

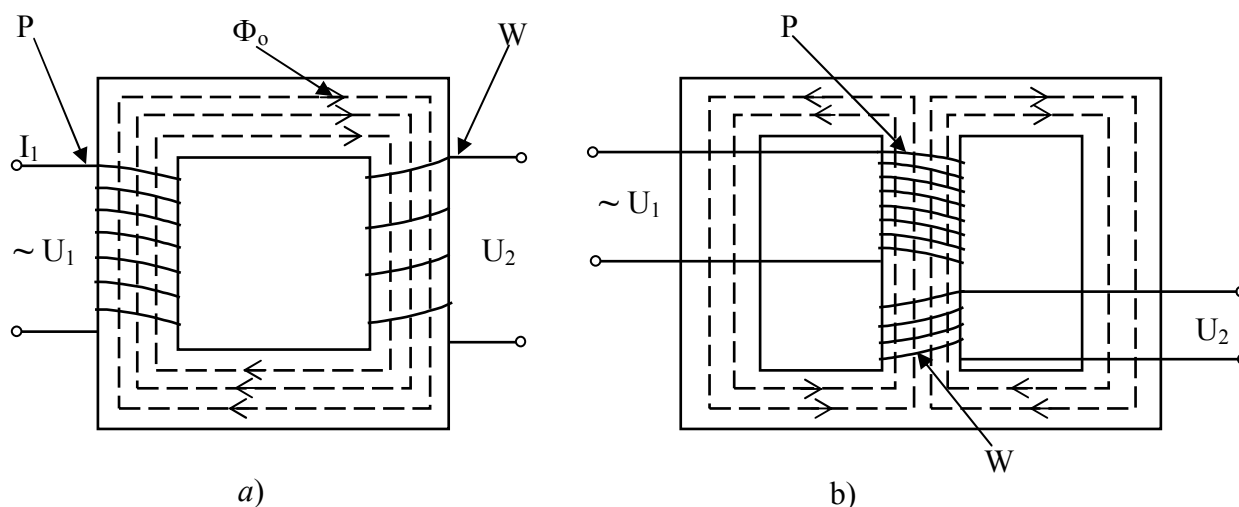
BADANIE TRANSFORMATORA

- I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie się z budową i działaniem transformatora w trybie biegu jałowego oraz biegu roboczego, wyznaczenie przekładni transformatora, oporu wewnętrznego uzwojenia wtórnego oraz sprawności.
- II. Przyrządy:** transformator badany, autotransformator, woltmierz – 2 szt., amperomierz – 2 szt., opornik regulowany o odpowiedniej mocy.
- III. Literatura:** 1. T. Dryński, „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki”, PWN Warszawa 1991.
2. E. Jeziński, „Transformatory”, Podstawy teoretyczne, WNT Warszawa 1965.

UWAGA !!! Podczas wykonywania ćwiczenia należy zachować szczególną ostrożność ze względu na zastosowany tu do zasilania autotransformator.

IV. Wprowadzenie.

Jednym z zasadniczych powodów, dla którego prądy przemienne znalazły powszechne zastosowanie, jest możliwość zmiany napięcia w bardzo szerokich granicach i bez dużych strat energii. Przyrządem, który do tego celu służy jest transformator (rys.1a). Składa się on z dwóch uzwojeń: pierwotnego P i wtórnego W, nawiniętych na rdzeń żelazny, najczęściej w kształcie prostokąta. Stosowane są też rdzenie innych kształtów, przy czym dość często spotyka się formę pokazaną na rys.1b, zwaną podwójnym prostokątem.



Rys.1. Zasada budowy transformatora.

Z kształtem rdzenia wiąże się zagadnienie większego lub mniejszego rozproszenia strumienia magnetycznego oraz masy zastosowanego żelaza. Rdzeń składa się z cienkich blach żelaznych o grubości ok. 0.5 mm, odizolowanych od siebie dla uniknięcia strat na prądy wirowe.

Jeśli uzwojenie pierwotne dołączymy do źródła prądu przemiennego o napięciu U_1 , wówczas przez uzwojenie pierwotne popłynie prąd przemienny o natężeniu I_1 (U_1 i I_1 oznaczają chwilowe wartości napięcia i natężenia), a poprzez rdzeń popłynie zmienny strumień magnetyczny Φ_0 , którego zmiany będą zgodne ze zmianami natężenia prądu I_1 , tzn. będą w fazie z prądem magnesującym. Strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie pierwotne przenika również przez uzwojenie wtórne. W transformatorze mamy zatem zmienny strumień magnetyczny Φ_0 , który przenika dwa uzwojenia: pierwotne i wtórne, indukując w nich zmienne siły elektromotoryczne: E_1 – w uzwojenie pierwotnym i E_2 – w uzwojeniu wtórnym.

1. Załóżmy najpierw, że uzwojenie wtórne jest otwarte, tzn. transformator nie jest obciążony; mamy wówczas tak zwany bieg jałowy. Uzwojenie pierwotne transformatora zachowuje się wówczas jak zwojnica o określonym oporze indukcyjnym i omowym, przez którą będzie płynął prąd o natężeniu I_0 , zwany prądem biegu jałowego transformatora. Zależność przyłożonego napięcia U_1 od czasu określa równanie

$$U_1 = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

gdzie U_m jest wartością szczytową albo amplitudą napięcia, $\omega = 2\pi f$ – tzw. częstością kołową zmian napięcia. Wiemy, że natężenie prądu w uzwojeniu o określonym oporze indukcyjnym (przy $R = 0$) jest opóźnione w fazie o $\pi/2$. Wobec tego mamy

$$I_1 = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -I_m \cos \omega t \quad (2)$$

Skoro strumień magnetyczny jest zgodny w fazie z prądem magnesującym I_1 , przeto

$$\Phi = -\Phi_0 \cos \omega t \quad (3)$$

gdzie Φ_0 jest to szczytowa wartość strumienia magnetycznego określona szczytową wartością prądu I_m .

Każdy pojedynczy zwój zarówno uzwojenia pierwotnego, jak i wtórnego, jest przenikany przez pełny strumień magnetyczny Φ , wobec tego siła elektromotoryczna indukcji powstająca w każdym zwoju jest proporcjonalna do szybkości zmian strumienia $d\Phi/dt$. Oba uzwojenia można traktować jako zespół połączonych szeregowo pojedynczych zwojów. Jeśli uzwojenie pierwotne zawiera n_1 zwojów, to całkowitą siłę elektromotoryczną E_1 indukowaną w tym uzwojeniu określa równanie

$$E_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Wyznamy pochodną $d\Phi/dt$ na podstawie równania (3) i podstawivszy do równania (4) otrzymujemy równanie:

$$E_1 = -n_1 \Phi_0 \omega \sin \omega t \quad (5)$$

Przyłożone napięcie U_1 winno zrównoważyć siłę elektromotoryczną indukcji E_1 oraz spadek napięcia na oporze omowym R_1 , słuszne jest zatem równanie:

$$U_1 = -E_1 + I_1 R_1 \quad (6)$$

(jest to II prawo Kirchhoffa dla obwodu pierwotnego) napięcie U_1 jest skierowane przeciwnie do E_1 . Jeżeli założymy, że opór omowy R_1 jest mały, ($R_1 = 0$), to po podstawieniu do (6) zależności (1) i (5) otrzymujemy

$$U_m \sin \omega t = +n_1 \Phi_0 \omega \sin \omega t \quad (7)$$

skąd

$$\Phi_0 = + \frac{U_m}{n_1 \omega} = \text{const.} \quad (8)$$

Jest to zasadniczy warunek pracy transformatora, wyraża on stałą wartość strumienia magnetycznego, którą określa przyłożone napięcie, ilość zwojów n_1 oraz częstość zmian prądu ω .

Strumień magnetyczny przenikając uzwojenie wtórne wywołuje w nim siłę elektromotoryczną indukcji E_2 , którą określi równość

$$E_2 = - n_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (9)$$

Siła elektromotoryczna E_2 wytworzy na końcówkach uzwojenia różnicę napięć U_2 , przy czym U_2 mieć będzie kierunek zgodny z kierunkiem E_2 . Słuszna jest zatem równość

$$U_2 = E_2 = - n_2 \frac{d\Phi}{dt} = - n_2 \Phi_0 \omega \sin \omega t \quad (10)$$

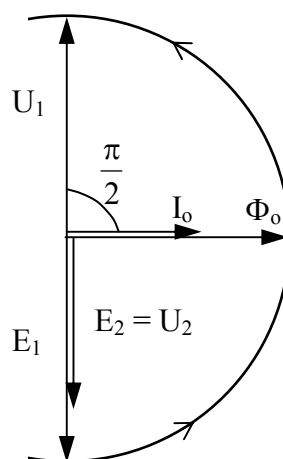
Dzieląc stronami równanie (10) przez (5) otrzymujemy

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = K \quad (11)$$

Równania (10) i (11) mówią nam iż:

- napięcie wtórne transformatora nieobciążonego jest przesunięte w fazie względem napięcia pierwotnego o π ($U_1 = - E_1$, natomiast $U_2 = E_2$)
- stosunek napięć obu uzwojeń jest równy stosunkowi liczby zwojów.

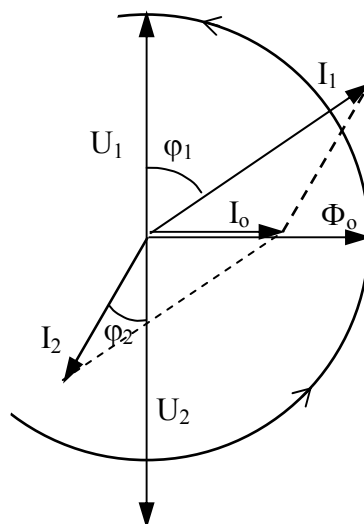
Wyrażony przez równanie (11) stosunek napięć nazywamy przekładnią transformatora albo rzadziej współczynnikiem transformacji. Przez proste dobieranie liczby zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego możemy w sposób dowolny, ograniczony tylko wytrzymałością na przebicie materiałów izolacyjnych, zmieniać napięcie prądu przemiennego. Ta cecha oraz brak jakichkolwiek ruchomych części stanowią dominujące zalety transformatora, którym zawdzięcza on swe rozpowszechnienie. Przejrzyste przedstawienie stosunków fazowych między prądowymi wielkościami wektorowymi w czasie jałowego biegu transformatora przedstawia rys.2.



Rys.2. Stosunki fazowe napięcia i natężenia prądu w czasie biegu jałowego.

2. Jeśli transformator obciążymy, zwierając końcówki wtórnego uzwojenia jakimś oporem omywym, wówczas w uzwojeniu wtórnym popłynie prąd o natężeniu I_2 , którego pole magnetyczne osłabi pierwotny strumień magnetyczny Φ_0 (zgodnie z regułą Lenza).

To osłabienie zostaje wyrównane przez wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym od wartości I_0 do I_1 . Ze względu na istnienie oporu indukcyjnego zarówno w uzwojeniu pierwotnym, jak i wtórnym, prąd I_1 jest przesunięty w fazie w stosunku do napięcia U_1 o kąt φ_1 , a I_2 w stosunku do napięcia U_2 o kąt φ_2 . Oba prądy I_1 i I_2 są tak przesunięte w fazie względem siebie, że ich suma geometryczna jest równa pierwotnemu prądowi magnesującemu I_0 , tzn. prądowi jałowego biegu transformatora, co w rezultacie zapewni stałą wartość strumienia magnetycznego Φ_0 , określoną równaniem (8). Stosunki fazowe między wielkościami prądowymi transformatora obciążonego przedstawia rys.3.



Rys.3. Stosunki fazowe napięcia i natężenia prądu w czasie biegu roboczego.

Stosunek napięć w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym nie odpowiada już przekładni transformatora, gdyż mamy teraz do czynienia ze spadkiem napięcia na oporze omowym uzwojenia wtórnego. Na podstawie równania (10) można przyjąć, że napięcie U_2 zmierzone w czasie jałowego biegu jest równe czynnej sile elektromotorycznej E_2 w czasie biegu roboczego. Słuszne jest zatem równanie

$$U'_2 = U_2 - I_2 R_2 \quad (12)$$

gdzie U'_2 oznacza napięcie na końcówkach uzwojenia wtórnego obciążonego transformatora. Widzimy z niego, że napięcie U'_2 jest mniejsze od napięcia U_2 obliczonego na podstawie przekładni transformatora i to w stopniu tym większym im większe jest obciążenie transformatora.

W związku z zasadą zachowania energii należy oczekiwać, że moc prądu dostarczonego przez uzwojenie wtórne powinna być równa mocy prądu płynącego w uzwojeniu pierwotnym, w związku z czym słuszną będzie równość następująca:

$$I_1 U_1 = I_2 U_2 \quad \text{lub} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

(stosunek natężeń prądów w obu uzwojeniach jest odwrotny do stosunku napięć).

W rzeczywistym przebiegu zjawisk moc oddana przez transformator jest mniejsza od mocy pobranej, gdyż istnieją jeszcze straty cieplne w uzwojeniach (zarówno pierwotnym jak i wtórnym) oraz straty cieplne w rdzeniu związane z powstawaniem prądów wirowych i histerezą żelaza. Sprawność działania danego transformatora można określić przez podanie współczynnika wydajności

$$W = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (13)$$

gdzie φ_1 i φ_2 są przesunięciami między napięciem i natężeniem prądu w obwodzie pierwotnym i w obwodzie wtórnym. Z dużym przybliżeniem można przyjąć $\varphi_1 = \varphi_2$ a wówczas otrzymamy wzór przybliżony na współczynnik wydajności transformatora

$$W = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \quad (14)$$

Jak z powyższego wynika, charakter pracy transformatora określić mogą następujące zasadnicze wielkości:

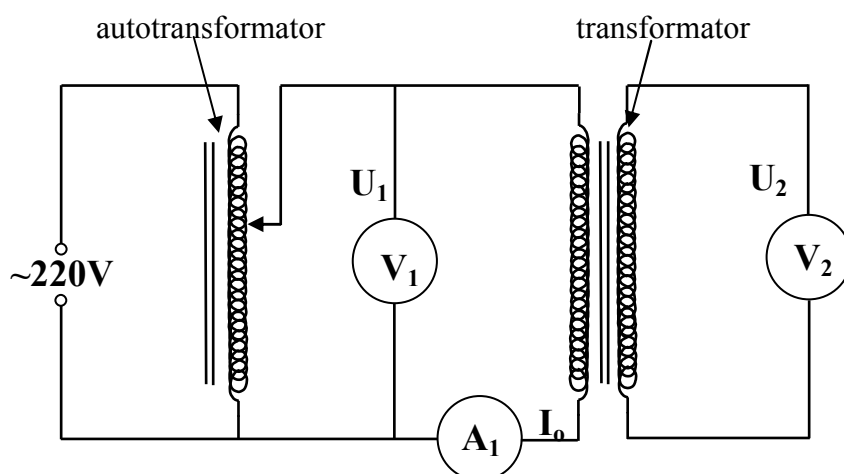
- natężenie prądu biegu jałowego,
- przekładnia transformatora,
- zależność napięcia wtórnego od obciążenia w czasie biegu roboczego,
- współczynnik wydajności W ,
- przesunięcie fazowe napięcia i natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym.

V. Pomiary.

1. Bieg jałowy transformatora.

1.1 Wyznaczanie natężenia prądu biegu jałowego.

Stosujemy układ połączeń podany na rys.4, nie dołączając do uzwojenia wtórnego transformatora woltomierza V_2 .

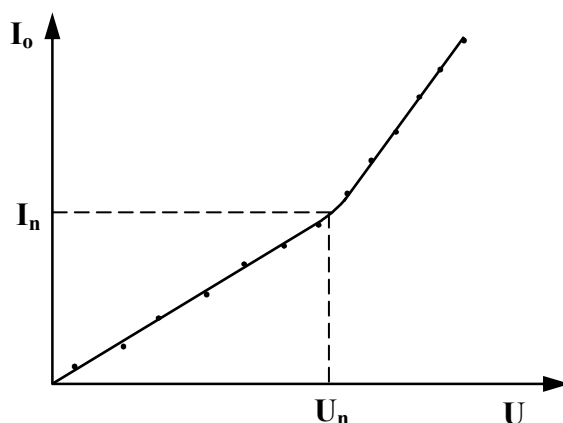


Rys. 4. Schemat układu do badania biegu jałowego transformatora.

Pierwotne uzwojenie transformatora zasilane jest z autotransformatora regulującego w sposób ciągły napięcie pierwotne U_1 , obwód wtórny pozostawiamy otwarty. Odczytane na amperomierzu A_1 natężenie prądu I_0 określa prąd jałowego biegu transformatora albo prąd magnesujący. Jest rzeczą oczywistą, że I_0 zależy od U_1 , przy czym powinno się okazać, że wzrost U_1 powoduje wzrost I_0 .

Zależność tego charakteru będzie miała miejsce tylko do takiej wartości I_0 , która spowoduje nasycenie rdzenia. Poczynając od tej chwili natężenie prądu będzie rosło znacznie szybciej w zależności od przyłożonego napięcia, niż miało to miejsce poprzednio.

Przyczyną jest to, że po przekroczeniu nasycenia rdzenia opór indukcyjny obwodu maleje, pozostaje tylko bardzo mały opór omowy. Charakter zależności I_0 od U_1 przedstawia rys.5. Współrzędne punktu przegięcia będą oznaczały odpowiednio napięcie nasycenia U_n i natężenie nasycenia I_n . Nie trzeba uzasadniać, że transformator nie może być dołączony do źródła o napięciu większym niż U_n .



Rys. 5. Zależność natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym od przyłożonego napięcia.

Przebieg zależności I_0 od U_1 sprawdzamy podwyższając stopniowo napięcie na autotransformatorze, odczytujemy U_1 i I_0 w odstępach co 10V, a następnie sporządzamy wykres, którego przebieg pozwoli znaleźć napięcie nasycenia U_n . Wynik obserwacji notujemy w tabeli I.

Tabela I.

Obwód pierwotny		Obwód wtórny	Przekładnia $K = \frac{U_2}{U_1}$	Wartość średnia przekładni
Napięcie U_1	Natężenie I_0	Napięcie U_2		

1.2 Wyznaczanie przekładni transformatora.

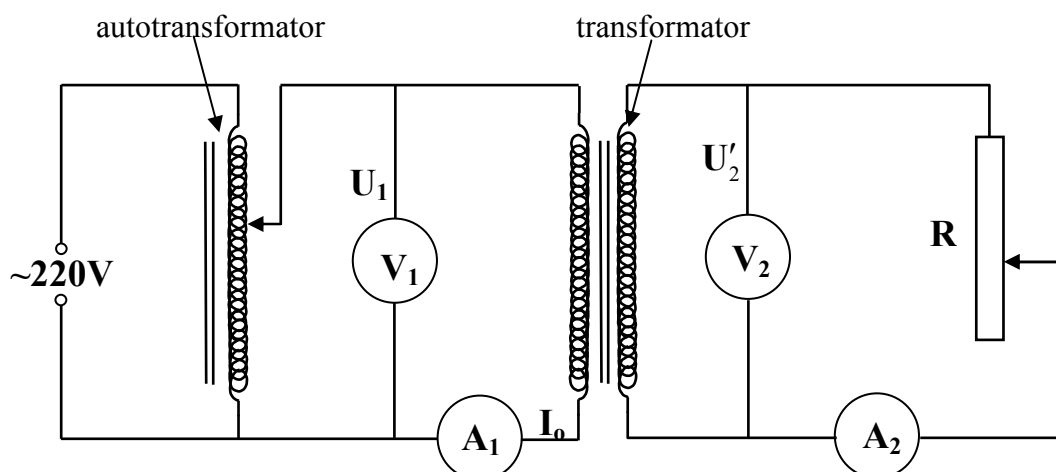
Do układu połączeń stosowanego poprzednio dodajemy woltomierz V_2 (rys.4). Ponieważ pobór prądu woltomierza jest zawsze niewielki (w przypadku woltomierza cyfrowego jest on rzędu mikroampera), przeto można przyjąć, że obserwowane na nim napięcia będą odpowiadały nieobciążonemu biegowi transformatora. Podwyższamy stopniowo napięcie U_1 odczytując je w odstępach co 10 V, za każdym razem notując odpowiednie wartości U_2 . Pomiary te można wykonać jednocześnie z pomiarami natężenia prądu biegu jałowego. Przekładnię transformatora stanowi stosunek U_2/U_1 zgodnie z równaniem (11). Wyznaczamy ją dla wszystkich par wartości U_1 i U_2 . Wyniki zapisujemy również w tabeli I.

2. Bieg roboczy transformatora.

Stosujemy nieco zmieniony układ połączeń. Do uzwojenia wtórnego dołączamy opór zmienny R , woltomierz V_2 oraz amperomierz A_2 (rys.6). Za pomocą autotransformatora nastawiamy napięcie U_1 nieco mniejsze od napięcia nasycenia U_n i już nie zmieniamy go w dalszej części ćwiczenia. Należy zbadać dwie zależności:

1. jak zmienia się napięcie wtórne przy różnych natężeniach prądu,
2. jaka jest wydajność transformatora dla różnych obciążeń.

W tym celu opór zmienny regulujemy tak, aby miał wartość maksymalną i odczytujemy wskazania przyrządów pomiarowych obwodów pierwotnego i wtórnego zapisując je w tabeli II.



Rys. 6. Schemat układu do badania biegu roboczego transformatora.

Następnie przez zmianę oporu R zwiększamy wartość natężenia prądu (w przedziale od 0.1 do 0.5 A) co np. 0.05 A i znów odczytujemy wskazania woltomierzy i amperomierzy obwodu pierwotnego i wtórnego. W ten sposób postępując wykonujemy pomiary dla około 10-ciu różnych wartości prądu. Na podstawie danych dotyczących obwodu wtórnego sporządzamy wykres zależności napięcia wtórnego U'_2 od natężenia I_2 prądu wtórnego. Okaże się teraz, że odczytane napięcia U'_2 są mniejsze od tych, które wynikają z przekładni transformatora dla biegu jałowego. Przyczyną jest spadek napięcia na oporze wewnętrznym uzwojenia. Bez popełnienia dużego błędu można przyjąć, że napięcie obliczone na podstawie znanej przekładni transformatora, jest równe sile elektromotorycznej czynnej w obwodzie. Stosując prawo Ohma dla obwodu całkowitego możemy obliczyć opór wewnętrzny uzwojenia wtórnego na podstawie podanego poprzednio równania (12).

Tabela II.

Obwód pierwotny			Obwód wtórny			Wydajność transformatora $\frac{U'_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} \approx$ $\approx \frac{U'_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1}$
Napięcie U_1	Natężenie I_1	Moc pozorna $M'_p = U_1 \cdot I_1$	Napięcie U'_2	Natężenie I_2	Moc pozorna $M''_p = U'_2 \cdot I_2$	

Obliczamy moc (pozorną) pierwotną $U_1 I_1$ oraz moc (pozorną) wtórną $U_2 I_2$, a następnie znajdujemy wydajność pracy transformatora dla poszczególnych obciążeń na podstawie równania (13).

VI. Opracowanie.

Zbierając to co powiedziano powyżej, w opracowaniu należy:

1. Wykreślić zależność $I_0(U_1)$ dla biegu jałowego i wyznaczyć przekładnię transformatora dla wszystkich par wartości U_1 i U_2 oraz obliczyć wartość średnią.
2. Wykreślić zależność $U'_2(I_2)$ dla biegu roboczego transformatora. Zależność ta powinna być prostą daną równaniem (12).

3. Obliczyć opór wewnętrzny uzwojenia wtórnego R_2 i napięcie na nieobciążonym transformatorze U_2 , korzystając z metody graficznej lub metody najmniejszych kwadratów i biorąc pod uwagę, że w równaniu prostej typu $y = a x + b$, mamy $x = I_2$, $y = U_2'$, $a = R_2$, $b = U_2$.