*). Zwrócić szczególną uwagę na poprawną polaryzację zgodnie z opisem obok wyprowadzenia przewodów.
6. Na podstawie oznaczeń na obudowie badanej diody (nie na radiatorze) wyznaczyć jej główne parametry znamionowe, korzystając z załączonych fragmentów katalogu (rozdział 2 oraz karta katalogowa, w której podano przykład interpretacji oznaczeń).

Przed wykonaniem punktu 7 prowadzący musi sprawdzić poprawność połączeń!

7. Załączyć zasilanie układu pomiarowego (przełącznik *Obwód pomiarowy* w pozycję *Praca*). Zapali się czerwona lampa ostrzegawcza.

8. Postępując ściśle według poniższych podpunktów, doprowadzić do wyświetlenia na ekranie oscyloskopu przebiegu prądu badanej diody i napięcia na niej (przebieg prądu powinien mieć kształt dodatniej połówki sinusoidy):
- ustawić poziom zera obu kanałów (wskazywane przez strzałkę z numerem kanału na lewo od podziałki) na tym samym poziomie, na jednej z dolnych linii podziałki – pokrętła *Vertical Position*;
 - ustawić wejścia zewnętrzne:
 - włączyć sprzężenie ze składową stałą (na obu kanałach) – odpowiednio przycisk 1 albo 2, przyciskiem ekranowym wybrać *Coupling*, pokrętłem *Multipurpose* wybrać DC i zatwierdzić wciskając pokrętło *Multipurpose*,
 - uwzględnić brak sondy napięciowej w kanale 1 – wcisnąć przycisk 1, wybrać *Probe* ▶ *Voltage*, *Attenuation* ▶ *1X*,
 - w kanale 2 uwzględnić przelicznik prądu na napięcie wynikający z konstrukcji układu pomiarowego (patrz par. 3.1) – wcisnąć 2, wybrać *Probe* ▶ *Current*, *Scale* i odpowiedni przelicznik,
 - włączyć wyzwalanie z wejścia zewnętrznego – wcisnąć *Trigger Menu*, wybrać *Source* ▶ *Ext*;
 - wyregulować nastawy wyzwalania:
 - włączyć normalny tryb wyzwalania – wybrać *Mode* ▶ *Norm*,
 - jeżeli na ekranie pojawił się obraz przebiegów (lub jego fragment), odświeżany z połową słyszalnej częstotliwości pracy charakterografu, wyświetlany zawsze w tym samym miejscu i utrzymujący się aż do następnego odświeżenia – przejść do następnego podpunktu, w przeciwnym razie:
 - wyregulować poziom wyzwalania – pokrętło *Trigger Level*;
 - wyregulować nastawy tak, aby na ekranie widoczna była jedna półfala sinusoidy prądu wraz ze swoim początkiem oraz aby przebiegi w stanie przewodzenia (tj. stan wyłączania i zaworowy nie są istotne) maksymalnie wypełniały ekran w pionie:
 - podstawa czasu – pokrętło *Horizontal Scale*.,
 - przesunięcie przebiegów w poziomie – pokrętło *Horizontal Position*,
 - wzmocnienia kanałów – pokrętła *Vertical Scale*.
9. Na podstawie odczytanych parametrów znamionowych diody ustalić, jaka amplituda generatora prądu I_{sm} jest niezbędna do uzyskania charakterystyki prądowo-napięciowej diody w zakresie, który pozwoli na wyznaczenie parametrów $U_{F(TO)}$ i r_F zgodnie z ich definicją. Wynik przedstawić do akceptacji prowadzącemu.

Nieprawidłowo przyjęta wartość lub ustawienie przelicznika prądu na napięcie może spowodować zniszczenie przyrządu!

Punkt 10 należy najpierw przeczytać w całości, a dopiero potem przystąpić do jego wykonywania.

10. Za pomocą pokrętła *Amplituda impulsów / Regulacja zgrubna*, obserwując obraz na oscyloskopie, ustawić z pewnym nadmiarem amplitudę prądu obliczoną w punkcie 9.

Jednocześnie:

- należy cały czas kontrolować podstawę czasu i w razie potrzeby modyfikować jej ustawienie tak, aby na ekranie widoczne było zawsze nie mniej niż 50% półfali sinusoidy – maksimum powinno być widoczne na ekranie;
- w razie potrzeby dostosowywać wzmacnienia kanałów tak, aby przebiegi w stanie przewodzenia maksymalnie wypełniały ekran w pionie, ale nie wykaczały poza ekran.

Uwaga: Należy zwrócić uwagę, że czas oczekiwania na odświeżenie ekranu jest duży w zestawieniu z szybkością, z którą można kręcić pokrętle regulacji zgrubnej!

11. Po uzyskaniu właściwych przebiegów:
 - a) włączyć tryb XY – wcisnąć *Utility*, wybrać *Display* ▶ *Format* ▶ *XY*; na ekranie powinna okresowo pojawiać się typowa charakterystyka prądowo-napięciowa diody w kierunku przewodzenia;
 - b) zatrzymać odświeżanie ekranu w chwili, gdy charakterystyka jest wyświetlana na ekranie – wcisnąć *Run / Stop*;
 - c) sprawdzić, czy maksymalna wartość prądu na wyświetlanym fragmencie charakterystyki odpowiada z pewnym nadmiarem wartości wyznaczonej w punkcie 9 – jeżeli nie, przywrócić odświeżanie ekranu, wyłączyć tryb XY i wykonać poprawnie punkt 10.
12. Jeżeli charakterystyka wyświetliła się poprawnie, to przebiegi prądu i napięcia z oscyloskopu pobrać i zapisać w postaci numerycznej:
 - a) w programie OpenChoice Desktop:
 - przejść do zakładki *Waveform Data Capture*,
 - kliknąć *Select Channels* i wybrać oba kanały 1 i 2 (*CH1*, *CH2*),
 - kliknąć *Get Data* (przy kolejnym pobieraniu danych ponowny wybór kanałów nie jest konieczny, wystarczy kliknąć przycisk *Get Data* w oknie głównym),
 - zapisać dane do pliku w formacie CSV – kliknąć *Save As*, nadać plikowi nazwę i zatwierdzić klikając *Zapisz* (nie wciskając klawisz *Enter*, gdyż spowodowałoby to ponowne wywołanie funkcji *Save As*);
 - b) na oscyloskopie przywrócić odświeżanie ekranu i tryb YT.
13. Skręcić pokrętła regulacyjne charakterografu w lewe skrajne położenie. Wyłączyć zasilanie obwodu pomiarowego przełącznikiem.
14. Powtórzyć dla drugiej diody punkty 4–13 z pominięciem punktu 8 (wszystkie ustawienia oscyloskopu poprawne dla diody pierwszej będą poprawne również dla diody drugiej).

4. Opracowanie i analiza wyników

4.1. Wyznaczenie wartości parametrów

Wyniki pomiarów posłużą nam obecnie do wykreślenia charakterystyk statycznych diod oraz wyznaczenia parametrów ich dwuodcinkowej aproksymacji, które następnie wykorzystamy w obliczeniach w konkretnym zastosowaniu układowym – przekształtniku AC/DC.

1. Zapisane dane przenieść do jednego skoroszytu:
 - a) uruchomić program LibreOffice Calc;
 - b) otworzyć oba pliki (menu *Plik* ► *Otwórz*), w polu *Opcje separatora* wybierając *Rozdzielony*, a z opcji poniżej zaznaczając wyłącznie *Przecinek*;
 - c) jeżeli ustawienia regionalne komputera powodują, że komputer nie rozpoznał kropek jako separatora części dziesiętnej (o czym świadczy wyrównanie zawartości komórek do lewej zamiast do prawej), należy zamienić wszystkie przecinki na kropki (menu *Edycja* ► *Znajdź i zamień*);
 - d) przejść do drugiego z otwartych dokumentów;
 - e) z menu wybrać *Arkusz* ► *Przesuń lub kopiuj arkusz*, w polu *Do dokumentu* wybrać pierwszy z dokumentów, kliknąć *OK* i zamknąć bieżący plik;
 - f) przejść do pierwszego dokumentu (skoroszytu), który powinien obecnie zawierać dwa arkusze z wynikami dla dwóch diod;
 - g) koniecznie zapisać skoroszyt jako plik typu *Arkusz kalkulacyjny OpenDocument (.ods)* albo *Microsoft Excel (.xls)*.
2. Korzystając z menu *Format* ► *Komórki*, wybierając na liście *Kategoria* opcję *Liczba* lub *Naukowy* z odpowiednimi parametrami, doprowadzić do czytelnej formy prezentacji wyników w kolejnych kolumnach, z odpowiednią liczbą cyfr znaczących.

Punkty 4.3–6 należy wykonać najpierw w całości dla jednej diody, dopiero później powtórzyć je dla drugiej.

3. W arkuszu kalkulacyjnym wykreślić charakterystykę statyczną stanu przewodzenia $I_F = f(U_F)$.

4. Obliczyć napięcie progowe $U_{F(TO)}$ i rezystancję przyrostową w stanie przewodzenia r_F . Wykorzystać metodę opisaną w punkcie 2.1.c.
5. Korzystając z danych w arkuszu kalkulacyjnym, wykreślić dla każdej diody charakterystykę statyczną $I_F = f(U_F)$ zmierzona oraz jej aproksymację dwuodcinkową (osobny wykres dla każdej z diod, charakterystyka zmierzona i aproksymacja na tym samym wykresie).
6. Na podstawie wyników z punktu 4 i korzystając z informacji podanych w paragrafie 2.1.b, obliczyć charakterystyki $P_{av} = f(I_{F(av)})$ dla diody pracującej:
 - w układzie jednopulsowym,
 - w układzie trzypulsowym,

w zakresie $I_{F(av)}$ dostosowanym do danych znamionowych diody i umożliwiającym porównanie, o którym mowa w pkt. 7.

Wartości $I_{F(av)}$ nie mają nic wspólnego z danymi pobranymi z oscyloskopu, gdyż mierzone wówczas były wartości chwilowe i_F , które można było uznać za quasi-stałe I_F (dzięki temu, że zmiany prądu były stosunkowo powolne), a nie wartości średnie $I_{F(av)}$. Wyniki pomiarów zawierają się teraz w obliczonych parametrach syntetycznych r_F i $U_{F(TO)}$.

W celu wyznaczenia charakterystyki w funkcji $I_{F(av)}$, należy obliczyć nieznaną wartość skuteczną prądu przewodzenia. Zależność wartości skutecznej od średniej należy wyliczyć na podstawie współczynników proporcjonalności z tablicy prostowników. Z tablicy można uzyskać dwie proste równości, z połączenia których da się wyznaczyć wzór na $I_{F(rms)}$ w zależności od $I_{F(av)}$ dla danego typu prostownika. Następnie wzór ten należy podstawić do wzoru na średnią moc strat P_{av} .

7. Wszystkie 4 charakterystyki obliczone w poprzednim punkcie nanieść na jeden wykres. Porównać wyniki obliczeń z charakterystykami katalogowymi („1faz.” – układ jednopulsowy, „3faz.” – układ trzypulsowy).

4.2. Wykorzystanie aproksymacji dwuodcinkowej

Założmy, że konieczne jest zbudowanie prostownika dla pewnego urządzenia dużej mocy z wykorzystaniem jednej z przebadanych diod energetycznych. Należy ustalić, jaką konfigurację i jaką diodę należy zastosować. Należy się ograniczyć do poniższych punktów – oczywiście w rzeczywistości trzeba byłoby uwzględnić więcej czynników. Do wykonania tego zadania niezbędne są tablice przekształtników [3], stanowiące załącznik do niniejszej instrukcji.

Parametry układu są następujące:

- zasilanie z trójfazowej sieci energetycznej o napięciu fazowym $U_f = 230 \text{ V}$, 50 Hz ;
- obciążenie $I_d = 250 \text{ A}$;
- warunki chłodzenia diod takie, że maksymalnie można w nich wydzielić moc średnią $P_{av,max} = 200 \text{ W}$ (tzn. jest to wartość maksymalna dopuszczalna).

Należy rozważyć dwa gwiazdowe układy prostowników:

- 1) jednopulsowy z transformatorem o przekładni $n = 2:6$ (rys. 4a), zasilanym z jednej z faz sieci;
- 2) trójpulsowy zasilany przez transformator w konfiguracji Dy5 (trójkąt-gwiazda) o przekładni $n = 9:6$ (rys. 6).

W celu uzyskania żadanego rezultatu, należy postępować zgodnie z poniższymi punktami.

1. Utworzyć tabelę zgodnie ze wzorem poniżej. Zamiast (1) i (2) wpisać oznaczenia diod badanych w doświadczeniu.

Konfi- guracja	Dioda	$I_{F(av)max}$ [A]	$I_{T(av)}$ [A]	Prąd	U_p [V]	U_s [V]	U_{v0} [V]	U_{di} [V]	U_{RRM} [V]	U_{RWM} [V]	Napię- cie	Wynik
1	(1)											
1	(2)											
2	(1)											
2	(2)											

2. Dla każdej diody, dla każdej konfiguracji, z wykreślonych wcześniej charakterystyk $P_{av} = I_{F(av)}$ odczytać w przybliżeniu maksymalny dopuszczalny średni prąd przewodzenia diody $I_{F(av)max}$ odpowiadający podanym wyżej warunkom chłodzenia $P_{av,max}$. Wyniki wpisać do tabeli.
3. Dla obu konfiguracji, na podstawie schematu odpowiedniego układu (zgodnie z konfiguracją) i danych transformatora podanych wyżej, obliczyć kolejno i wpisać do tabeli:
 - napięcie skuteczne na uzwojeniu pierwotnym U_p ,
 - napięcie skuteczne na uzwojeniu wtórnym U_s ,
 - oraz skuteczne napięcie międzyprzewodowe po stronie zaworu U_{v0} .

Indeksy „1”, „2”, „3” zostały powyżej opuszczone, gdyż ze względu na symetrię układu trójpulsowego, wartości skuteczne będą takie same dla każdej z 3 gałęzi.

Napięcie U_{v0} należy obliczyć między odpowiednimi punktami zgodnie z rysunkiem w tablicy prostowników (odpowiednie napięcia zostały także zaznaczone na rys. 4a i 6).

4. Dla obu konfiguracji, korzystając ze współczynników podanych w tablicy prostowników oraz wyników z pkt. 3, obliczyć kolejno i wpisać do tabeli:
 - wyprostowane napięcie wyjściowe układu idealnego U_{di} ;
 - szczytowe powtarzalne napięcie robocze zaworu U_{RWM} .
5. Dla obu konfiguracji, korzystając z tablicy prostowników, obliczyć średni prąd zaworu $I_{T(av)}$ dla podanego wyżej obciążenia. Wyniki wpisać do tabeli.
6. Dla obu diod uzupełnić tabelę ustalonymi na początku ćwiczenia wartościami znamionowymi U_{RRM} .

7. Na podstawie wpisanych do tabeli wartości wypełnić 3 ostatnie kolumny:
- w kolumnie „Prąd” należy postawić znak „+” jeżeli dioda posiada odpowiednie parametry ze względu na prąd lub „-” jeżeli nie posiada;
 - w kolumnie „Napięcie” należy postawić znak „+” jeżeli dioda posiada odpowiednie parametry ze względu na napięcie lub „-” jeżeli nie posiada;
 - na podstawie kolumn „Prąd” i „Napięcie” zdecydować, czy dana dioda nadaje się do zastosowania w prostowniku o danej konfiguracji – wpisać odpowiednio „+” lub „-” w kolumnie „Wynik”.

Na tej podstawie wybrać konfigurację układu, który możliwy jest do skonstruowania, i nadającą się do niego diodę.

8. Czy porównanie znamionowego prądu średniego $I_{F(av)m}$ ze średnim prądem wyprostowanym I_d wystarcza, by poprawnie dobrać diodę do układu? A czy wystarczyłoby porównanie prądu znamionowego $I_{F(av)m}$ ze średnim prądem zaworu $I_{T(av)}$? Jeżeli nie – wskazać, jakie inne dane okazały się niezbędne.
9. Dokonać analizy sprawności przekształtnika wybranego w wyniku wykonania pkt. 7:
- obliczyć moc czynną wyjściową (odbiornika) P_{wy} dla założonego na wstępie obciążenia, przyjmując że prostowanie jest idealne ($u_d = U_{di}$);
 - obliczyć moc czynną strat w zaworach diodowych przekształtnika ΔP , korzystając z aproksymacji charakterystyki statycznej stanu przewodzenia;

Niezbędne wartości prądu zaworu należy obliczyć na podstawie znanego prądu obciążenia I_d i współczynników proporcjonalności z tablicy prostowników.

- obliczyć sprawność energetyczną prostownika η przy założeniu upraszczającym, że straty mocy występują wyłącznie w zaworach półprzewodnikowych;
- czy otrzymany wynik świadczy o tym, że wybrana dioda spełnia wymagania stawiane energetycznym diodom prostowniczym?

4.3. Parametry struktury półprzewodnikowej

1. Wiedząc, jakie wymagania są stawiane (a jakie nie są) diodom energetycznym [1], przewidzieć, czy badane diody były przyrządami bez czy z przebiciem skrośnym. W oparciu o ten wniosek, dla tej z badanych diod, która została wybrana do realizacji przekształtnika w punkcie 4.2:
 - a) przyjmując, że napięcie przebicia lawinowego U_{br} jest równe napięciu znamionowemu U_{RRM} , obliczyć koncentrację domieszek w bazie N_D z empirycznej zależności na napięciu przebicia U_{br} podanej w [2];
 - b) na tej podstawie obliczyć grubość pastylki krzemu przyjmując, że dla napięcia przebicia obszar ładunku przestrzennego wypełnia całą szerokość obszaru słabo domieszkowanego W_N [2].
2. Oszacować średnicę pastylki krzemu d wybranej diody przyjmując, że:
 - maksymalna gęstość prądu dla przyrządu krzemowego wynosi typowo $J_{max} = 200 \text{ A/cm}^2$;
 - dioda została zaprojektowana na maksymalną wartość prądu I_{max} odpowiadającą jednopółwkowo wyprostowanej sinusoidzie o wartości średniej równej prądowi znamionowemu $I_{F(av)m}$ (zależność między wartością średnią a maksymalną takiego przebiegu można znaleźć m. in. w tablicy prostowników – występuje on w prostowniku jednopulsowym);
 - pastylka ma przekrój kołisty, a prąd rozplywa się jednorodnie w całym przekroju.

5. Literatura

- [1] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 1F. Fizyczne podstawy działania przyrządów półprzewodnikowych mocy*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2018.
- [2] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Instrukcja 0. Wprowadzenie do elektroniki mocy*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2015.
- [3] Barlik R., Nowak M.: *Poradnik inżyniera energoelektronika*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.