

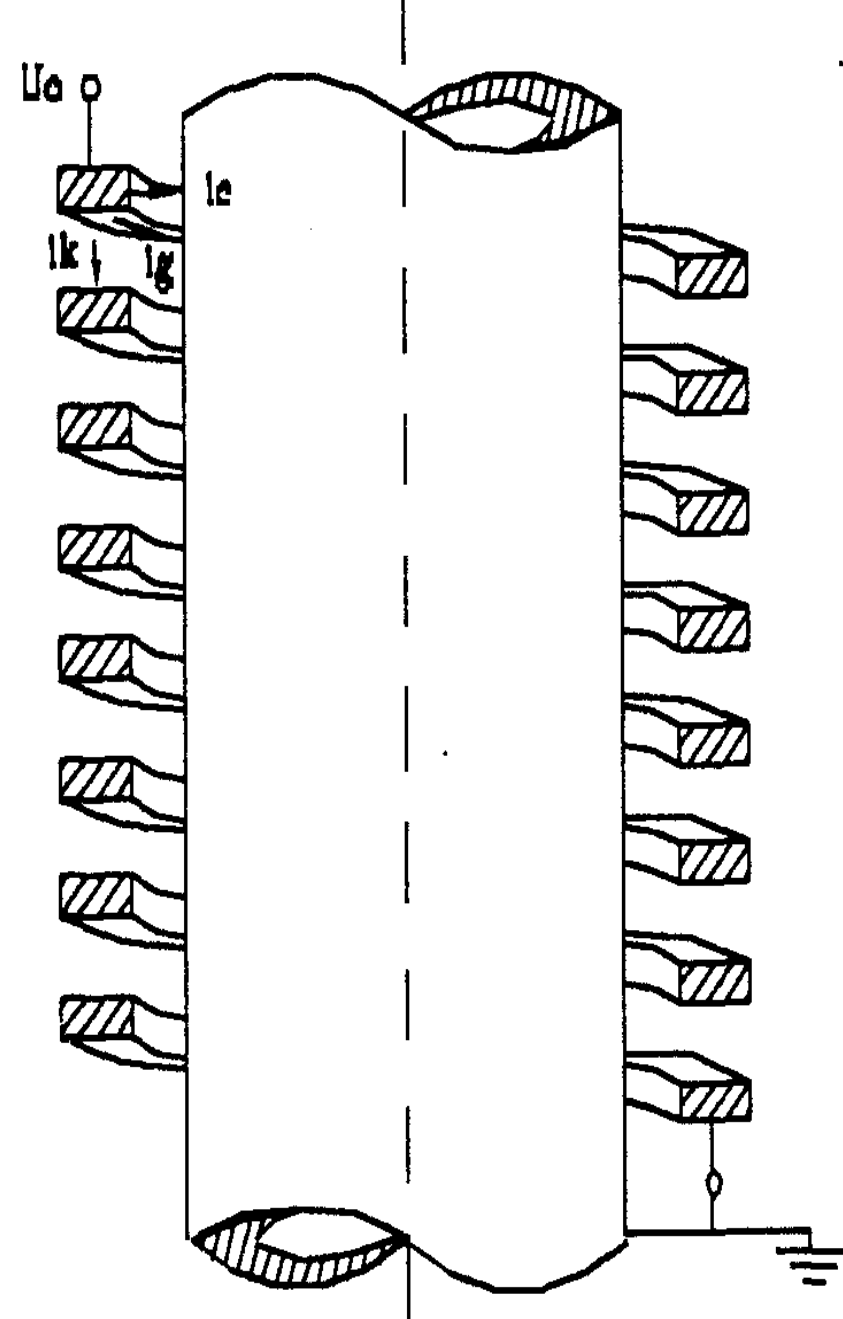
# 13. PRZEBIEGI FALOWE W UZWOJENIACH

## 13.1. UZWOJENIE SAMOTNE

Na rysunku 13.1 pokazano przekrój pojedynczego uzwojenia nawiniętego w formie spirali. Do jednego końca cewki jest doprowadzony удар napięciowy o dużej stromości narastania napięcia na czole udaru, a drugi koniec jest uziemiony. Dużą stromość narastania napięcia udarowego można zastępczo potraktować jako dużą częstotliwość napięcia przemiennego.

W uzwojeniu płyną trzy prądy (rys. 13.1):

1. prąd galwaniczny  $I_g$  płynący wzdłuż przewodu uzwojenia;
2. pojemnościowy prąd  $I_c$  płynący przez izolację do ziemi (do uziemionego rdzenia);
3. pojemnościowy prąd  $I_k$  płynący przez izolację międzyzwojową.

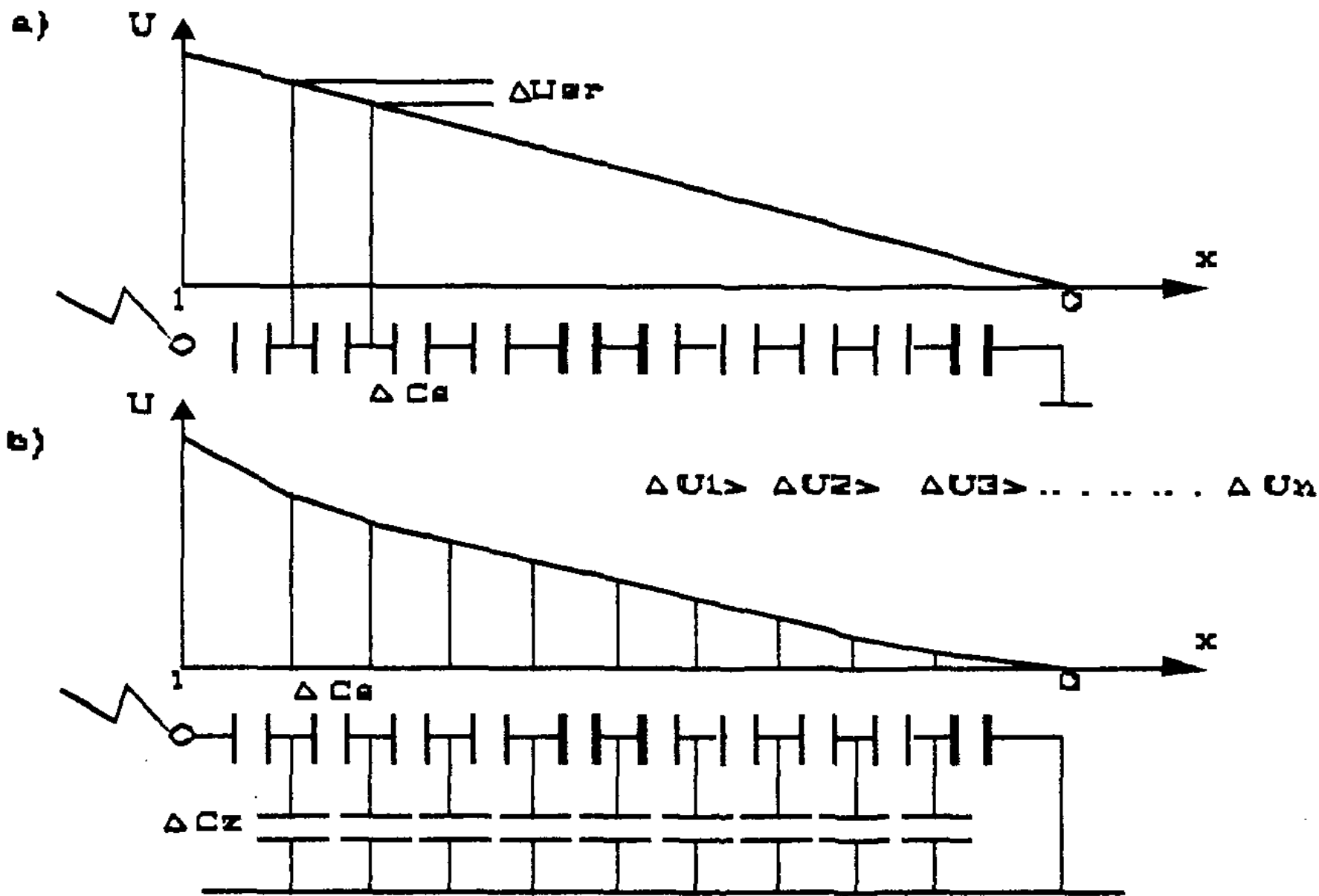


Rys. 13.1. Przekrój uzwojenia spiralnego

Prąd  $I_g$  płynący wzdłuż przewodu uzwojenia płynie po drodze o dużej indukcyjności natomiast indukcyjność na drodze pojemnościowych prądów  $I_c$  i  $I_k$  jest pomijalnie mała. Ze wzrostem częstotliwości (ze wzrostem stromości napięcia udarowego) impedancja na drodze prądu  $I_g$  rośnie natomiast na drodze prądów  $I_c$  oraz  $I_k$  maleje, czyli

$$f \uparrow I_g \downarrow I_c \uparrow I_k \uparrow$$

Przy bardzo dużej częstotliwości (np. przy rozpatrywaniu czoła udaru prostokątnego) można prąd galwaniczny  $I_g$  pominąć jako znikomy w porównaniu z prądami pojemnościowymi. Wówczas uzyska się schemat zastępczy uzwojenia jak na rysunku 3.20b. Zatem uzyskano sytuację taką jak gdyby przecięto uzwojenie wzdłuż wysokości i pozostał jedynie pojemnościowy rozplływ prądów. Uzwojenie zachowuje się jak układ pierścieni sprzężonych pojemnościowo. Jest to więc znany dobrze schemat z rozdziału 3.4, dla którego rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia dany jest wzorami 3.42÷3.44, gdzie odległość  $x$  jest teraz odległością od końca uzwojenia,  $K$  jest pojemnością wzdłużną uzwojenia, czyli pojemnością widzianą z zacisku wejściowego, w przypadku gdy wszystkie zwoje są porozcinane, natomiast  $C$  jest pojemnością doziemną uzwojenia.



Rys. 3.20. Rozkład napięcia na szeregowym połączeniu pojemności: a) w układzie bez pojemności pasozytniczych, b) z uwzględnieniem pasozytniczych pojemności doziemnych

Jeśli rozważyć uderzenie napięciowe prostokątne to schemat z rysunku 3.20 obowiązuje tylko dla czoła uderzenia gdy prądy indukcyjne są pomijalne stąd uzyskany pojemnościowy rozkład napięcia z rysunku 3.22 nosi teraz nazwę **rozkładu początkowego**. Z rozkładu tego wynika, że na pierwszym zwoju wystąpi najwyższe napięcie, które można oszacować jako

$$\Delta U_1 \approx \alpha \cdot \frac{U}{n} \quad (13.1)$$

gdzie  $n$  - liczba zwojów uzwojenia.

Jeśli nie zastosuje się środków zmierzających do uśrednienia (wyprostowania) rozkładu napięcia to zwykle wykładnik  $\alpha$  z wzoru (3.43) zawiera się w granicach  $5 \div 30$ .

Zatem wniosek z powyższych rozważań jest taki, że po nadejściu uderzenia napięciowego o dużej stromości czoła, na pierwszych zwojach uzwojenia (tzw. zwoje wejściowe przy zacisku liniowym) panują znacznie większe napięcia ( $\alpha$  razy większe) niż wynikałoby to z podzielenia napięcia na zacisku przez liczbę zwojów. Zwoje te muszą więc mieć odpowiednio silną izolację. Dla uzwojeń cewkowych dotyczy to również izolacji międzycewkowej, dla której

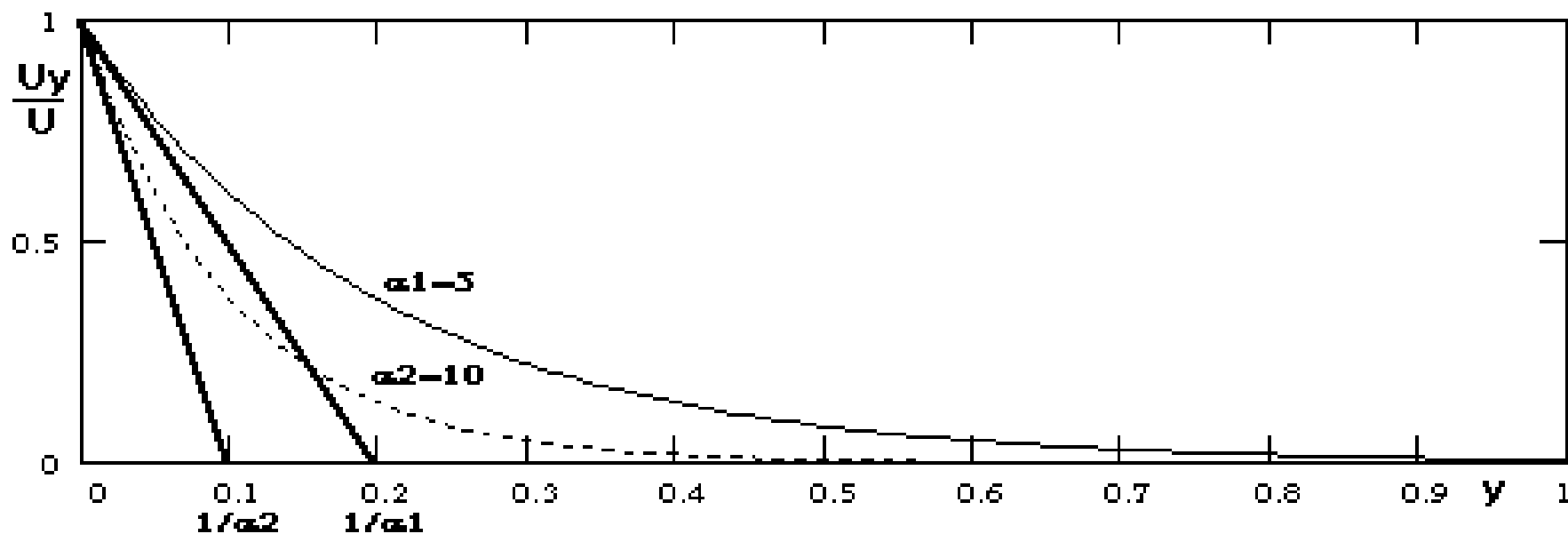
$$\Delta U_1 \approx \alpha \cdot \frac{U}{N} \quad (13.2)$$

gdzie  $N$  jest liczbą cewek uzwojenia.

Ogólnie można powiedzieć, że jeśli do uzwojenia dochodzi fala wędrowna o stromym czole, to w pierwszej chwili można pominąć indukcyjności i rozpatrywać uzwojenie jako łańcuch pojemności wzdlużnych i doziemnych. Zastępuje się w ten sposób uzwojenie tzw. pojemnością wejściową równą w przybliżeniu średniej geometrycznej z pojemności doziemnej i wzdlużnej

$$C_w \approx \sqrt{C \cdot K} \quad (13.3)$$

W uzwojeniu występuje wówczas, niekorzystny wykładniczy (rys. 3.22) rozkład napięcia, zwany rozkładem początkowym.



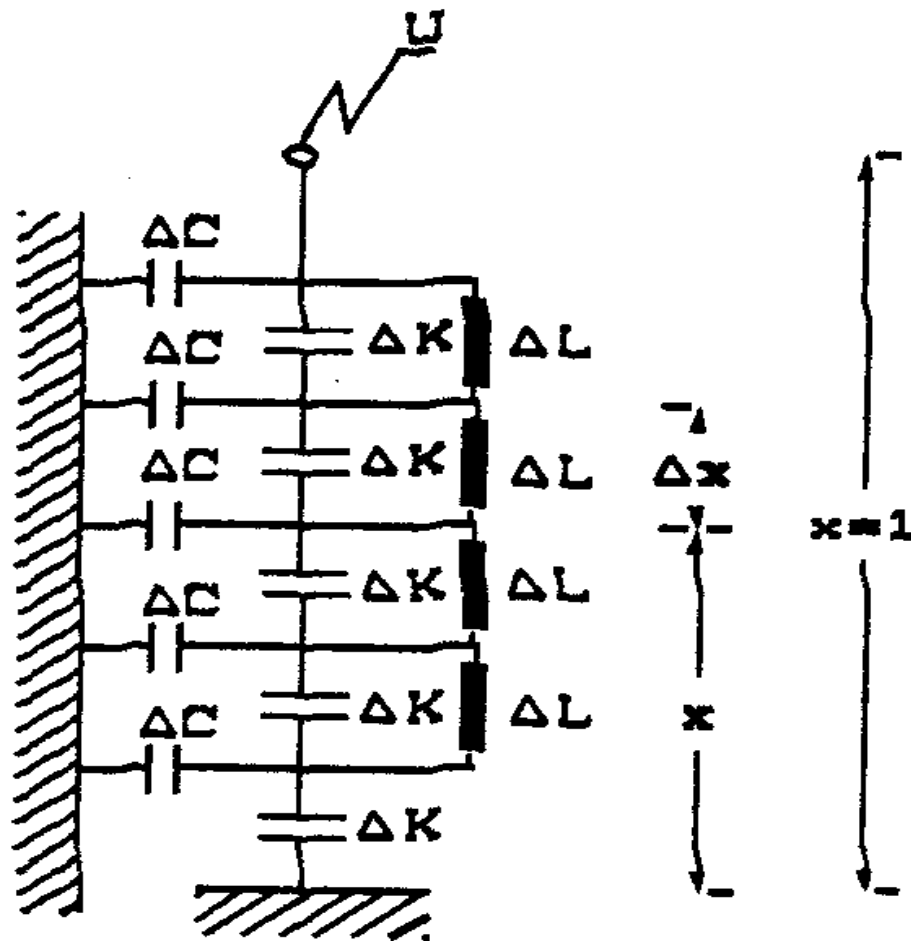
Rozkład ten można poprawić (wyprostować) za pomocą następujących zabiegów:

- zwiększając grubość i zmniejszając wysokość uzwojenia (maleje  $C$  i rośnie  $K$ , a więc maleje  $\alpha$ ); w nowoczesnych wysokonapięciowych transformatorach ten efekt uzyskuje się przez zasilanie w środku uzwojenia co daje dwukrotne pozorne zmniejszenie wysokości uzwojenia;
- stosując odpowiednie przeplecenia poszczególnych zwojów uzwojenia zmierzające do zwiększenia pojemności wzdłużnych  $K$ , a tym samym do malenia  $\alpha$ ;
- stosując ekranowanie elektrostatyczne, (rozdz. 3.4.3); we współczesnych rozwiązaniach jest to odpowiedni pierścień ekwipotencjalny o potencjale zacisku liniowego;
- stosując dołączanie pojemności dla modyfikacji wartości  $\alpha$ ;
- stosując rezystancyjne dzielniki oporowe, typu stos zmiennooporowy, połączone w wielu punktach z uzwojeniem i wymuszające liniowy rozkład napięcia w uzwojeniu.

Dwa ostatnie sposoby nie są stosowane zbyt często. We współczesnych transformatorach wysokonapięciowych uzyskuje się wartości  $\alpha$  bliskie 2. Możliwe jest uzyskanie rozkładu całkowicie liniowego, lecz jest to okupione takimi utrudnieniami technologicznymi (np. każda cewka uzwojenia musi być o innej liczbie zwojów i innej grubości izolacji), że jest nieopłacalne ze względów ekonomicznych.

## Rozkład

początkowy jest bardzo istotnym pojęciem, bo decyduje o wymiarowaniu izolacji wzdłużnej uzwojenia (izolacji międzyzwojowej czy międzycewkowej), obowiązuje jednak tylko dla czoła udaru. W późniejszych chwilach czasowych przy analizie przebiegów w uzwojeniu trzeba uwzględnić indukcyjności (rys. 13.2). Zatem schemat zastępczy uzwojenia składa się z obwodów drgających. W uzwojeniu występują więc drgania harmoniczne, których opis matematyczny jest stosunkowo skomplikowany.

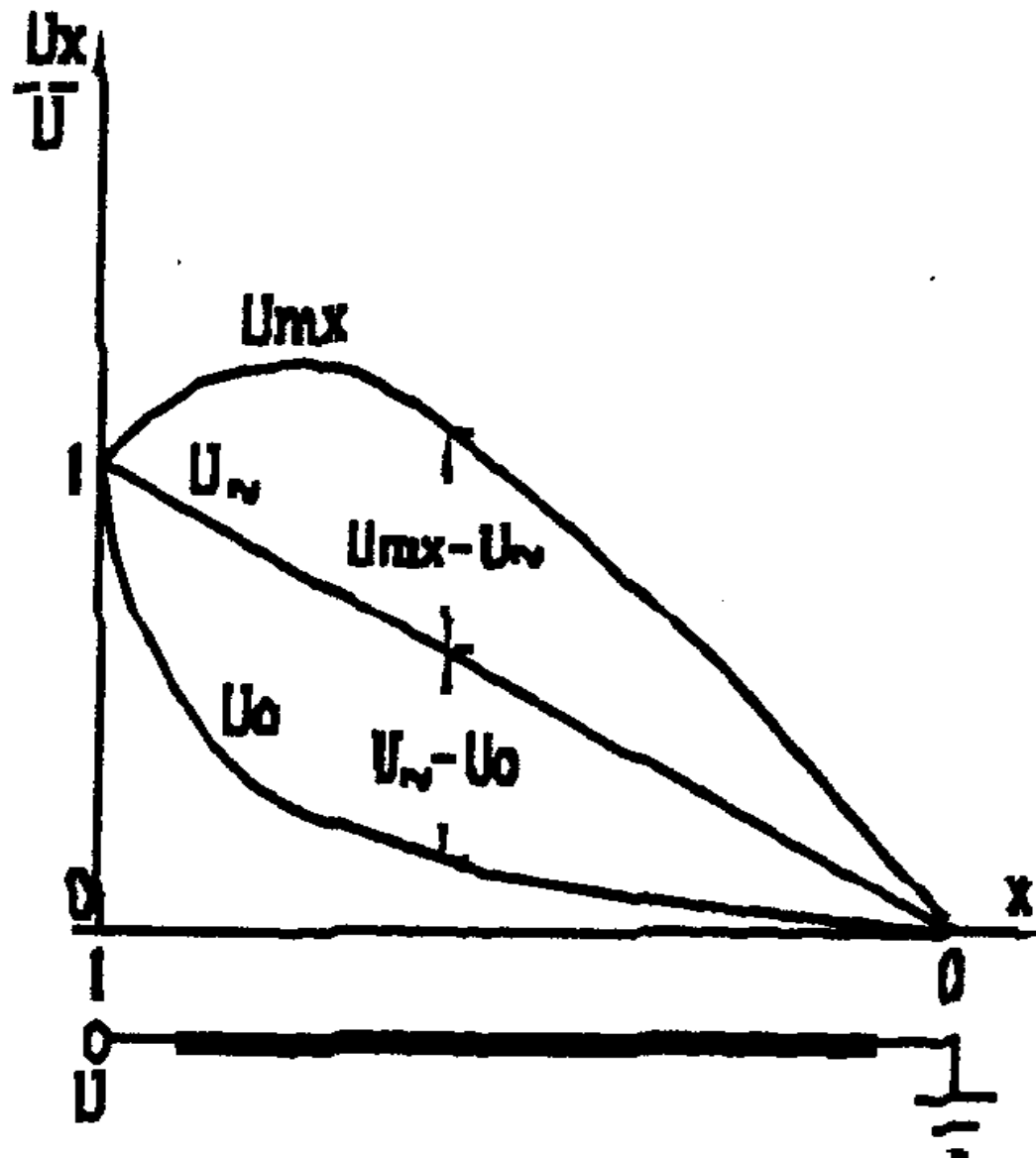


Rys. 13.2. Schemat zastępczy uzwojenia dla szybkich przebiegów napięciowych

Po

dostatecznie długim czasie drgania te wytłumiają się a w transformatorze ustala się stan końcowy uwarunkowany jedynie indukcyjnościami uzwojenia.

Indukcyjności są jednakowe dla każdego zwoju zatem i napięcie na każdym zwoju jest takie samo (rys. 13.3).



Rys. 13.3. Rozkład końcowy  $U_{\infty}$ , początkowy  $U_0$  i obwiednia przepięć  $U_{mx}$



Drgania przejściowe zachodzące w uzwojeniu stanowią proces wyrównawczy między stanem początkowym a końcowym. Maksymalne amplitudy tych drgań opisuje się za pomocą tzw. obwiedni drgań (krzywa  $U_{mx}$  na rys. 13.3). Najsilniej drga środek uzwojenia, a największe przepięcie jest na początku uzwojenia.

Pomiędzy rozkładem początkowym, końcowym i obwiednią drgań zachodzi następująca przybliżona zależność:

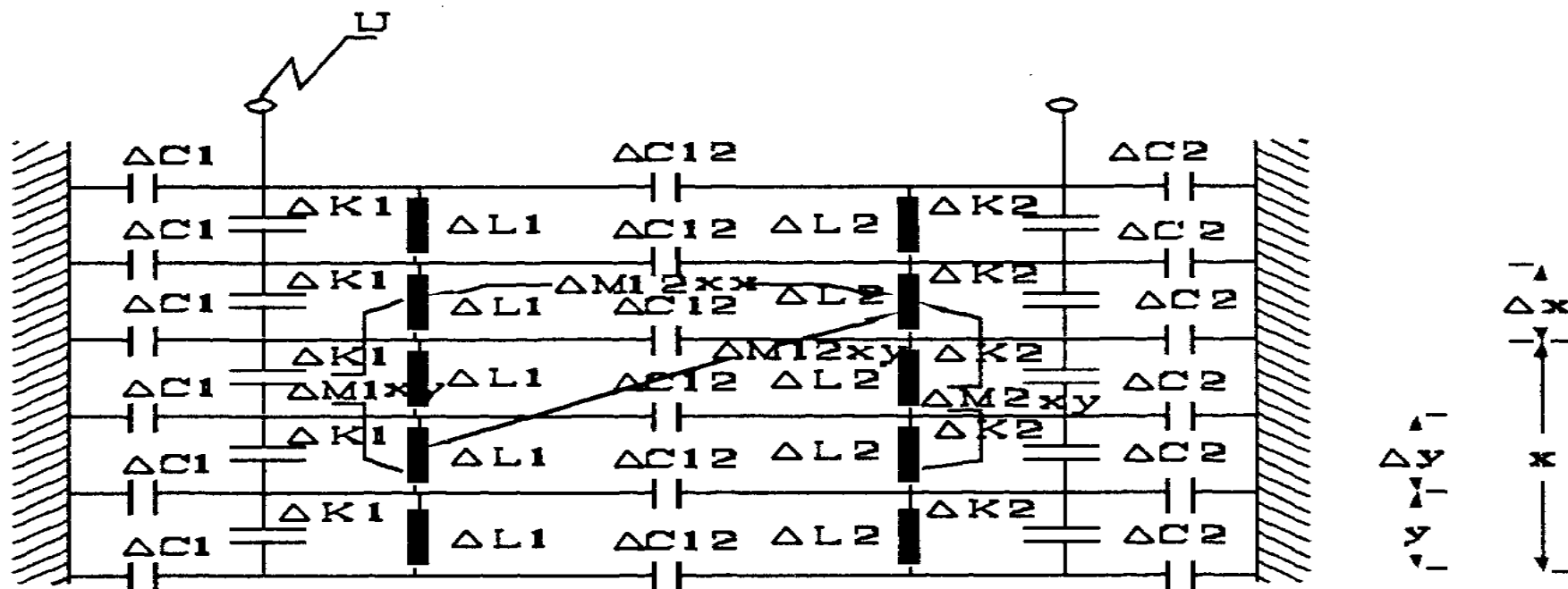
$$U_{\infty} - U_0 \approx U_{mx} - U_{\infty} \quad (13.4)$$

Zatem znając jeden z rozkładów  $U_{mx}$  lub  $U_0$  można przy znanym prostoliniowym rozkładzie  $U_{\infty}$  oszacować drugi. Najprościej jest obliczyć rozkład pojemnościowy  $U_0$ .

## 13.2. PRZENOSZENIE SIĘ FALI UDAROWEJ NA UZWOJENIE WTÓRNE

W transformatorach zawsze występują co najmniej dwa uzwojenia na jednej kolumnie rdzenia. Przy przebiegach udarowych nieliniowość rdzenia można pominąć wskutek ekranującego działania prądów wirowych indukowanych w blachach rdzenia przez szybkozmienny strumień magnetyczny.

Zatem zakładając, że występują dwa uzwojenia na wspólnej kolumnie rdzenia, schemat zastępczy będzie teraz miał postać jak na rysunku 13.4. Po doprowadzeniu do jednego z uzwojeń (uzwojenie pierwotne lub atakowane) fali prostokątnej w obu uzwojeniach pojawia się początkowy, pojemnościowy rozkład napięcia. Można go obliczyć na podstawie schematu z rysunku 13.4 przy pominięciu sprzężeń magnetycznych.



Rys. 13.4. Schemat zastępczy dwóch uzwojeń na wspólnym rdzeniu, dla udarów napięciowych o stromych czołach

W stanie równowagi ustali się w obu uzwojeniach rozkład końcowy określony wyłącznie przez sprzężenia magnetyczne a więc prostoliniowy.

Przejście od stanu początkowego do stanu końcowego odbywa się przez tłumione drgania w obu sprzężonych ze sobą uzwojeniach. Występują jednak teraz dwa rodzaje drgań:

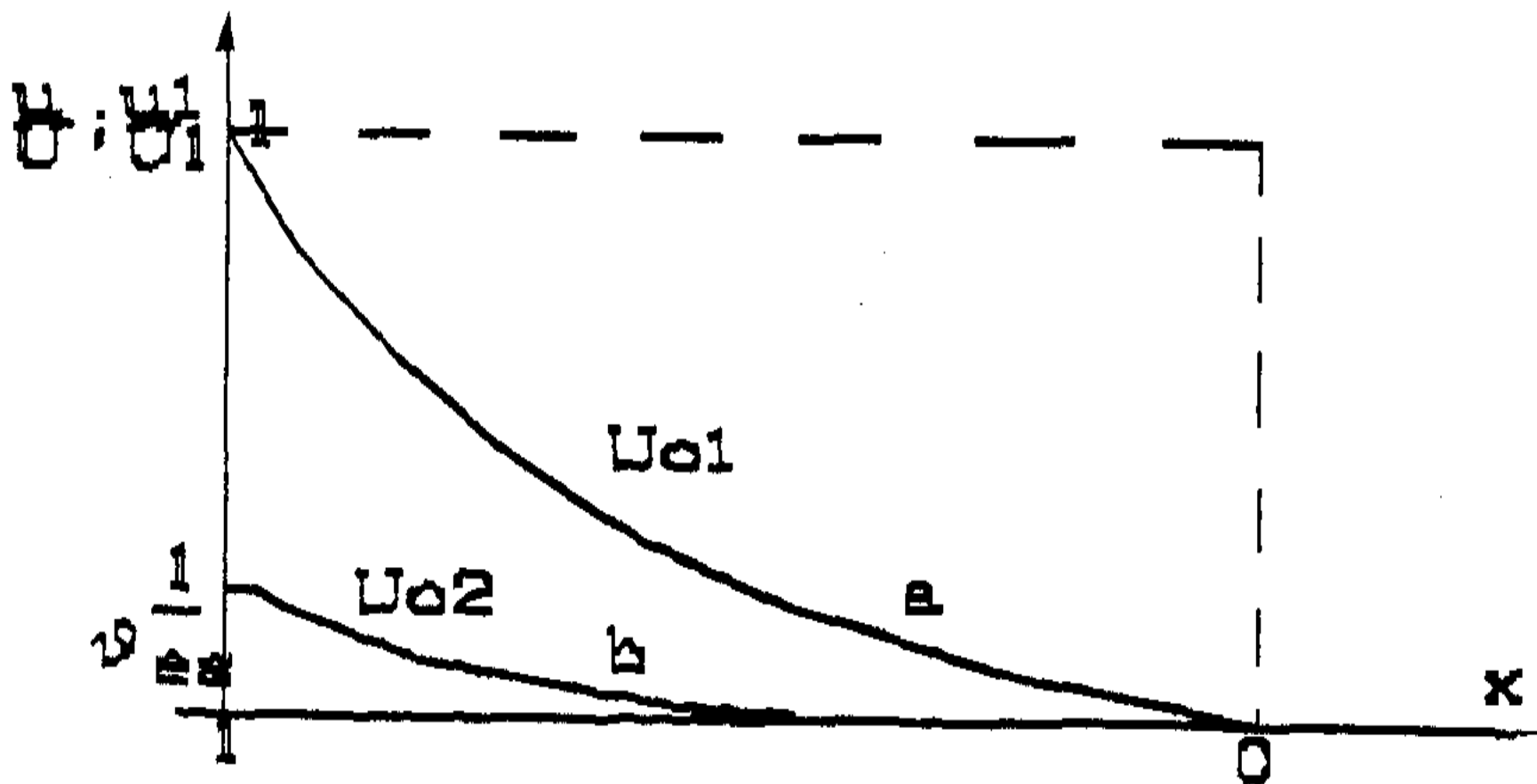
1. drgania własne każdego z uzwojeń analogicznie jak w uzwojeniu samotnym;
2. drgania wymuszone, które można interpretować jako przeniesione na drodze indukcyjnej drgania własne drugiego z uzwojeń.

Analiza matematyczna schematu pojemnościowego przy udarze prostokątnym  $U$  na zacisku uzwojenia pierwotnego prowadzi do wzoru na wartość napięcia w chwili początkowej  $t = 0$  na zacisku liniowym uzwojenia wtórnego ( $x = 1$ ):

$$(U_2)_{x=1,t=0} = \frac{C_{12} \cdot U}{C_{12} + C_2 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1} \cdot (C_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot C_{12} + C_2 \cdot C_{12})}} = \frac{U}{g_{es}} = U \cdot g'_{es} \quad (13.5)$$

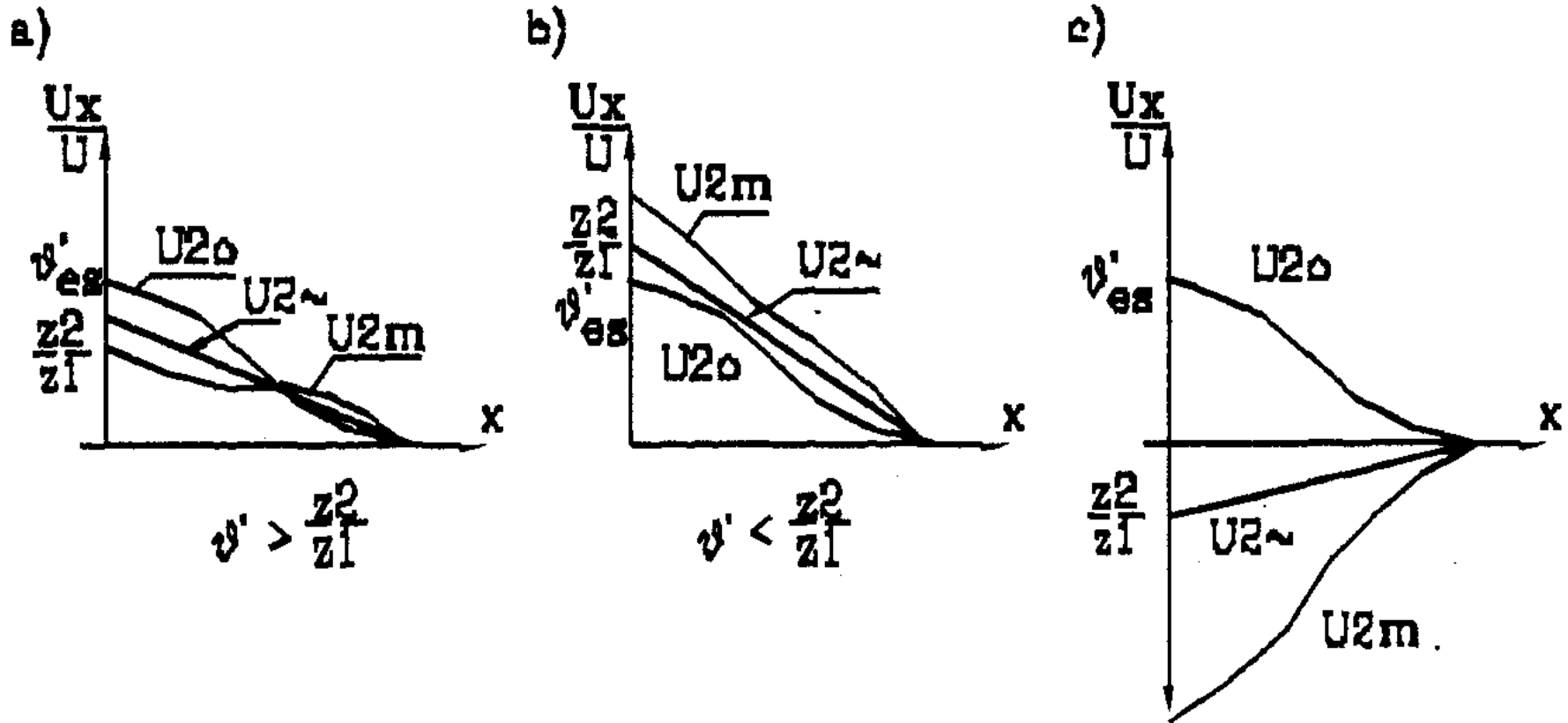
gdzie:  $u_{es}$  - tzw. przekładnia elektrostatyczna (pojemnościowa);  $u'_{es}$  - odwrotność przekładni elektrostatycznej; pozostałe oznaczenia jak na rysunku 13.4.

Na rysunku 13.5 pokazano przykładowo wykresy rozkładów początkowych w obu uzwojeniach.



Rys. 13.5. Rozkłady początkowe w uzwojeniu:  
a - atakowanym, b - wtórnym

Znając liniowy rozkład końcowy oraz rozkład początkowy (rys. 13.5) można, wykorzystując wzór 13.4, naszkicować przybliżoną obwiednię drgań dla uzwojenia nieatakowanego (wtórnego). Ilustruje to rysunek 13.6 opracowany dla uzwojenia wtórnego z jednym końcem uziemionym. Jak widać najmniej korzystnym jest przypadek gdy uzwojenia mają przeciwne kierunki nawinięcia - jest to przypadek możliwy do wystąpienia w uzwojeniach regulacyjnych.

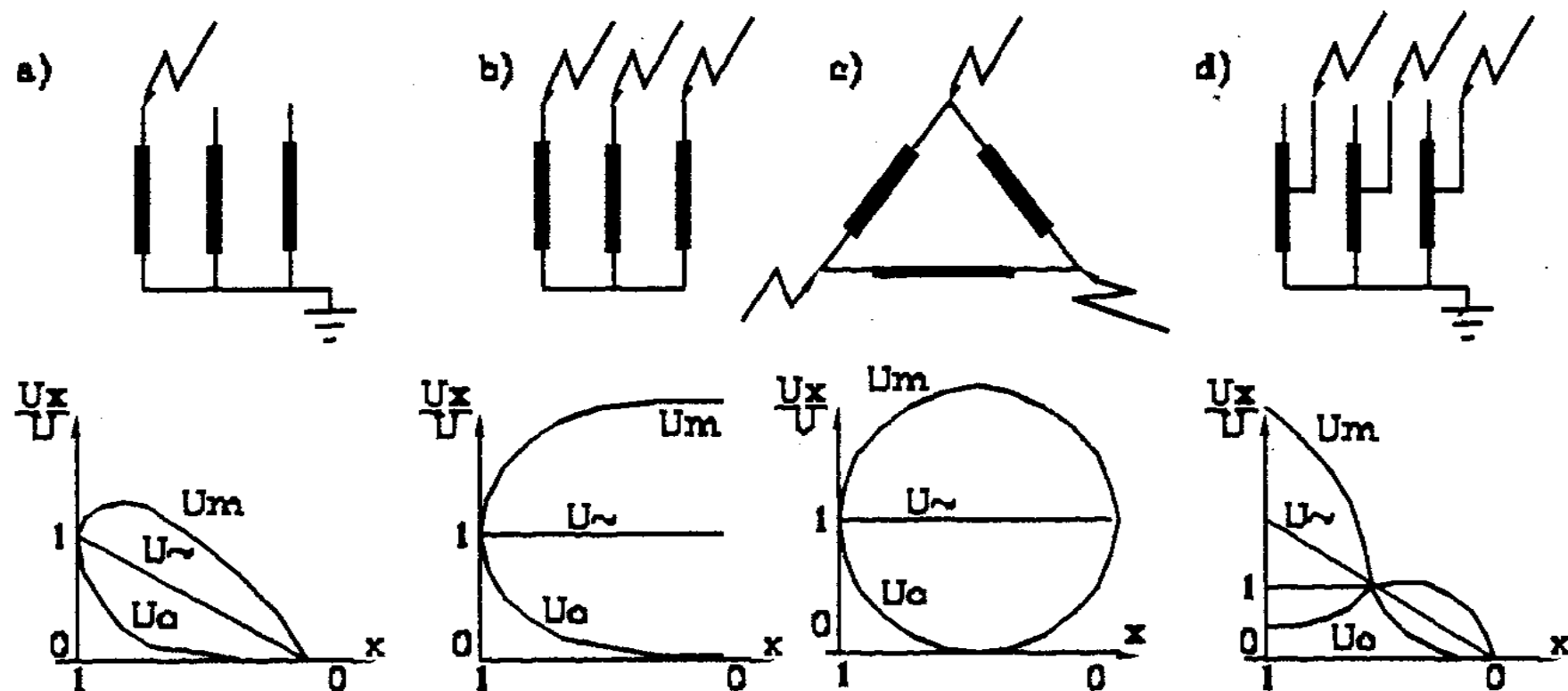


Rys. 13.6. Przypadki przenoszenia się przepięć na uzwojenie nieatakowane (wtórne):

a)  $v'_{es} > z_2/z_1$ , b)  $v'_{es} < z_2/z_1$ , c)  $-z_2/z_1$

### 13.3. TRANSFORMATORY TRÓJFAZOWE

Na rysunku 13.7 pokazano cztery układy połączeń uzwojeń trójfazowych oraz odpowiednie stylizowane wykresy rozkładów początkowych, końcowych i obwiedni przepięć dla przypadku gdy uzwojenia trójfazowe są atakowane jednakowymi udarami napięciowymi na wszystkich trzech zaciskach.



Rys. 13.7. Transformator trójfazowy atakowany jednakowymi udarami napięciowymi na wszystkich trzech zaciskach: a) połączenie gwiazdowe z uziemionym punktem gwiazdowym, b) połączenie gwiazdowe z izolowanym punktem gwiazdowym, c) połączenie w trójkąt, d) połączenie gwiazdowe, autotransformatorowe z uziemionym punktem gwiazdowym

W oparciu o wykresy z rysunku 13.7 można wyciągnąć następujące ogólne wnioski:

1. W transformatorze połączonym w gwiazdę z izolowanym punktem gwiazdowym (lub z włączonym w punkcie gwiazdowym dławikiem Petersena - patrz rozdz. 8.3.3) w punkcie gwiazdowym występują napięcia niemal dwukrotnie większe niż wartość szczytowa fali atakującej zaciski liniowe. Zatem jest konieczna albo odpowiednia izolacja punktu gwiazdowego albo zainstalowanie w punkcie gwiazdowym dodatkowego odgromnika zaworowego.
2. Uzwojenia połączone w trójkąt, ze względu na dwukrotny wzrost napięcia w środku uzwojenia, w ogóle nie nadają się do stosowania w transformatorach na bardzo wysokie napięcia. Mogą to być wówczas tylko uzwojenia nie dołączane bezpośrednio do linii napowietrznej - np. uzwojenia służące do zasilania obwodów potrzeb własnych elektrowni.
3. W przypadku autotransformatorów mogą zaistnieć dwa przypadki: gdy fala przepięciowa atakuje zaciski górnego napięcia, lub gdy atakuje zaciski dolnego napięcia. Przypadek pierwszy jest analogiczny do przypadku uzwojenia połączonego w gwiazdę z uziemionym punktem gwiazdowym (rys. 13.7a) w związku z czym nie został wyodrębniony. Przypadek drugi (rys. 13.7d) jest znacznie groźniejszy gdyż na zaciskach uzwojenia górnego napięcia może nastąpić wzrost przepięcia teoretycznie nawet do poczwórnej wartości szczytowej fali udarowej.