PORADNIK TECHNICZNY

Definicje

Transformator, to aparat elektryczny mający minimum 2 uzwojenia. Jego zadaniem jest zmiana parametrów przesyłanej energii elektrycznej prądu przemiennego z jednego napięcia na inne, o tej samej częstotliwości.

Transformator oddzielający, to transformator, w którym uzwojenia pierwotne i wtórne są oddzielone galwanicznie za pomocą izolacji podstawowej.

Transformator separacyjny, to transformator o ochronnym oddzieleniu uzwojeń pierwotnego i wtórnego.

Transformator bezpieczeństwa, to transformator separacyjny przeznaczony do zasilania obwodów bardzo niskim napięciem bezpiecznym - SELV (safetty extra-low voltage), lub bardzo niskim napięciem PELV (protective extra-low voltage).

Autotransformator, to transformator mający jedno uzwojenie, wspólne dla strony pierwotnej i wtórnej. Uzwojenia nie są od siebie galwanicznie oddzielone

ELV (extra low voltage), to każde **bardzo niskie napięcie**, nie przekraczające odpowiedniej wartości granicznej zakresu napięciowego I, z IEC 60449.

SELV (safety extra low voltage), to **bardzo niskie napięcie bezpieczne**, nie przekraczające 50 V prądu przemiennego A.C lub 120 V wygładzonego prądu stałego DC, mierzone między przewodami lub między dowolnym przewodem a ziemią, w obwodzie oddzielonym od źródeł zasilania za pomocą transformatora bezpieczeństwa, z poniższymi uwagami:

- w niektórych przypadkach może być wymagane napięcie niższe niż 50 V prądu AC lub niższe niż 120V wygładzonego prądu DC, gdy dopuszczalny jest bezpośredni kontakt z częściami czynnymi,
- graniczna wartość napięcia nie powinna być przekraczana w każdych warunkach obciążenia (od stanu pełnego obciążenia do stanu jałowego), jeżeli źródłem jest transformator bezpieczeństwa.
- **prąd stały wygładzony** (pozbawiony tętnień), to umownie określony prąd zawierający sinusoidalną składową prądu przemiennego o wartości skutecznej nie przekraczającej 10 % wartości składowej stałej prądu, jeżeli maksymalna wartość szczytowa napięcia nie przekracza 140 V - dla napięcia znamionowego 120 V wygładzonego prądu DC i analogicznie 70 V - dla napięcia znamionowego 60 V wygładzonego prądu DC.

Obwód SELV, to **obwód bardzo niskiego napięcia** (ELV) z ochronnym oddzieleniem od innych obwodów, nie mający części do uziemienia obwodu ani odkrytych elementów przewodzących .

Obwód PELV, to **obwód bardzo niskiego napięcia** (ELV) z ochronnym oddzieleniem od innych obwodów, dla spełniania swej funkcji mający części do uziemienia obwodu i (lub) odkryte elementy przewodzące.

Obwód FELV, to **obwód bardzo niskiego napięcia** (ELV), który dla prawidłowego funkcjonowania nie spełnia w pełni wymagań obwodów SELV i PELV.

Izolacja robocza, to izolacja części czynnej obwodu elektrycznego, niezbędna do zapewnienia należytej pracy urządzenia elektrycznego która jednocześnie zapewnia ochronę przeciwporażeniową.

Izolacja podstawowa, to izolacja części czynnej będącej pod napięciem niebezpiecznym, stosowana w celu zapewnienia ochrony przed porażeniem elektrycznym.

Izolacja dodatkowa, to niezależna izolacja zastosowana dodatkowo jako uzupełnienie izolacji podstawowej w celu zapewnienia ochrony w przypadku uszkodzenia izolacji podstawowej.

Izolacja podwójna, to izolacja składająca się z izolacji podstawowej oraz izolacji dodatkowej.

Izolacja wzmocniona, to układ izolacyjny części czynnych o napięciu niebezpiecznym, zapewniający stopień ochrony przed porażeniem równoważny izolacji podwójnej.

Transformator klasy I, chroni przed porażeniem elektrycznym nie tylko za pośrednictwem izolacji podstawowej, ale także przez zastosowany zacisk uziemienia, stanowiący dodatkowy element ochronny. Dzięki temu nawet w przypadku uszkodzenia izolacji podstawowej kontakt z dostępnymi częściami przewodzącymi nie będzie niebezpieczny dla życia.

Transformator klasy II, chroni przed porażeniem elektrycznym nie tylko za pośrednictwem izolacji podstawowej, ale także przez zastosowanie izolacji podwójnej lub wzmocnionej , stanowiących dodatkowy element ochronny.

Transformator klasy III, chroni przed porażeniem elektrycznym dzięki zasilaniu bardzo niskim napięciem bezpiecznym (SELV) i który nie wytwarza napięć wyższych od (SELV - 50 V AC). Transformator klasy III nie może być wyposażony w zacisk uziemienia.
Uwaga: Klasyfikacja I, II lub III nie odnosi się do systemu izolacji między uzwojeniami pierwotnymi a wtórnymi.

Oddzielenie ochronne, to oddzielenie obwodów za pomocą ochrony podstawowej i dodatkowej.
(Przez zastosowanie w tym celu izolacji podstawowej oraz izolacji dodatkowej albo ekranowania ochronnego. Może być zastosowany równoważny środek ochronny np.: izolacja wzmocniona).

Ekran ochronny (elektryczny), to przewodzący ekran, stosowany do oddzielenia obwodu elektrycznego i (lub) przewodów od części czynnych niebezpiecznych.

Ekranowanie ochronne (elektryczne), to oddzielenie obwodów elektrycznych i (lub) przewodów od części czynnych niebezpiecznych za pomocą umieszczonego między nimi ekranu ochronnego połączonego z zewnętrznym przewodem ochronnym.

Obudowa, to część transformatora zapewniająca jego ochronę przed wpływami czynników zewnętrznych oraz przed bezpośrednim dotknięciem z każdego kierunku.

Układ połączeń transformatora,
Układy połączeń uzwojeń w transformatorach trójfazowych są oznaczane symbolem połączeń tego układu. Symbol składa się z liter i cyfr. Symbol literowy określa sposób połączeń uzwojeń:
- duże litery **Y**- gwiazda ; **D** – trójkąt - dla napięć górnych
- małe litery **y**- gwiazda ; **d** – trójkąt ; **z** – zygzak - dla napięć dolnych
- litera **N** - oznacza wyprowadzenie zacisku neutralnego górnego napięcia na listwę zaciskową
- litera **n** - oznacza wyprowadzenie zacisku neutralnego dolnego napięcia na listwę zaciskową

Symbol cyfrowy określa wzajemne przesunięcie wskazu napięcia wyjściowego (np. 2U) w stosunku do napięcia wejściowego (1U). Przesunięcie fazowe wyrażone jest w godzinach od 0 do 11, zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Np.; układ połączeń Dy5 oznacza przesunięcie fazowe napięcia 2U w stosunku do napięcia 1U o 5 godzin. Jedna godzina jest równa przesunięciu o 30 stopni elektrycznych.

Napięcie zwarcia transformatora, jest to napięcie które należy przyłożyć do uzwojenia pierwotnego, aby w zwartym uzwojeniu wtórnym wywołać prąd równy znamionowemu prądowi wtórnemu.
Napięcie zwarcia zwykle wyraża się w procentach znamionowego napięcia zasilania.
Zwykle napięcie zwarcia ma wartość kilku (2 – 4 %) lub kilkunastu (10 – 20 %) procent w zależności od konstrukcji uzwojeń. Uzyskanie innych napięć zwarcia jest możliwe przy wykonaniach specjalnych.

Stopień ochrony IP (International Protection, określony wg. IEC 60529), wyznaczany w kilkustopniowej skali, określający stopień zabezpieczenia przed przedostawaniem się do wnętrza obudowy ciał stałych oraz wody. Kod opisujący stopień ochrony składa się z dwóch cyfr. **Pierwsza cyfra** kodu IP określa, stopień ochrony urządzenia przed dostaniem się do wnętrza obudowy ciał stałych a także stopień ochrony użytkownika przed bezpośrednim kontaktem z elementami urządzenia będącymi pod napięciem. **Druga cyfra** kodu IP określa, stopień ochrony urządzenia przed dostaniem się do wnętrza obudowy wody. **Dodatkowa litera** wskazuje na stopień ochrony użytkownika przed bezpośrednim kontaktem z elementami będącymi pod napięciem.

Rodzaje pracy, rozróżnia się następujące rodzaje pracy :
- **praca ciągła – (S1)**, to praca w nieograniczonym okresie, bez przerw,
- **praca krótkotrwała – (S2)**, to praca w określonym czasie, rozpoczynana od stanu zimnego transformatora, przy czym przerwy między okresami pracy są wystarczająco długie do ochłodzenia transformatora do temperatury bliskiej temperaturze otoczenia.
- **praca przerywana – (S3)**, to praca wykonywana kolejno w określonych, jednakowych cyklach następujących po sobie, gdzie okresy pracy są oddzielone jednakowymi okresami przerw.

Klasa izolacji, jest to określony literowo rodzaj zastosowanego materiału izolacyjnego, informujący o maksymalnej temperaturze pracy transformatora. Jej przekroczenie przy pracy ciągłej skraca żywotność oraz czas bezawaryjnej pracy transformatora.

Chłodzenie, rodzaj chłodzenia, określony jest kodem literowym w zależności od czynnika chłodzącego i sposobu jego obiegu. Wg normy EN 60076 sposób chłodzenia oznacza się za pomocą symbolu składającego się z czterech liter, a w przypadku transformatorów suchych bez obudowy lub z obudową przewietrzaną – z dwóch liter. Pierwsza litera oznacza czynnik chłodzący uzwojenia, druga – sposób wprawiania w ruch czynnika chłodzącego uzwojenia, trzecia – zewnętrzny czynnik chłodzący, czwarta – sposób wprawiania w ruch zewnętrznego czynnika chłodzącego.

Wykonanie klimatyczne, w zależności od strefy klimatycznej w której będzie pracował wyrób, powinny być użyte odpowiednie materiały do jego wykonania. Ta informacja może być zawarta na tabliczce znamionowej w postaci symbolu literowo-cyfrowego, zawartego w określonej normie.

Symbole i oznaczenia

Symbol i oznaczenie	Norma	Objaśnienie
V	EN 61558-1	Wolt
A	EN 61558-1	Amper
VA	EN 61558-1	Woltamper
W	EN 61558-1	Wat
Hz	EN 61558-1	Herc
PRI	EN 61558-1	uzwojenie pierwotne
SEC	EN 61558-1	uzwojenie wtórne
⎓	EN 61558-1	prąd stały
N	EN 61558-1	zacisk zerowy
∿	EN 61558-1	prąd przemienny jednofazowy
3 ∿	EN 61558-1	prąd przemienny trójfazowy
3/N ∿	EN 61558-1	prąd przemienny trójfazowy z przewodem zerowym
⧈	EN 61558-1	konstrukcja klasy II
III	EN 61558-1	konstrukcja klasy III
⊟	EN 61558-1	wkładka topikowa

	EN 61558-1	wkładka topikowa zwłoczna
	EN 61558-1	zacisk osłony lub rdzenia
	EN 61558-1	zacisk ochronny (ziemia)
F	EN 61558-2-2	transformator sterowniczy bezpieczny w przypadku uszkodzenia
	EN 61558-2-2	transformator sterowniczy nieodporny na zwarcie
	EN 61558-2-2	transformator sterowniczy odporny na zwarcie (warunkowo lub bezwarunkowo)
F	EN 61558-2-1	transformator oddzielający bezpieczny w przypadku uszkodzenia
	EN 61558-2-1	transformator oddzielający nieodporny na zwarcie
	EN 61558-2-1	transformator oddzielający odporny na zwarcie (warunkowo lub bezwarunkowo)
F	EN 61558-2-4	transformator separacyjny bezpieczny w przypadku uszkodzenia
	EN 61558-2-4	transformator separacyjny nieodporny na zwarcie
	EN 61558-2-4	transformator separacyjny odporny na zwarcie (warunkowo lub bezwarunkowo)
	EN 61558-2-6	transformator bezpieczeństwa
F	EN 61558-2-6	transformator bezpieczeństwa bezpieczny w przypadku uszkodzenia
	EN 61558-2-6	transformator bezpieczeństwa nieodporny na zwarcie
	EN 61558-2-6	transformator bezpieczeństwa odporny na zwarcie (warunkowo lub bezwarunkowo)
	EN 61558-2-19	transformator separacyjny tłumiący zakłócenia nieodporny na zwarcie

	EN 61558-2-19	transformator bezpieczeństwa tłumiący zakłócenia odporny na zwarcie
F	EN 61558-2-13	autotransformator bezpieczny w przypadku uszkodzenia
	EN 61558-2-13	autotransformator nieodporny na zwarcie
	EN 61558-2-13	autotransformator odporny na zwarcie (warunkowo lub bezwarunkowo)
	EN 61558-2-20	dławik bez zabezpieczenia przeciwprzeciążeniowego
	EN 61558-2-20	dławik z zabezpieczeniem przeciwprzeciążeniowym
+	EN 61558-2-15	transformator separacyjny nieodporny na zwarcie do zasilania pomieszczeń medycznych

Normy i certyfikacja

Urządzenia elektryczne powinny spełniać wymagania odpowiednich norm międzynarodowych i krajowych, Norma jest dokumentem określającym wytyczne dotyczące konstrukcji, opisu i sprawdzenia danego produktu.
Transformatory suche powinny być produkowane w oparciu o wymagania norm:
- międzynarodowych – IEC60726 ; IEC60076 ; IEC61558
- europejskich – EN60726 ; EN60076 ; EN61558
- innych krajów np.: – rosyjskich – GOST

Dławiki powinny być produkowane w oparciu o wymagania norm:
- międzynarodowych – IEC60726 ; IEC60076 ; IEC61558
- europejskich – EN60289 ; EN60938 ; EN61558
- innych krajów np.: – rosyjskich – GOST

W zależności od przeznaczenia urządzenie powinno także spełniać wymagania przepisów odpowiednich, branżowych towarzystw klasyfikacyjnych i posiadać ich certyfikat, a spełnienie wymagań odpowiedniego certyfikatu powinno być zaznaczone na urządzeniu.

Na potrzeby przemysłu stoczniowego urządzenia podlegają nadzorowi i certyfikacji n/w towarzystw klasyfikacyjnych:

- ABS – American Bureau of Shipping - USA
- BV – Bureau Veritas - Francja
- CCS – China Classification Society - Chiny
- DNV – Det Norske Veritas - Norwegia
- GL – Germanischer Lloyd - Niemcy
- LR – Lloyds Register of Shipping - Wielka Brytania
- NKK – Nippon Kaiji Kyokai - Japonia
- RINA – Registro Italiano Navale - Włochy
- PRS – Polski Rejestr Statków - Polska
- RS – Russian Maritime Register of Shipping - Rosja

Na potrzeby wojska urządzenia powinny spełniać wymagania Wojskowej Instytucji Narodowej ds. Zapewnienia Jakości i posiadać:

- certyfikat AQAP – wydawany przez Wojskową Instytucję Narodową kraju należącego do NATO
  firma ELHAND posiada taki certyfikat nr AQAP 2120:2006 – nr 644/A/2008
- kod NCAGE – Natowski Kod Podmiotu Gospodarki Narodowej wydany przez Wojskowe Centrum Normalizacji i Kodyfikacji – Oddział Kodyfikacji Wyrobów Obronnych
  firma ELHAND otrzymała taki kod nr 1394/H/2007

Na potrzeby górnictwa urządzenia powinny posiadać atesty dopuszczające do zastosowań górniczych, wydawane przez odpowiednie laboratorium testujące lub Organ Certyfikujący danego kraju.

Znak CE i dyrektywy EU

CE **– znak dotyczący bezpieczeństwa i zdrowia użytkowników urządzeń oraz wpływu na środowisko,** wprowadzony został przez dyrektywy Parlamentu Europejskiego. Umieszczenie znaku na produkcie gwarantuje, że produkt został wykonany i sprawdzony zgodnie z wymogami odnośnych przepisów.
Oznacza to, że produkt jest bezpieczny i może być sprzedawany na rynku krajów Unii Europejskiej.
Odpowiedzialność za produkt, ponosi producent, a także jego dystrybutor lub sprzedawca.
Znak CE nie świadczy o jakości produktu.
Zagadnienie bezpieczeństwa produktu regulują dyrektywy Parlamentu Europejskiego:

Dyrektywa - MD - **maszynowa nr 2006/42/WE**
dotycząca kompletnych urządzeń.

Dyrektywa - EMC - **o kompatybilności elektromagnetycznej nr 2004/108/WE**
dotycząca urządzeń które mogą generować zakłócenia elektromagnetyczne i być na nie podatne.
Nie dotyczy urządzeń, które mogą generować zakłócenia w stanach nieustalonych.

Dyrektywa - LVD - **niskonapięciowa nr 2006/95/WE**
opisująca wymagania dotyczące sprzętu elektrycznego pracującego w zakresach napięć:
- przemiennego od 50 do 1000 V
- stałego od 75 do 1500 V

Produkt wykonany zgodnie z wymogami w/w dyrektyw powinien :

- być oznakowany znakiem zgodności - CE

- posiadać deklarację zgodności - WE

Tabliczka znamionowa i kontrola techniczna transformatora

W trakcie i na koniec produkcji każdego wyrobu w naszej firmie wykonujemy pomiary kontrolne.
Zakres badań określa norma według której wyrób został zaprojektowany i wykonany.
Wyniki pomiarów zawarte są protokole kontrolnym i umieszczonej na wyrobie tabliczce znamionowej.
Tabliczka znamionowa transformatora powinna zawierać podstawowe dane o transformatorze i jego wytwórcy:

- dane producenta,
- normę w/g której transformator jest wykonany,
- typ,
- numer fabryczny i rok produkcji,
- moc znamionową,
- napięcie i prąd znamionowy,
- grupę połączeń,
- częstotliwość znamionową,
- klasę izolacji i temperaturę otoczenia,
- rodzaj pracy (w przypadku braku oznaczenia urządzenie jest przystosowane do pracy ciągłej S1)
- rodzaj chłodzenia,
- stopień ochrony,
- napięcie zwarcia,
- masę całkowitą,
- symbol audytora i numer certyfikatu towarzystwa klasyfikacyjnego dokonującego odbioru,

Na życzenie odbiorcy na tabliczce można umieścić dodatkowe informacje o produkcie.

Przykład tabliczki znamionowej (z odbiorem i przepisami DNV):

elhand TRANSFORMATORY

ul. Klonowa 60 Tel. +48 (34) 3473 100
PL, 42-700 LUBLINIEC Fax +48 (34) 3470 207
www.elhand.pl e-mail: info@elhand.pl

Transformator	3-FAZ	wg	PN-EN 60726:2003 + DNV			
Typ	ET3SM-150			Nr/Rok	00565 / 2015	
Moc	150	kVA		Grupa poł.	Dy5	
I	3x440	V	D		198	A
II	3x230	V	y		377	A
Częstotliwość	60	Hz		Klasa izolacji	T45H	
Straty jałowe	445	W		Praca	S1	
Straty zwarcia	2824	W		Chłodzenie	AN	
Temp. otoczenia	45	°C		St. ochrony	IP23	
Uk	3,30	%		Masa całkowita	579	kg

KAT 09-125 Made in Poland

Układy połączeń transformatorów

Układy połączeń uzwojeń w transformatorach trójfazowych są oznaczane symbolem połączeń tego układu. Symbol składa się z liter i cyfr.
Symbol literowy określa sposób połączeń uzwojeń:
- duże litery **Y** – gwiazda ; **D** – trójkąt - dla napięć pierwotnych
- małe litery **y** – gwiazda ; **d** – trójkąt ; **z** – zygzak - dla napięć wtórnych
- litera **N** – oznacza wyprowadzenie zacisku neutralnego uzwojenia pierwotnego na listwę zaciskową
- litera **n** – oznacza wyprowadzenie zacisku neutralnego uzwojenia wtórnego na listwę zaciskową

Symbol cyfrowy określa wzajemne przesunięcie wskazu napięcia wyjściowego (np. 2U) w stosunku do wskazu napięcia wejściowego (1U). Przesunięcie fazowe wyrażone jest w godzinach od 0 do 11, zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Np.; układ połączeń Dy5 oznacza przesunięcie fazowe napięcia 2U w stosunku do napięcia 1U o 5 godzin. Jedna godzina jest równa przesunięciu o 30 stopni elektrycznych.

Wybór grupy połączeń uzwojeń w transformatorach trójfazowych
W praktyce najczęściej spotykamy się z następującymi układami połączeń: **Yy, Dy, Yd, Yz** oraz **Dz**. Dodatkowo uzwojenia połączone w gwiazdę i zygzak posiadają punkt zerowy, który może być wyprowadzony bądź utajniony. Prawidłowy wybór układu połączeń transformatorów trójfazowych uzależniony jest od kilku czynników:

- układu zasilającego transformator:
  - transformator zasilany z sieci (trójprzewodowej, czteroprzewodowej)
  - transformator zasilany z przekształtnika
- mocy transformatora
- poziomu napięć
- niesymetrii obciążenia
  - niesymetria obciążenia przy zasilaniu symetrycznym układem napięć
  - niesymetria obciążenia wynikająca z niesymetrycznego układu napięć zasilających
- względów ekonomicznych (koszt budowy transformatora o różnych układach połączeń)

1. Układ Yy połączeń uzwojeń stosuje się głównie w transformatorach o małych mocach znamionowych zasilających symetryczne odbiory trójfazowe. Czasami połączenie to stosuje się do układów o dużych mocach znamionowych, w których zachodzi potrzeba uziemienia punktów zerowych połączeń gwiazdowych. Układ ten jest niekorzystny ze względu na konieczność ograniczania szkodliwego wpływu braku harmonicznych rzędu v=3n (n=1,3,7…) w prądzie jałowym przy zasilaniu z sieci trójprzewodowej. Układ ten jest niekorzystny również przy obciążeniu niesymetrycznym (prądy składowej zerowej), gdy wyprowadzony jest punkt zerowy połączenia w gwiazdę uzwojeń wtórnych. Stwarza to konieczność wprowadzenia dodatkowego uzwojenia, tzw. kompensacyjnego, połączonego w trójkąt.

2. Układ Dy połączeń uzwojeń stosuje się głównie w transformatorach obniżających napięcie, z reguły o większych mocach znamionowych. Transformatory z takimi układami połączeń uzwojeń pracują w układach zasilania sieci rozdzielczych niskiego napięcia i mają zwykle wyprowadzony punkt zerowy połączenia gwiazdowego, by można było korzystać z napięć międzyprzewodowych i fazowych. Połączenie to jest bardzo korzystne ze względu na zmniejszenie strumieni trzecich harmonicznych oraz prądów składowej zerowej przy obciążeniu niesymetrycznym.

3. Układ Yd połączeń uzwojeń stosuje się głównie w transformatorach podwyższających napięcie. Transformator z takim układem połączeń jest korzystny, gdy punkt zerowy połączenia w gwiazdę strony pierwotnej ma być uziemiony bezpośrednio lub przez dławik. Połączenie uzwojeń w trójkąt po stronie pierwotnej lub wtórnej jest ze względu na prąd magnesujący bardzo korzystne, gdyż prąd trzeciej

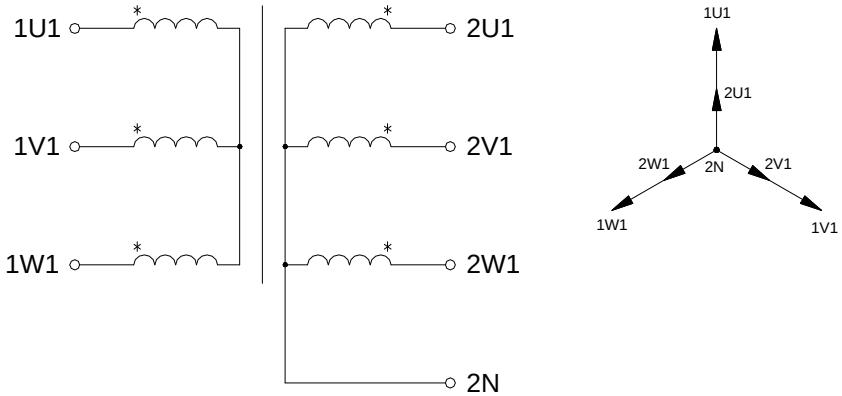
harmonicznej płynie w zwartym obwodzie trójkąta i strumień trzeciej harmonicznej praktycznie nie pojawia się.

4. Układ Yz oraz **Dz** połączeń uzwojeń stosuje się w transformatorach obniżających napięcie o małych mocach znamionowych. W układach tych punkt zerowy połączenia uzwojeń w zygzak jest wyprowadzony, aby można było korzystać z napięć fazowych. Rozwiązanie takie stosowane jest rzadko, głównie ze względów ekonomicznych. Porównując np. gwiazdę z zygzakiem, przy tych samych prądach znamionowych oraz takich samych przekrojach przewodów, dochodzimy do wniosku, że liczba zwojów zygzaka przy tym samym napięciu międzyprzewodowym jest $2/\sqrt{3}$ razy większa od liczby zwojów gwiazdy, a zatem koszt miedzi w zygzaku jest o ponad 15% większy niż przy gwieździe. Dlatego zastosowanie tych układów połączeń ogranicza się przede wszystkim do zasilania odbiorów niesymetrycznych (np. przy znaczącym udziale odbiorów jednofazowych), a zależy nam na symetrycznym rozkładzie napięć fazowych po stronie wtórnej transformatora.

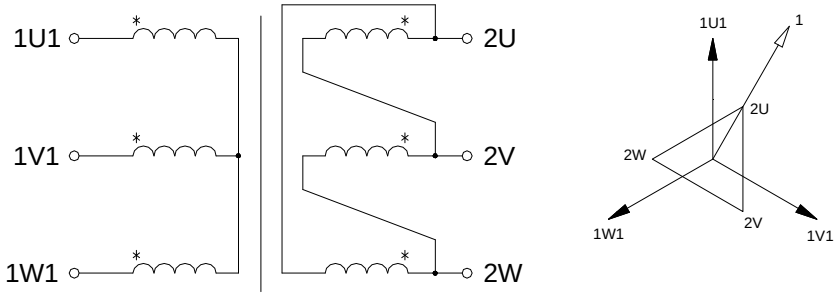
Prawidłowy wybór grupy połączeń ma bardzo duży wpływ na prawidłową pracę transformatora. Powyżej przedstawiono tylko podstawowe właściwości i cechy poszczególnych układów połączeń. Często zachodzi potrzeba głębszej analizy całego układu pod względem współpracy transformatora z układami przekształtnikowymi, niesymetrycznym obciążeniem lub zasilaniem.

Najczęściej stosowane układy połączeń transformatorów 3-fazowych, dwuuzwojeniowych

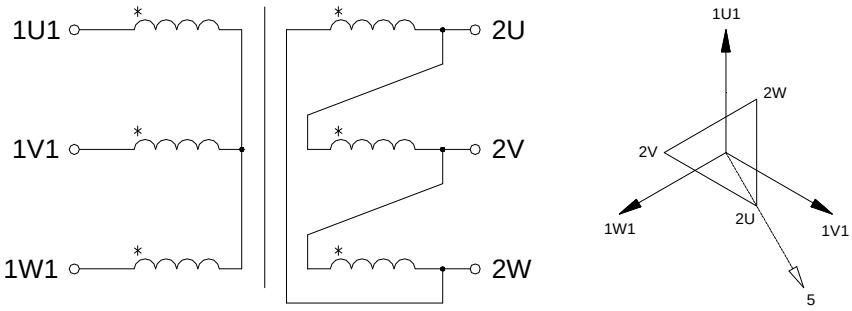
Yyn0



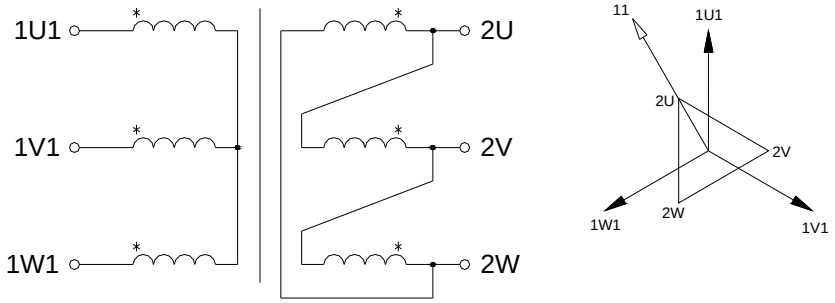
Yd1



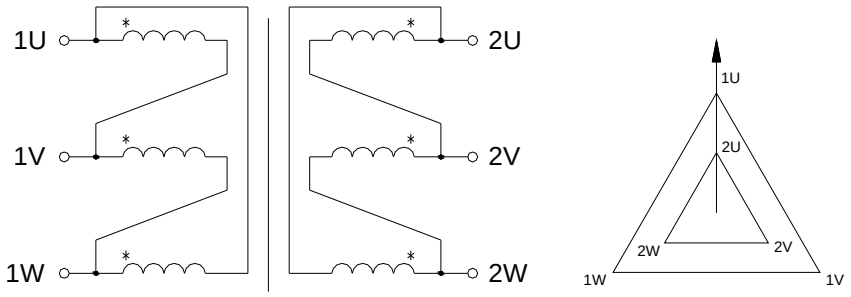
Yd5



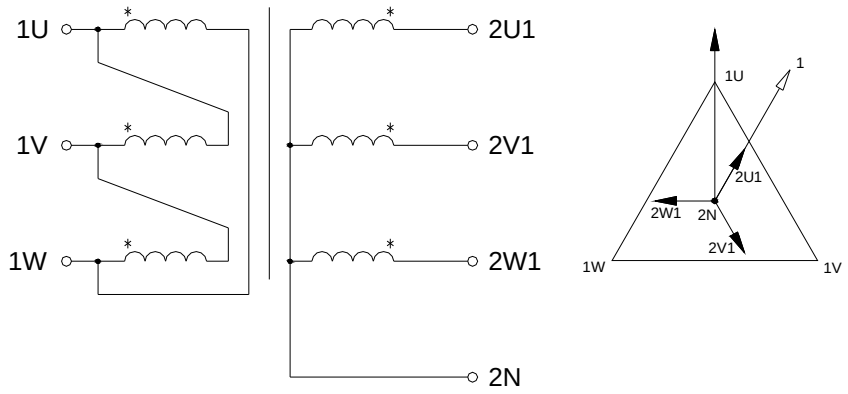
Yd11



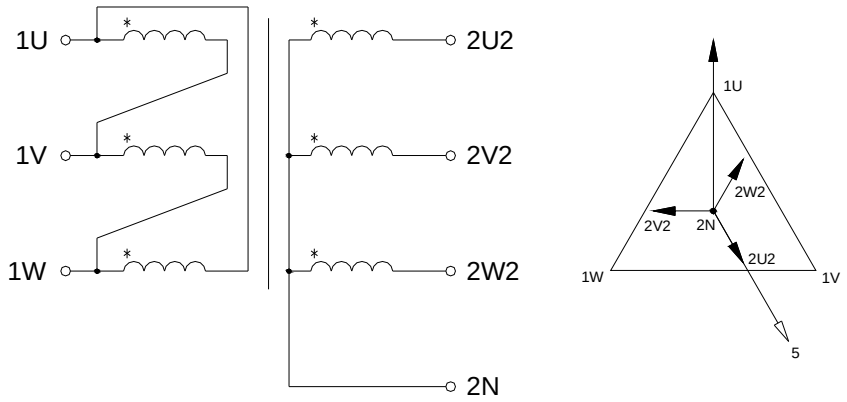
Dd0



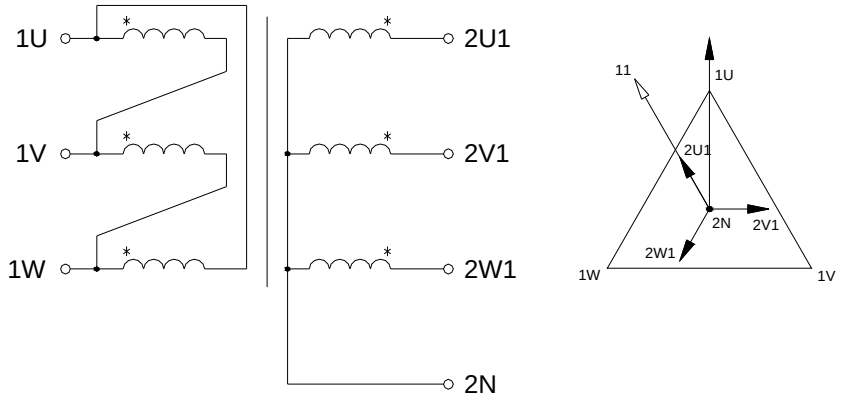
Dyn1



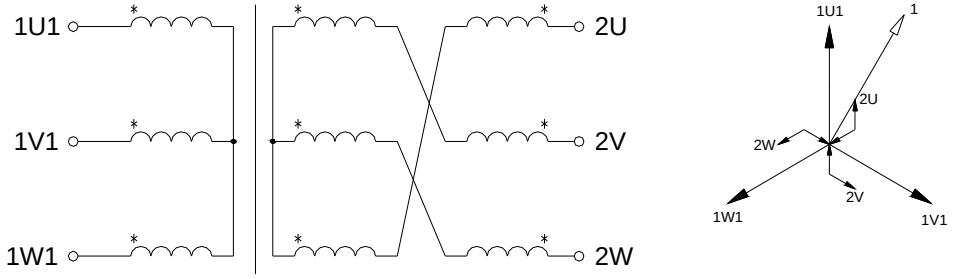
Dyn5



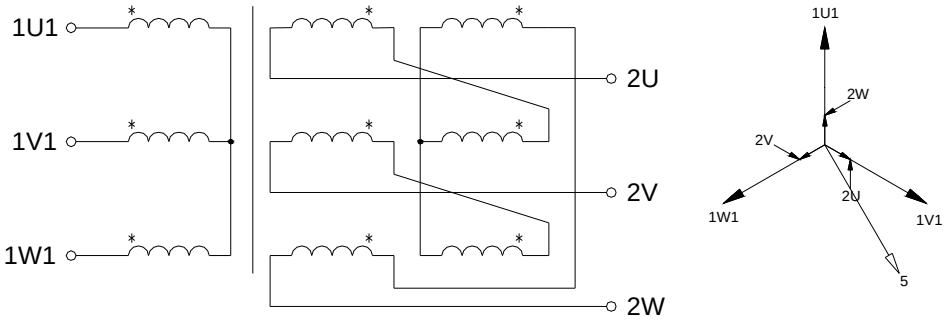
Dyn11



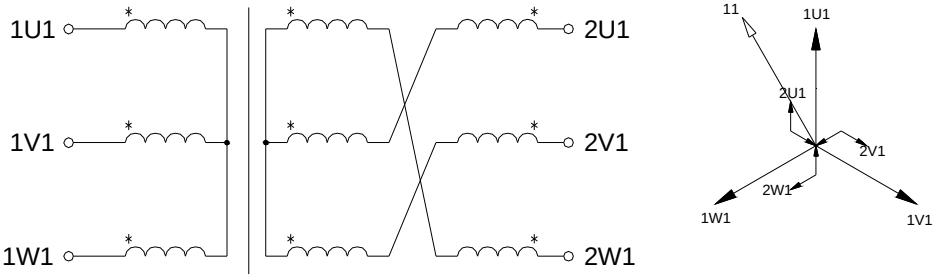
Yz1



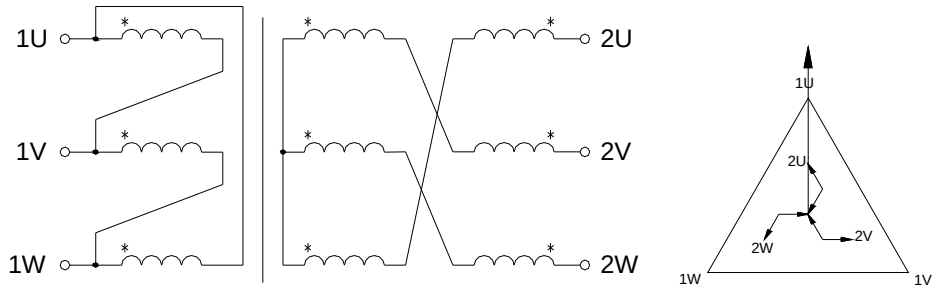
Yz5



Yz11



Dz0

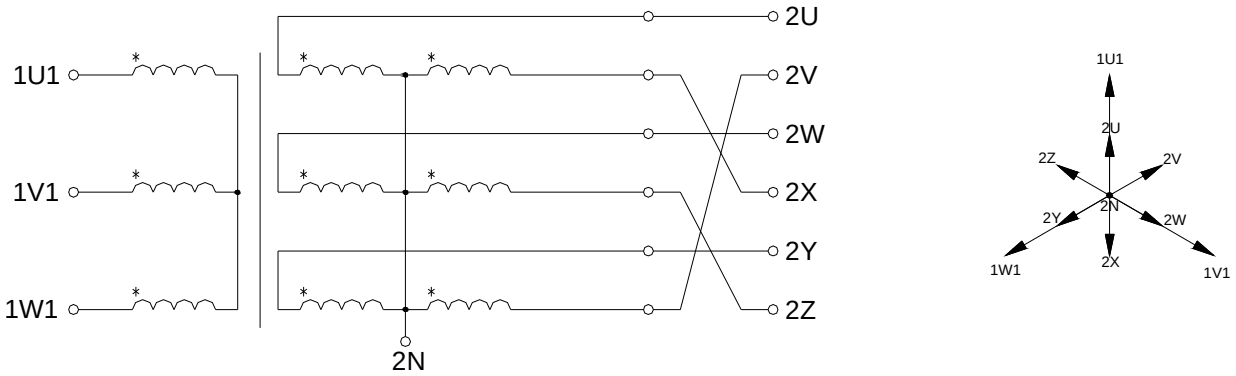


Zmiana liczby faz

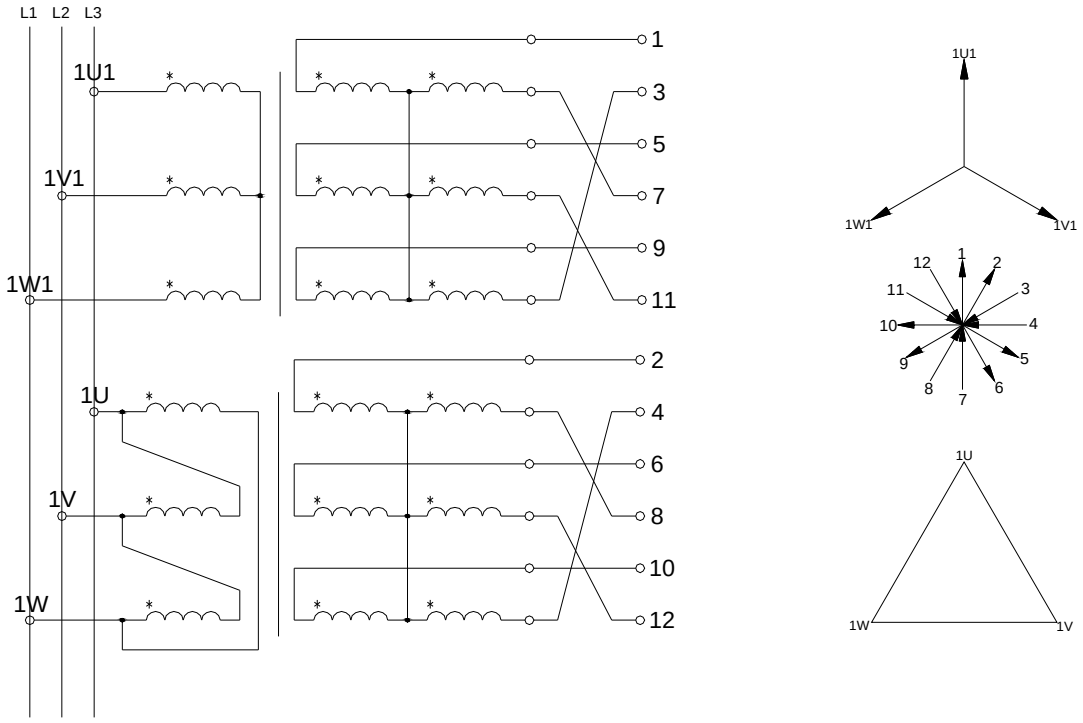
W urządzeniach wielofazowych (np. prostownikach 6 lub 12 pulsowych) istnieje konieczność dostosowania układu trójfazowego do potrzeb odbiornika. Można to zrealizować przez budowę złożonego transformatora o wielofazowym obwodzie wtórnym.
Istnieje kilka różnych możliwości konfiguracji uzwojenia wtórnego, które pozwalają uzyskać układ sześciofazowy. Oprócz połączenia w podwójną gwiazdę stosuje się również układ podwójnego trójkąta lub tzw. uzwojenie widełkowe.
Transformatory wielofazowe stosowane są najczęściej do współpracy z energoelektronicznymi układami przekształtnikowymi.

Najczęściej stosowane układy połączeń transformatorów 3-fazowych, wielouzwojeniowych, zmieniających liczbę faz:

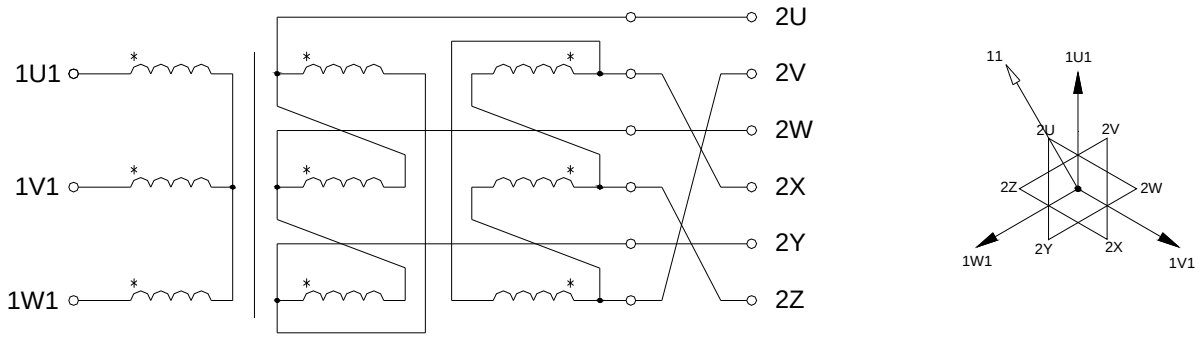
1. **Układ 3/6 faz (podwójnej gwiazdy):**



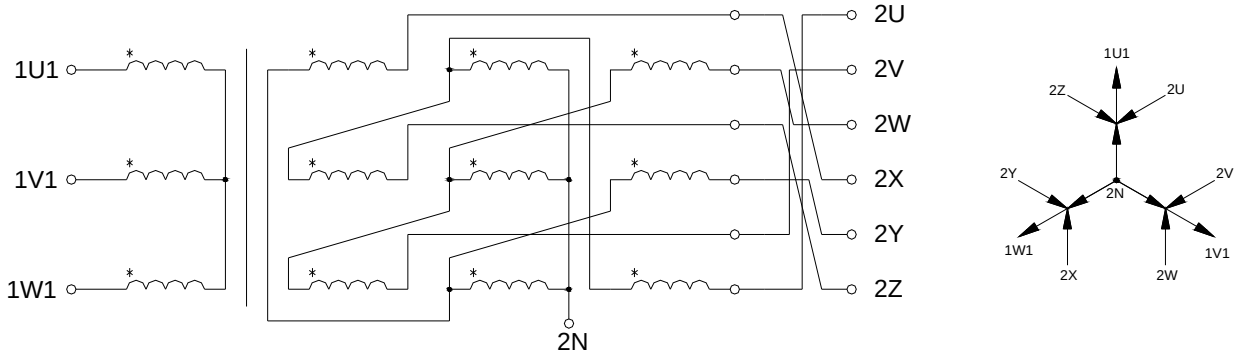
2. **Układ 3/12 faz :**



3. **Układ 3/6 faz (podwójnego trójkąta) :**



4. **Układ widełkowy :**

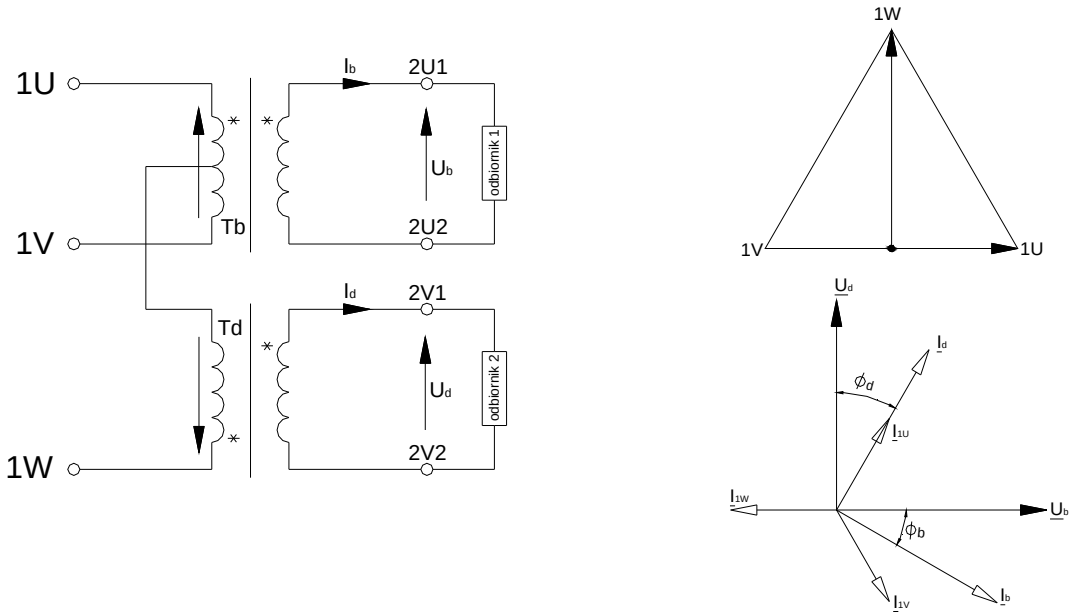


Specjalne układy połączeń transformatorów :

Wiele nowoczesnych rozwiązań technicznych stwarza zapotrzebowanie na transformatory o nietypowej budowie i specyficznych własnościach.

Układ Scotta – 3/2 fazy :

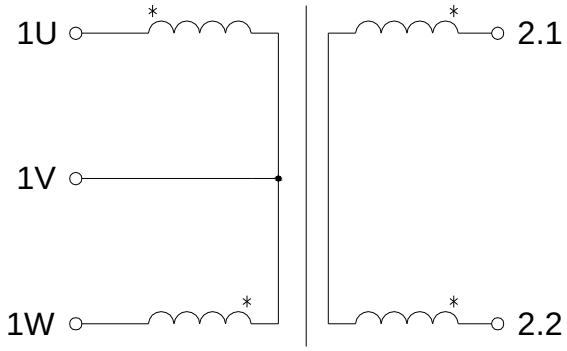
W układzie Scotta pracują dwa jednofazowe transformatory T1 i T2 pracujące w niżej przedstawionej konfiguracji. Jest to jeden ze sposobów przekształcenia obwodu trójfazowego na dwufazowy. Równomiernie obciążony układ Scotta (gdzie prądy I_b, I_d są równe i przesunięte w fazie o kąt $\pi/2$), będzie symetrycznie obciążał sieć trójfazową. Jest to duża zaleta tego układu.



Układ Vv - 3/1 fazę :

Następnym często stosowanym sposobem przekształcenia obwodu trójfazowego na jednofazowy,

jest układ „Vv”. Transformatory tego typu budowane są podobnie jak standardowe transformatory trójfazowe jednak z pominięciem uzwojenia znajdującego się zwykle na środkowej kolumnie rdzenia. Otrzymujemy w ten sposób transformator zasilany z sieci trójfazowej, który po stronie wtórnej zasila obwód jednofazowy. Zaletą układu jest możliwość zasilania odbiorników jednofazowych o dużych mocach z sieci trójfazowej. Wadą tego rozwiązania jest niesymetryczne obciążenie sieci zasilającej, faza środkowa (V) obciążona jest podwójnie w porównaniu z pozostałymi (U i W).



Klasa izolacji

Klasa izolacji, jest to określony literowo rodzaj zastosowanych materiałów izolacyjnych, informujący o maksymalnej temperaturze pracy transformatora. Jej przekroczenie przy pracy ciągłej skraca żywotność oraz czas bezawaryjnej pracy transformatora.

Symbol klasy Izolacji	**Temperatura maksymalna trwale dopuszczalna**	**Maksymalny przyrost temperatury uzwojeń dla max temp. otoczenia 40°C** wg. IEC 61558	**Maksymalny przyrost temperatury uzwojeń dla max temp. otoczenia 40°C** wg. EN 60726
	[°C]	[°C]	[°C]
A	105	60	60
E	120	75	75
B	130	80	80
F	155	100	100
H	180	125	125
C	220	---	150

Stopnie ochrony IP (International Protection, określony wg. EN-IEC 60529).

To stopień ochrony transformatora zapewnianej przez obudowę, wyznaczany w kilkustopniowej skali, określający stopień zabezpieczenia przed przedostawaniem się do wnętrza obudowy ciał stałych oraz wody. Kod opisujący stopień ochrony składa się z dwóch cyfr.
Pierwsza cyfra kodu IP określa, stopień ochrony urządzenia wewnątrz obudowy przed dostaniem się do jego wnętrza ciał stałych a także stopień ochrony użytkownika przed bezpośrednim kontaktem z elementami urządzenia będącymi pod napięciem.
Druga cyfra kodu IP określa, stopień ochrony urządzenia wewnątrz obudowy przed dostaniem się do jego wnętrza wody.

Pierwsza cyfra kodu	Opis	Druga cyfra kodu	Opis
IP0X	brak ochrony urządzenia	**IP**X**0**	brak ochrony urządzenia
IP1X	ochrona urządzenia przed przenikaniem przedmiotów o średnicy Ø≥50 mm np.: ludzką dłoń	**IP**X**1**	ochrona urządzenia przed kroplami wody spadającymi pionowo
IP2X	ochrona urządzenia przed przenikaniem przedmiotów o średnicy Ø≥12 mm np.: palcem dłoni	**IP**X**2**	ochrona urządzenia przed kroplami wody spadającymi pod kątem ≤ 15^0 od pionu
IP3X	ochrona urządzenia przed przenikaniem przedmiotów o średnicy Ø≥2,5 mm	**IP**X**3**	ochrona urządzenia przed kroplami wody spadającymi pod kątem ≤ 60^0 od pionu (np.: deszczem)
IP4X	ochrona urządzenia przed przenikaniem przedmiotów o średnicy Ø≥1,0 mm	**IP**X**4**	ochrona urządzenia przed bryzgami wody ze wszystkich stron
IP5X	ochrona urządzenia przed przenikaniem jakichkolwiek przedmiotów i osiadaniem pyłu	**IP**X**5**	ochrona urządzenia przed silnym strumieniem wody padającym ze wszystkich stron
IP6X	pyłoszczelne	**IP**X**6**	ochrona urządzenia przed falami i silnym strumieniem wody, padającymi ze wszystkich stron
-	-	**IP**X**7**	ochrona urządzenia przed zniszczeniem na skutek krótkotrwałego (do 30 min.) zanurzenia w wodzie na głębokość H=1 m.
-	-	**IP**X**8**	ochrona urządzenia przed zniszczeniem na skutek długotrwałego zanurzenia w wodzie na głębokość H>1 m.

Jeżeli rzeczywista ochrona osobista użytkownika przed kontaktem z elementami będącymi pod napięciem jest lepsza, niż wskazuje na to pierwsza cyfra kodu, to kod IP może zawierać jeszcze dodatkową literę.
Dodatkowa litera wskazuje na stopień ochrony użytkownika przed bezpośrednim kontaktem z elementami będącymi pod napięciem :

Dodatkowa litera	Opis
A	ochrona przed bezpośrednim kontaktem otwartą dłonią o średnicy Ø < 50 mm
B	ochrona przed kontaktem z palcem o wymiarach średnicy Ø <12 mm, długości < 80 mm
C	ochrona przed kontaktem z narzędziem o średnicy Ø <2,5 mm, długości < 100 mm
D	ochrona przed kontaktem z przewodem o średnicy Ø <1,0 mm, długości < 100 mm

Przykłady określenia stopnia ochrony urządzeń wykonywanych przez ELHAND :
IP00- brak specjalnej ochrony urządzenia
IP23- ochrona urządzenia przed przenikaniem przedmiotów o średnicy Ø≥12 mm, np.: palcem dłoni oraz przed kroplami wody spadającymi pod kątem ≤ 60^0 od pionu (np.: deszczem)
IP44- ochrona urządzenia przed przenikaniem przedmiotów o średnicy Ø≥1,0 mm oraz przed bryzgami wody ze wszystkich stron
IP54- ochrona urządzenia przed przenikaniem jakichkolwiek przedmiotów i osiadaniem pyłu oraz przed bryzgami wody ze wszystkich stron

Rodzaj chłodzenia

Określony jest kodem literowym w zależności od czynnika chłodzącego i sposobu jego obiegu.
Dla transformatorów olejowych, sposób chłodzenia oznacza się za pomocą symbolu składającego się z czterech liter, a w przypadku transformatorów suchych bez obudowy lub z obudową przewietrzaną – z dwóch liter.

- pierwsza litera – oznacza czynnik chłodzący uzwojenia,
- druga – sposób wprawiania w ruch czynnika chłodzącego uzwojenia,
- trzecia – zewnętrzny czynnik chłodzący,
- czwarta – sposób wprawiania w ruch zewnętrznego czynnika chłodzącego.

Oznaczenie literowe rodzaju rodzaju chłodzenia, wg norm EN 60076, EN60726:

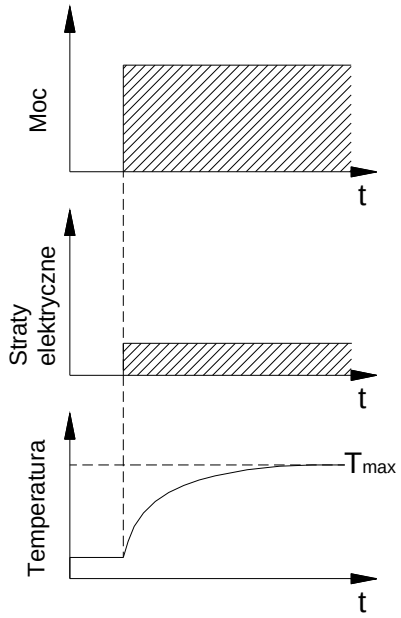
Rodzaj czynnika chłodzącego	**A** – chłodzenie powietrzne **G** – chłodzenie gazem innym niż powietrze **W** – chłodzenie wodą
Sposób wprawienia w ruch czynnika chłodzącego	**N** – chłodzenie naturalne **F** – chłodzenie wymuszone przez sztuczne wprawienie w ruch czynnika chłodzącego

Przykłady oznaczenia sposobu chłodzenia realizowane w naszej firmie :
- **AN** - transformator suchy bez lub z obudową przewietrzaną i z naturalnym chłodzeniem powietrzem
- **ANAN** - transformator suchy w obudowie z naturalnym chłodzeniem powietrznym wewnątrz i na zewnątrz obudowy
- **WF** - transformator suchy bez lub z obudową, chłodzony wodą o wymuszonym obiegu

Rodzaje pracy

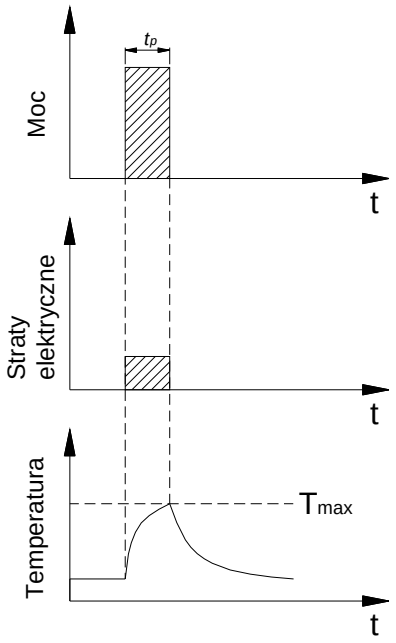
Rozróżnia się następujące rodzaje pracy:

1. **Praca ciągła – (S1)**, to praca z obciążeniem o stałej wartości w nieograniczonym okresie czasu lub co najmniej do osiągnięcia ustalonego przyrostu temperatury. Przebieg pracy ciągłej przedstawia rysunek nr 1:



Rys.1 Praca ciągła S1
T_{max} – temperatura ustalona przy pracy ciągłej.

2. **Praca dorywcza – (S2),** to praca w określonym czasie, rozpoczynana od stanu zimnego transformatora, przy czym przerwy między okresami pracy są wystarczająco długie do ochłodzenia transformatora do temperatury bliskiej temperaturze otoczenia. Pracę dorywczą symbolizują znaki S2 oraz czas pracy t_p w minutach (np. S2-15min). Przykładowy przebieg pracy dorywczej przedstawia rysunek nr 2:

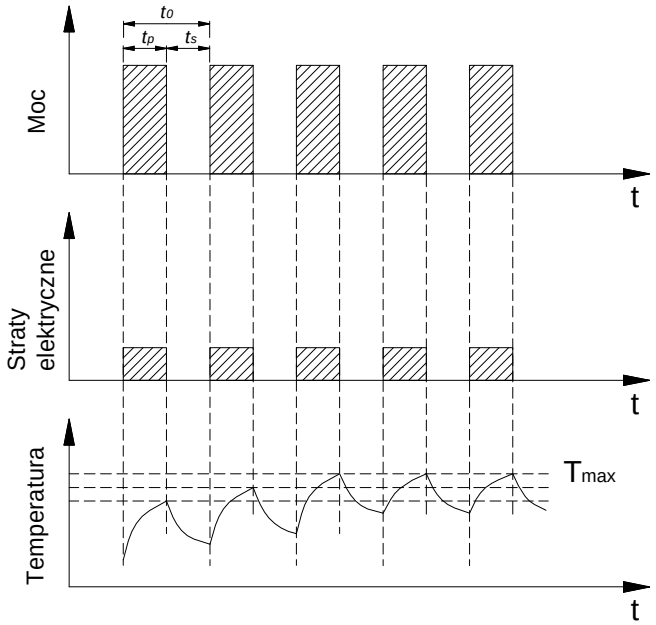


Rys.2 Praca dorywcza S2
T_{max} – najwyższa temperatura przy pracy dorywczej, t_p – czas pracy dorywczej.

3. **Praca przerywana – (S3),** to praca wykonywana kolejno w określonych, jednakowych cyklach następujących po sobie, gdzie okresy pracy są oddzielone jednakowymi okresami przerw. Oznaczenie pracy przerywanej to np. S3-20%, gdzie wartość liczbowa oznacza procentowy stosunek czasu pracy t_p do czasu trwania okresu t_0, czyli czasu pracy i następującej po nim przerwy:

$$S3 = \frac{t_p}{t_p + t_s} \cdot 100\%$$

Przykładowy przebieg pracy przerywanej przedstawia rysunek nr 3:

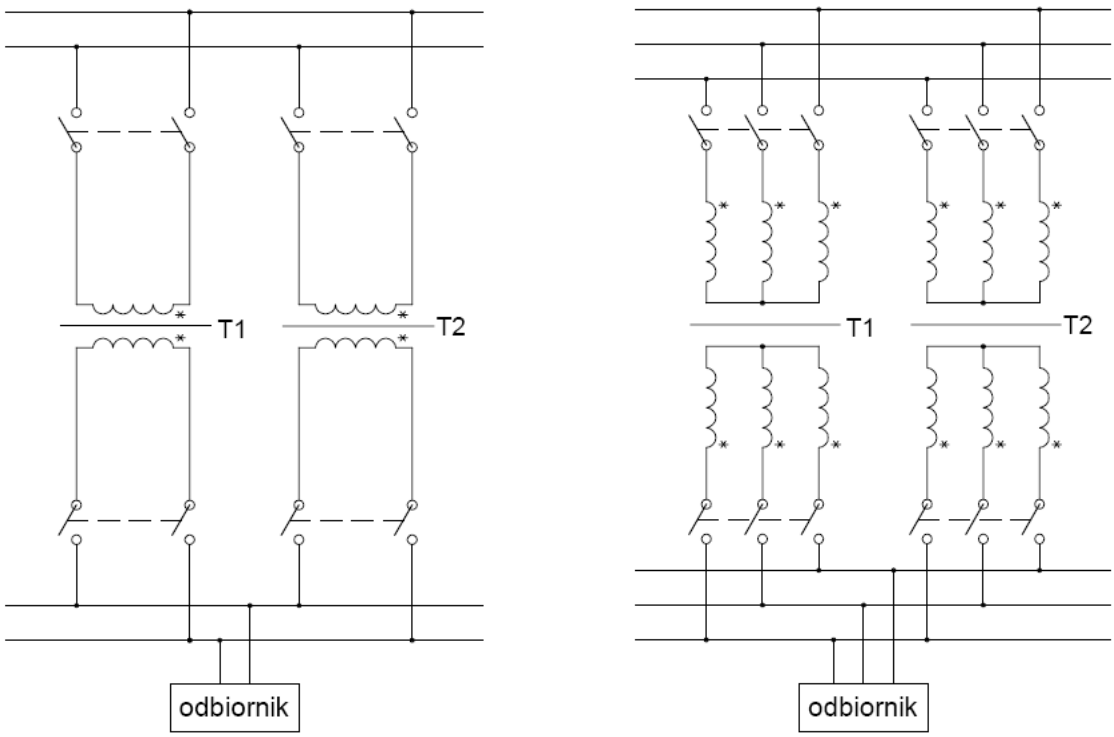


Rys.3 Praca przerywana S3
T_{max} – najwyższa temperatura przy pracy przerywanej, t_p – czas pracy, t_0 – czas trwania okresu, t_s – czas postoju.

Praca równoległa transformatorów

Praca równoległa transformatorów występuje, gdy strony pierwotne dwu lub kilku transformatorów są zasilane ze wspólnych szyn, a strony wtórne tych transformatorów zasilają odbiory również przez wspólne szyny:

a) b)



Praca równoległa transformatorów: a) jednofazowych, b) trójfazowych

Praca równoległa transformatorów jest poprawna, jeżeli:

- w obwodach wtórnych transformatorów w stanie jałowym nie płyną żadne prądy
- transformatory w czasie pracy obciążają się proporcjonalnie do ich mocy znamionowych
- odpowiednie prądy poszczególnych transformatorów są z sobą w fazie

Aby powyższe warunki były spełnione transformatory przeznaczone do pracy równoległej muszą spełnić następujące wymagania:

- napięcia znamionowe pierwotne i wtórne powinny być jednakowe (przekładnie transformatorów nie mogą się różnić więcej niż o ±0,5%)
- transformatory powinny posiadać te same grupy połączeń o tym samym przesunięciu godzinowym
- napięcia zwarcia transformatorów nie powinny się różnić więcej niż o 10%
- stosunek mocy znamionowych transformatorów S1/S2 nie większy niż 1 : 3

Niespełnienie któregokolwiek z powyższych warunków powoduje, że w uzwojeniach wtórnych transformatorów płyną prądy wyrównawcze i powstają dodatkowe straty. Wpływa to niekorzystnie na rozkład obciążenia i nie pozwala w pełni wykorzystać mocy znamionowych transformatorów pracujących równolegle.

Praca równoległa transformatorów ma wiele zalet eksploatacyjnych oraz ekonomicznych.
Przykładowo gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną zmienia się w szerokich granicach,
wtedy jeden duży transformator musi być załączony do sieci, niezależnie od zapotrzebowania na moc w czasie.
Pod względem ekonomicznym jest to mniej korzystne (z uwagi na stałe straty w rdzeniu), niż praca jednego
z kilku transformatorów mniejszej mocy, połączonych równolegle.

Dodatkowym atutem pracy równoległej jest fakt, że moc pojedynczego transformatora przeznaczonego do pracy równoległej jest mniejsza od mocy transformatora pracującego samotnie na takie samo obciążenie.
Stąd mniejsza moc i koszt w przypadku zastosowania transformatora rezerwowego.

Rodzaje wykonania klimatycznego

W zależności od strefy klimatycznej, w której będzie pracował wyrób, powinny być użyte odpowiednie materiały do jego wykonania. Ta informacja może być zawarta na tabliczce znamionowej w postaci symbolu literowo-cyfrowego, zawartego w :

- normie EN 60076-11 dla klasy klimatycznej określającej środowisko w zależności od wilgotności, kondensacji, zanieczyszczeń i temperatury otoczenia;
- E0 - nie pojawia się kondensacja, a zanieczyszczenia są pomijalne.
- **E1** - może pojawić się sporadycznie kondensacja i ograniczone zanieczyszczenie
- **E2** - może pojawić się częsta kondensacja i duże zanieczyszczenie
- normie EN 60721-3 określającej środowisko w którym przechowywane, transportowane i używane są wyroby
- **1 do 7** **-** cyfry określające miejsce stosowania
- K, B, C, S, M, Z - litery określające rodzaj uwzględnianych warunków środowiskowych
- **1 do 7** **-** cyfry określające intensywność z jaką występuje dany czynnik, wyższa cyfra oznacza większą intensywność

Norma **EN 60076-11** przewiduje podział warunków, w jakich znajduje się transformator na dwie kategorie:
- klasy klimatyczne i klasy środowiskowe i obowiązuje dla transformatorów suchych (łącznie z autotransformatorami) o mocy od 5 kVA (1-faz) i 15 kVA (3-faz) o najwyższym napięciu do 36 kV, w których napięcie znamionowe przynajmniej jednego uzwojenia jest wyższe niż 1 kV.

Klasy klimatyczne wg **EN 60076-11** :

Klasa klimatyczna	Opis
C1	Transformator może pracować w temperaturze T ≥ -5°C, ale można go transportować i magazynować w temperaturze otoczenia T ≥ -25°C
C2	Transformator może pracować i można go magazynować i transportować w temperaturze otoczenia T ≥ -25°C

Klasy środowiskowe wg **EN 60076-11** :

Klasa środowiskowa	Opis
E0	Na transformatorze nie pojawia się kondensacja, a zanieczyszczenia są pomijalne. W czystych, suchych instalacjach wnętrzowych jest to zwykle osiągalne
E1	Na transformatorze może pojawić się sporadycznie kondensacja (na przykład, gdy odłączone jest zasilanie transformatora). Możliwe jest ograniczone zanieczyszczenie.
E2	Częsta kondensacja lub/i duże zanieczyszczenie

Warunki środowiskowe dla transformatorów suchych mają znaczenie nie tylko podczas pracy, ale także podczas magazynowania przed instalowaniem.

Porównanie oznaczeń wg **EN 60076-11** i nieaktualnej już **PN-68/H-04650**

Rodzaj wykonania wg PN-68/H-04650	Klasa klimatyczna / klasa środowiskowa Wg EN 60076-11	Uwagi dotyczące różnic
N/3	C1 / E0	W przypadku normy PN-68/H-04650 podawana była niższa temperatura minimalna (-40°C) oraz wyższa średnia temperatura maksymalna (+40°C). Dla normy PN-EN 60076-11 jest to odpowiednio (-25°C) oraz (+30°C)
W/3	C2 / E1	W przypadku normy PN-68/H-04650 podawana była niższa temperatura minimalna (-40°C) oraz wyższa średnia temperatura maksymalna (+45°C). Dla normy EN 60076-11jest to odpowiednio (-25°C) oraz (+30°C)

Normy serii EN 60721 klasyfikują warunki środowiskowe w których przechowywane, transportowane i używane są wyroby. Poniżej podano skrócone informacje o systemie klasyfikacji zdefiniowanym w tej normie.
System identyfikacji użyty do oznaczenia klasy danych warunków środowiskowych jest bardzo rozbudowany i składa się następujących znaków :

- <u>cyfra określająca miejsce stosowania</u>
  1 - warunki w miejscu składowania
  2 - warunki w czasie transportu
  3 - warunki w miejscach chronionych przed wpływem warunków atmosferycznych
  4 - warunki w miejscach nie chronionych przed wpływem warunków atmosferycznych
  5 - warunki w pojazdach naziemnych
  6 - warunki w środowisku okrętowym
  7 - warunki w czasie przenośnego i niestacjonarnego użytkowania wyrobów
- <u>litera określająca rodzaj uwzględnianych warunków środowiskowych</u>
  K - czynnik o charakterze klimatycznym (temperatura, wilgotność, nasłonecznienie itd.)
  B - czynniki o charakterze biologicznym (np. atak zwierząt, termitów itp.)
  C - czynniki aktywne chemicznie (różne czynniki chemiczne)

S - substancje oddziaływujące mechanicznie (piasek, kurz itp.)
M - czynniki o charakterze mechanicznym (drgania, wstrząsy, wibracje)
Z - czynniki o charakterze specjalnym

- **1 do 7-** cyfra określająca intensywność z jaką występuje dany czynnik.
  Wyższa cyfra oznacza większą intensywność
- **H** (high) lub **L** (low) - dodatkowo po tej cyfrze mogą być dodane litery **H** lub **L** określające częstość występowania danych warunków, np. temperatura jest najczęściej niska a nigdy wysoka

Przykładowe pełne oznaczenie wg **EN 60721** uwzględniające występowanie wszystkich warunków środowiskowych w miejscach chronionych przed wpływem czynników atmosferycznych może mieć następującą bardzo rozbudowaną postać: **3K2/3Z1/3Z4/3B1/3C2/3S1/3M4**

Dla wyrobów produkowanych przez naszą firmę przy próbie określenia warunków środowiskowych zgodnych bądź zbliżonych do stosowanych wg nieaktualnej już **PN-68/H-04650** oznaczeń wykonań N/3 i W3, najczęściej są używane następujące oznaczenia warunków środowiskowych:
- **3K3** lub **3K4** jako odpowiednik starego oznaczenia **N/3** oraz
- **3K7** lub **3K7L** jako odpowiednik starego oznaczenia **W/3.**

Najczęściej używane oznaczenia warunków środowiskowych wg **EN 60721**

Parametr środowiska	JM	Klasa 3K3	Klasa 3K4	Klasa 3K7	Klasa 3K7L
Najniższa temperatura powietrza	°C	+5	+5	-40	-40
Najwyższa temperatura powietrza	°C	+40	+40	+70	+40
Najniższa wilgotność względna	%	5	5	10	10
Najwyższa wilgotność względna	%	85	95	100	100
Najniższa wilgotność bezwzględna	g/m^3	1	1	0,1	0,1
Najwyższa wilgotność bezwzględna	g/m^3	25	29	35	35
Wskaźnik zmiany temperatury	°C / min	0,5	0,5	1,0	1,0
Najniższe ciśnienie powietrza	kPa	70	70	70	70
Najwyższe ciśnienie powietrza	kPa	106	106	106	106
Promieniowanie słoneczne	W/m^2	700	700	1120	1120
Promieniowanie cieplne	brak	6)	6)	6)	6)
Ruchu otaczającego powietrza	m/s	1,0 5)	1,0 5)	1,0 5)	1,0 5)
Kondensacja	brak	nie	tak	tak	tak
Opady atmosferyczne w czasie wiatru (deszcz, śnieg, grad itp.)	brak	nie	nie	tak	tak
Woda ze źródeł innych niż deszcz	brak	nie	nie	6)	6)
Tworzenie się lodu	brak	nie	nie	tak	tak

5) jeśli ma to zastosowanie, to odpowiednia wartość może być podana zgodnie z tabelą 2 (wg EN 60721-3-3)
6) istniejące warunki lokalizacji mogą być określone według tabeli 2 (wg EN 60721-3-3)

Zgodnie z normą **EN 60721 :**
- warunki określone jako **3K3** - mogą występować w zwykłych pomieszczeniach roboczych np.: biura, sklepy, zakłady produkcyjne, w których realizowany jest montaż elementów elektronicznych, magazyny produktów wartościowych i wrażliwych.
- warunki określone jako **3K4** - mogą występować w niektórych pomieszczeniach roboczych np. zakłady produkcyjne w których realizowane są procesy powodujące wystąpienie wysokiej wilgotności, normalne pomieszczenia magazynowe, garaże, piwnice.
- warunki określone jako **3K7** i **3K7L** mogą występować przy wejściach do budynków, garażach, budynkach fabrycznych, nie dozorowanych stacjach z wyposażeniem, pomieszczeniach magazynowych dla produktów odpornych na mróz, itp.

Wpływ czynników zewnętrznych na obciążenie transformatora

1. Od temperatury otoczenia:
Jeżeli transformator, dławik lub zasilacz został zaprojektowany do pracy w temperaturze otoczenia 40°C, a faktyczna temperatura otoczenia jest wyższa, to należy zredukować obciążenie transformatora wg. poniższej tabelki. Brak redukcji mocy obciążenia skraca żywotność urządzenia, a także może spowodować jego uszkodzenie.

temperatura otoczenia	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
Współczynnik redukcji mocy obciążenia	1	0,95	0,91	0,87	0,84

2. Od wysokości pracy powyżej 1000 npm.
Zainstalowane transformatora, dławika lub zasilacza na wysokości H >1000 npm. powoduje konieczność redukcji jego mocy obciążenia wg. poniższej tabelki:

Wysokość zainstalownia npm.	1000	1500	2000	3000	4000
Współczynnik redukcji mocy obciążenia	1	0,97	0,95	0,90	0,85

3. Od pracy przerywanej S3
Jeżeli transformator jest przeznaczony do pracy przerywanej S3 to w prosty sposób można wyznaczyć jego moc budowy w stosunku do mocy znamionowej transformatora podanej w katalogu dotyczącej pracy ciągłej S1:

Praca przerywana **S3** w **%**	100	80	70	60	50	40	30	20
Współczynnik $\mathbf{k_3}$ zmniejszenia mocy obciążenia	1	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55	0,45

Przykład:
Moc zasilanego odbiornika = 10 kVA
Czas pracy = 2 minuty
Czas przerwy = 8 minut
stąd : praca przerywana S3 = [2/(2+8)]x100% = 20% dla której współczynnik korekty mocy k_3 = 0,45,
a skorygowana moc obciążenia 10 kVA x 0,45 = 4,5 kVA.
Do zasilania odbiornika o mocy 10 kVA dla pracy przerywanej S3-20%, możemy dobrać transformator o mocy budowy = 4,5 kVA lub typowej, wyższej = 5,0 kVA.

4. Od częstotliwości sieci
Transformator zaprojektowany na częstotliwość znamionową 50Hz może pracować przy częstotliwości większej (do 150-200 Hz). Wynika to stąd że przy nie zmienionym napięciu zasilania, straty całkowite w rdzeniu są odwrotnie proporcjonalne do częstotliwości.
W przypadku zmniejszenia częstotliwości poniżej znamionowej należy obniżyć napięcie zasilania tak aby nie powiększać strat w rdzeniu oraz prądu jałowego (zgodnie z poniższą zależnością).
W przeciwnym razie może skutkować to przegrzaniem i uszkodzeniem transformatora.

$$U_p = U_N \frac{f_p}{f_N}$$

gdzie: f_N – częstotliwość znamionowa; f_p – częstotliwość pracy (niższa od znamionowej);
U_N – napięcie znamionowe; U_p – otrzymane napięcie przy zasilaniu częstotliwością f_p.

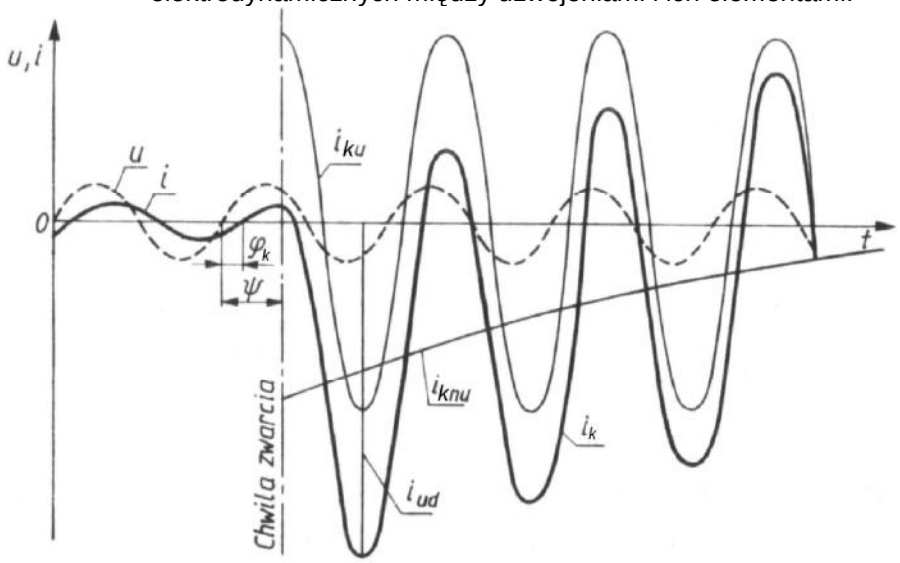
5. Od obudowy
Transformatory produkcji ELHAND-TRANSFORMATORY wykonane w stopniu ochrony IP00 mogą bez przeszkód pracować w obudowach przewietrzanych o stopniu ochrony IP23 dopasowanych gabarytowo zgodnie z katalogiem ELHAND lub po zapewnieniu temperatury otoczenia zgodnej z danymi na tabliczce znamionowej.
W przypadku zabudowania w obudowie nie przewietrzanej o stopniu ochrony IP44 lub IP54, tylko i wyłącznie po ustaleniu z producentem, z uwagi na konieczność dopasowania strat całkowitych transformatora do powierzchni odprowadzania ciepła do otoczenia.

Zabezpieczanie transformatorów

Najczęstszą przyczyną awarii transformatorów jest uszkodzenie izolacji uzwojeń. Przyczyną uszkodzenia może być przetężenie lub przepięcie.
Przetężenia występują przy przeciążeniach i zwarciach, mogą powodować przegrzanie uzwojeń i prowadzić w krótkim czasie do całkowitego zniszczenia izolacji.

Przegrzania uzwojeń mogą być wywołane zjawiskami elektrycznymi, jak również mogą pojawić się z przyczyn nieelektrycznych, powodując dalsze uszkodzenia transformatorów już o charakterze elektrycznym. Np.: zła wymiana powietrza, wzrost temperatury otoczenia, zmniejszenie przepływu wody (dla uzwojeń chłodzonych wodą), lub dla transformatorów chłodzonych nadmuchem powietrza – awaria wentylatorów lub zabrudzenie siatki ochronnej wentylatora.

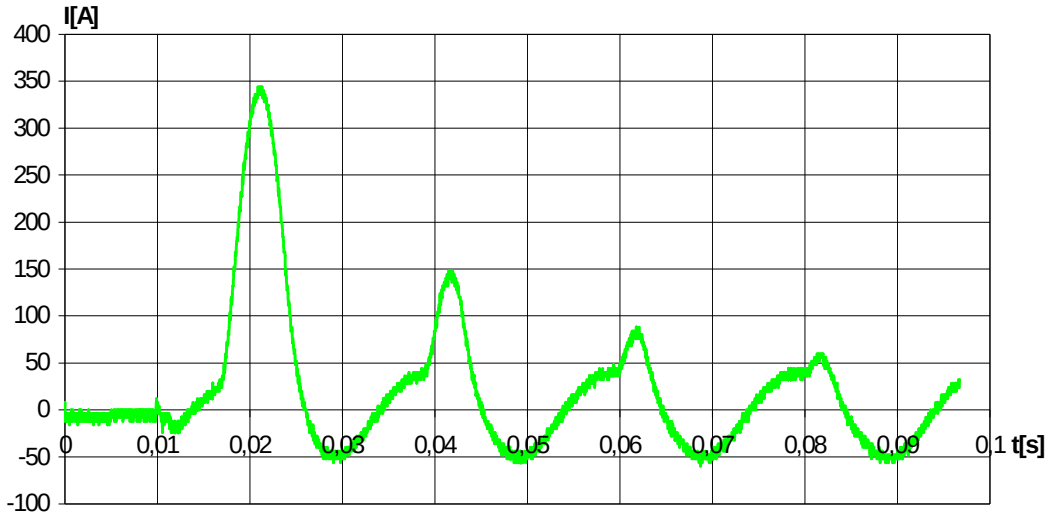
Zwarcia powodują oprócz przegrzania występowanie bardzo dużych sił elektrodynamicznych między uzwojeniami i ich elementami.



Przykładowy przebieg prądu zwarciowego
u, i – napięcie i prąd przed zwarciem, i_{knu} – składowa nieustalona prądu zwarciowego, i_{ku} – składowa ustalona prądu zwarciowego, i_k – prąd zwarciowy, i_{ud} – prąd udarowy

Siły te są proporcjonalne do kwadratu prądu i są uwzględniane podczas projektowania transformatora. Przeciętne czasy trwania nieustalonego zwarcia (czas po którym składowa nieustalona prądu zwarciowego zanika) wynoszą od 0,02 s do 0,2 s. Wartość ustalonego prądu zwarciowego zależy od parametrów obwodu w tym także od napięcia zwarcia transformatora. Im niższe napięcie zwarcia transformatora tym wyższa wartość ustalonego prądu zwarciowego.
Np: dla transformatora o napięciu zwarcia 5%, ustalony prąd zwarciowy ma wartość 20-krotnej wartości prądu znamionowego.
W celu zmniejszenia ustalonego prądu zwarciowego i dynamicznych sił zwarciowych nasza firma stosuje specjalne konstrukcje uzwojeń transformatorów.

Zabezpieczenia.
Zabezpieczeniem transformatorów przed ich przegrzaniem (wywołanym przez przeciążenia jak i zwarcia) są najczęściej bezpieczniki topikowe.
Przy doborze wkładki topikowej jej istotnymi parametrami jest prąd i rodzaj charakterystyki czasowo-prądowej.
Prąd znamionowy wkładki topikowej po stronie pierwotnej, należy dobrać bliski prądowi znamionowemu uzwojenia pierwotnego transformatora i równy górnej wartości najbliższej, znormalizowanej wkładki.
Istotnym parametrem transformatora decydującym o doborze charakterystyki czasowo-prądowej wkładki jest prąd załączenia.
Prąd załączenia transformatora może osiągać wartość 20÷40 razy większą od wartości znamionowej.
Transformatory naszej produkcji charakteryzują się prądem załączenia w granicach 15÷30-krotnej wartości prądu znamionowego, a na życzenie odbiorcy możemy jeszcze bardziej go obniżyć. Np.: w transformatorach przeznaczonych do zasilania pomieszczeń medycznych nie przekracza on 12-krotnej wartości prądu znamionowego.
Dlatego dla transformatorów najlepiej stosować wkładki topikowe o charakterystyce zwłocznej **gTr** lub bardziej dostępne w handlu **gL/gG**. W przypadku transformatorów małej mocy można zainstalować bezpieczniki miniaturowe o charakterystyce typu **TT** *lub* ***T***.



Przebieg prądu załączenia transformatora typu ET1MED-6,3 230V//230V (I_{1n}=28A), produkcji ELHAND

Jako zabezpieczenia transformatorów nie zaleca się stosowania popularnych wyłączników nadmiarowo-prądowych typu ***S*****,** mimo że jest dostępna ich wersja o charakterystyce ***D*** (pasmo 10-20x*In*), ponieważ prąd rozruchu transformatora może spowodować zadziałanie wyzwalacza elektromagnetycznego podczas załączenia transformatora.
Najlepszym rozwiązaniem zabezpieczenia transformatora jest zastosowanie wyłącznika o regulowanych parametrach charakterystyk czasowo-prądowych odrębnie dla członów zwarciowego i przeciążeniowego. Oprócz tego wyłącznik tego typu ma również możliwość ustawienia zwłoki (opóźnienia), tak że możemy „uśpić" jego reakcję np. na czas rozruchu, który trwa zazwyczaj pierwsze 5-7 półokresów. Wadą tych wyłączników jest dość wygórowana cena.
Można stosować również zabezpieczenia po stronie wtórnej, lecz stanowią one bardziej zabezpieczenie odbiornika. W tym przypadku wartość prądu znamionowego wkładki topikowej nie może być wyższa od prądu znamionowego strony wtórnej transformatora. Rodzaj charakterystyki czasowo-prądowej wkładki zależny jest w tym wypadku od charakteru odbiornika.

Czujniki temperatury
O ile bezpieczniki topikowe lub wyłączniki chronią, przed skutkami przeciążeń i zwarć, to istnieje szereg czynników nieelektrycznych, które mogą doprowadzić do przegrzania i uszkodzenia izolacji. Z tego powodu dodatkowo umieszcza się w uzwojeniach czujniki temperatury zależnie od aplikacji i potrzeb użytkownika.
Mogą być zastosowane czujniki wykonane jako:
- rezystancyjne (typu ***Pt***),
- półprzewodnikowe (np. pozystory ***PTC***),
- miniaturowe wyłączniki bimetalowe : ***NO*** – (normalnie otwarte) lub
  NC – (normalnie zamknięte).

Umieszcza się je wewnątrz uzwojenia. Niektóre zastosowania np. górnicze lub medyczne wymagają zamontowania nawet dwóch rodzajów czujników w jednym uzwojeniu.
Przykład: za pomocą czujnika typu ***Pt100*** realizowany jest ciągły monitoring temperatury uzwojeń, a dodatkowo zamontowany wyłącznik bimetalowy ***NO*** lub ***NC*** sygnalizuje przekroczenie temperatury dopuszczalnej.

Jest to istotne z punktu widzenia eksploatacji, ale przede wszystkim korzystne dla wydłużenia żywotności transformatora, gdyż stałe przegrzanie izolacji o 5ºC powoduje dwukrotnie szybsze skrócenie jej żywotności.

Typy i rodzaje sieci zasilających niskiego napięcia

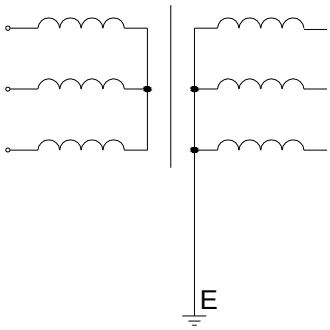
Elektroenergetyczne sieci zasilające niskiego napięcia mogą być wykonane jako :

- uziemione lub
- izolowane względem ziemi.

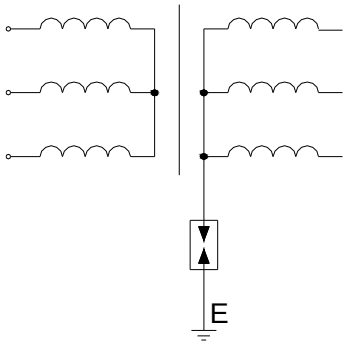
Typy sieci zasilających niskiego napięcia oznacza się ciągiem liter.

Pierwsza litera, określa związek między układem sieci a ziemią :

T - bezpośrednie połączenie jednego punktu neutralnego układu sieci z ziemią

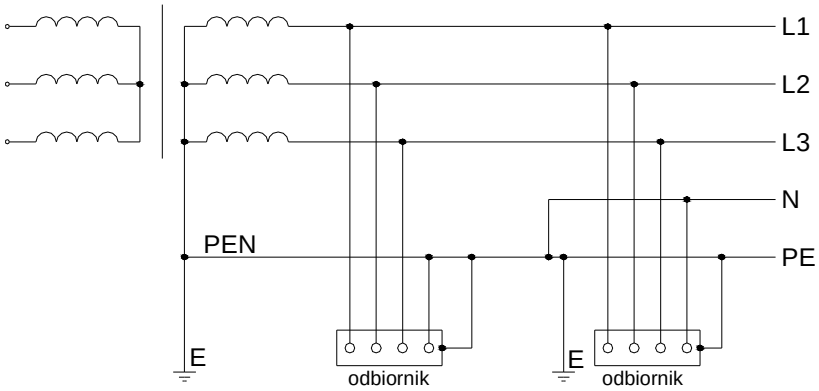


I - wszystkie części będące pod napięciem są izolowane od ziemi lub punkt neutralny układu sieci jest połączony z ziemią przez impedancję o dużej wartości



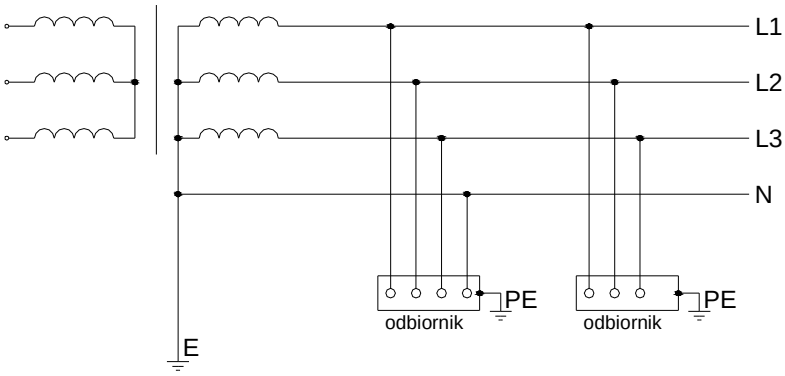
Druga litera, określa związek między ziemią a częściami przewodzącymi które w warunkach normalnej pracy nie pozostają pod napięciem:

N - bezpośrednie połączenie dostępnych części przewodzących z uziemionym punktem neutralnym układu sieci

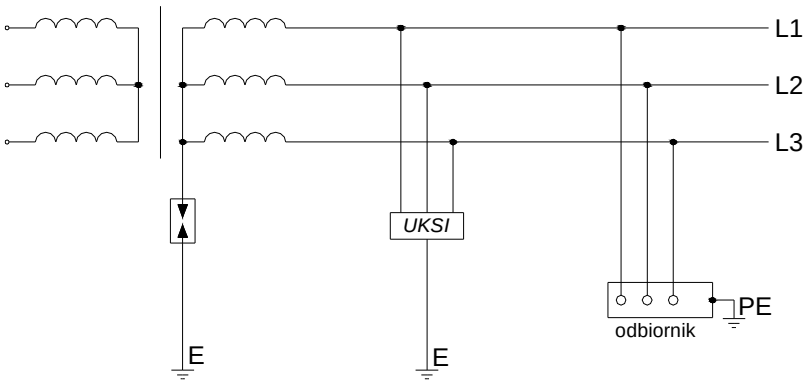


Przykład układu sieci typu **TN** (w której może nie występować przewód zerowy (N)

T - bezpośrednie połączenie z ziemią podległych ochronie dostępnych części przewodzących niezależnie od uziemienia punktu neutralnego układu sieci, przewodem (PE)



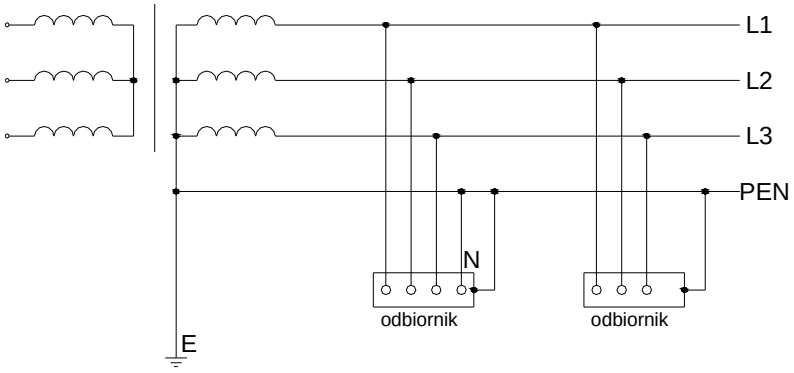
Przykład sieci typu **TT**



Przykład sieci typu **IT**

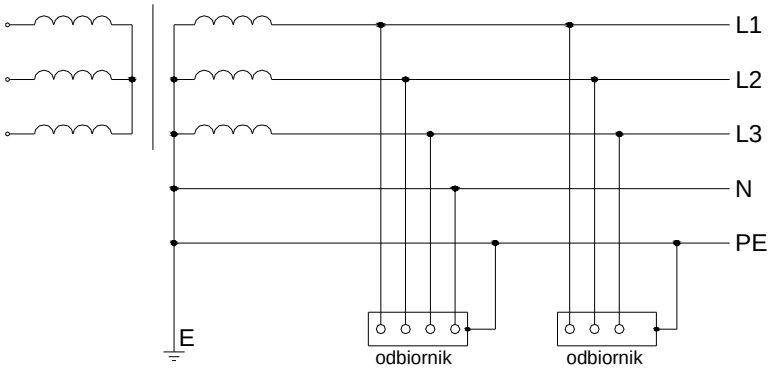
<u>Trzecia i czwarta litera</u>, określają układ przewodów neutralnych i ochronnych:

C - funkcje przewodów neutralnych i ochronnych pełni jeden przewód (PEN), w całym układzie sieci



Przykład sieci typu **TN-C**

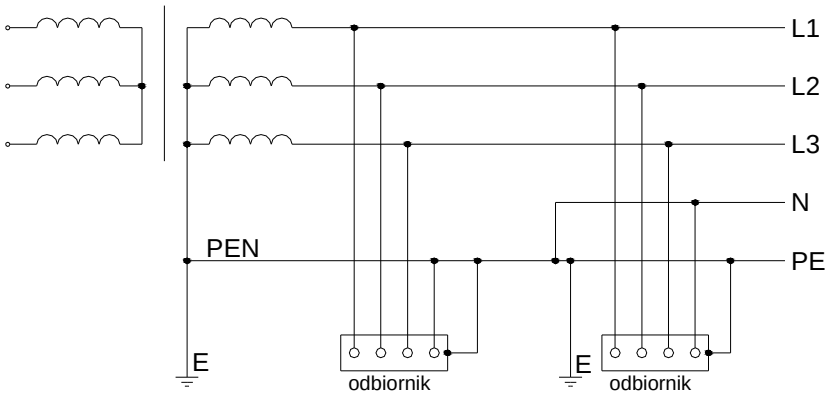
S - funkcje przewodów neutralnych (N) i ochronnych (PE) pełnią dwa oddzielne przewody w całym układzie sieci, połączone ze sobą tylko w punkcie neutralnym układu sieci



Przykład sieci typu **TN-S**

C-S - funkcje przewodów neutralnych (N) i ochronnych (PE) w jednej części układu pełni jeden przewód (PEN),

a w drugiej części układu oddzielne przewody (N) i (PE)



Przykład sieci typu **TN-C-S**

Zasilanie pomieszczeń medycznych

Współczesna medycyna jest wspierana przez nowoczesną aparaturę elektromedyczną służącą do diagnozowania, leczenia i ratowania życia ludzkiego. Ta aparatura powinna odznaczać się niezawodnością działania do czego potrzebne są bezpieczne i niezawodne źródła zasilania w energię elektryczną.
Przy tradycyjnym sposobie zasilania (sieć uziemiona), energia elektryczna może być niebezpieczna. Porażeniem zagrożeni są szczególnie ludzie chorzy, dzieci i noworodki. W trakcie zabiegów i operacji dochodzi do przerwania naturalnej bariery ochronnej, którą dla człowieka jest naskórek. Do pacjenta może być dołączonych wiele instrumentów połączonych jednocześnie liniami sygnałowymi z aparaturą rejestrującą. Uszkodzenie izolacji w którymkolwiek aparacie zasilanym z sieci tradycyjnej grozi pacjentowi porażeniem oraz spowoduje natychmiastowe wyłączenie uszkodzonego aparatu, a czasem innych aparatów dołączonych do pacjenta. Jest to niedopuszczalne.
Z tego powodu pomieszczenia medyczne powinny być zasilane przez system zasilania **IT** wykonany zgodnie z wymaganiami normy IEC 60364-7-710.
Zastosowanie tego systemu zasilania IT pomieszczeń medycznych, zapewnia bezpieczeństwo pacjentom i personelowi medycznemu ponieważ:
• każde uszkodzenie izolacji zostanie zasygnalizowane, przy czym:
– nie nastąpi przerwa w pracy uszkodzonego aparatu
– nie zostaną wyłączone inne aparaty zasilane z tej sieci
– pacjent nie będzie narażony na porażenie elektryczne
• system kontroli z wyprzedzeniem ostrzega o osłabieniu izolacji i o przekroczeniu dopuszczalnych parametrów pracy.

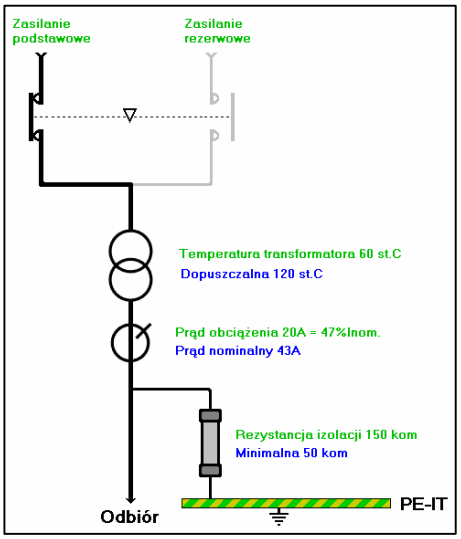
System zasilania IT ma zastosowanie w pomieszczeniach medycznych, w których:
• stosuje się aparaty służące do podtrzymywania życiowych funkcji pacjenta,
• wymagana jest wysoka niezawodność zasilania wynikająca z konieczności bezpiecznego zakończenia zabiegów • występuje szczególne zagrożenie porażeniem prądem elektrycznym
• występuje lub może wystąpić atmosfera wzbogacona w tlen,
• używa się palnych środków anestetycznych i dezynfekcyjnych,
• wymagane jest zmniejszenie prądów upływu aparatury.

Do tego typu pomieszczeń zalicza się:
• sale operacyjne wraz z pomieszczeniem przygotowawczym,
• sale gipsowe,
• sale dializ,
• sale cewnikowania serca,
• sale endoskopii, zwłaszcza wykonywanej w znieczuleniu ogólnym,
• oddziały intensywnej opieki medycznej,
• sale intensywnej opieki nad noworodkiem,
• inne, np. w gabinety kosmetyczne

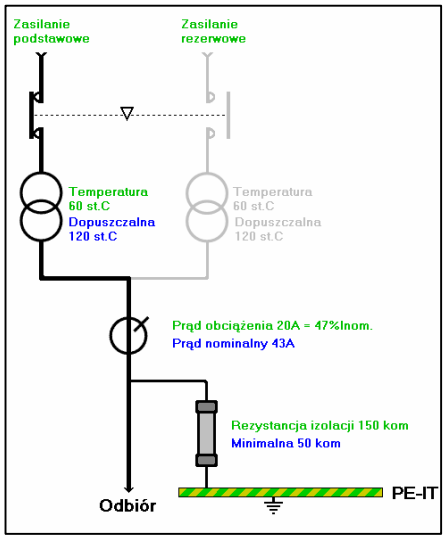
Poprawne wykonanie systemu zasilania IT w pomieszczeniach medycznych wymaga:
• doprowadzenia energii z co najmniej dwóch niezależnych źródeł o dużej niezawodności,
• zainstalowania automatycznego układu przełączającego zgodnego z normą EN 60947-6-1,
• zastosowania aparatury gwarantującej bezpieczne przełączanie i niewrażliwość na chwilowe zakłócenia występujące w liniach zasilających,
• zainstalowania urządzenia do ciągłej kontroli stanu izolacji wg wymagań norm: IEC 60364-7-710; IEC 61557-8; EN 61557-8:2002 U,
• zainstalowania urządzeń do ciągłej kontroli i sygnalizacji temperatury i obciążenia transformatora medycznego,
• wykonania odpowiedniego systemu uziemień ochronnych i połączeń wyrównawczych.
Dlatego współczesne Ośrodki Medyczne powinny posiadać taki system zasilania IT.

Firmy Elhand Transformatory z Lublińca oraz Horus Energia z Warszawy oferują kompletne zestawy zasilające pomieszczenia medyczne wykonane zgodnie z wymaganiami normy IEC 60364-7-710.

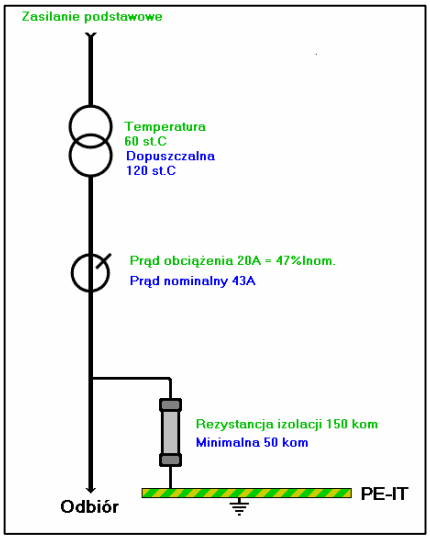
Stan normalnej pracy (nie występuje stan alarmowy) układów zasilania **IT** poglądowo przedstawiają poniższe rysunki:



HE-111



HE-112

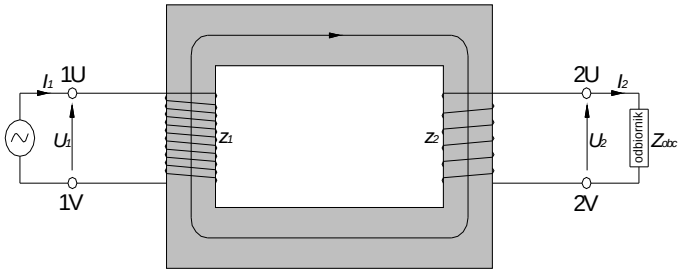


HE- 113

moduł zasilania HE 101 z transformatorem ET1MED i kasetą HE 010

Zasada działania transformatora

Zadaniem transformatora jest zmiana parametrów przesyłanej energii elektrycznej prądu przemiennego z jednego napięcia na inne, o tej samej częstotliwości. Transformator znajduje zastosowanie w przypadku konieczności dopasowania parametrów zasilania do parametrów odbiornika.
Transformator, ma minimum 2 uzwojenia oddzielone od siebie galwanicznie, nawinięte na kolumnach rdzenia zamkniętych jarzmami, przez które przenika strumień magnetyczny. Rdzeń transformatora stanowi jego obwód magnetyczny i wykonany jest z pakietu blach wzajemnie od siebie odizolowanych.



Zależnie od kierunku przepływu energii przez transformator, uzwojenia dzielą się na pierwotne i wtórne. Uzwojenie pierwotne pobiera energię ze źródła a wtórne oddaje energię do odbiornika.
Stosunek liczby zwojów w uzwojeniach Z1/ Z2 jest w przybliżeniu równy stosunkowi napięć pierwotnego do wtórnego U1/ U2 i nazywa się przekładnią transformatora J.

$$\frac{Z1}{Z2} \approx \frac{U1}{U2} = J$$

Uzwojenia transformatora można wykonać jako cylindryczne lub krążkowe, zależnie od przeznaczenia i właściwości transformatora. Materiałem stosowanym na uzwojenia jest miedź, rzadziej aluminium.
Uzwojenia są od siebie oddzielone :
- izolacją podstawową – dla transformatorów oddzielających
- izolacją dodatkową lub wzmocnioną – dla transformatorów separacyjnych

W zależności od stopnia ochrony przed porażeniem transformatory mogą być wykonane w trzech klasach ochronności (I; II; III).
W zależności od czynnika chłodzącego transformatory dzielą się na suche i olejowe (chłodzone odpowiednio: powietrzem lub olejem o obiegu naturalnym lub wymuszonym).

Dobór mocy transformatora do zasilania silnika trójfazowego

Transformator zasilający silnik powinien być tak dobrany, aby nie wpływał na zmianę parametrów silnika. Przy rozruchu silnik pobiera duży prąd, powodujący duży spadek napięcia na transformatorze i znaczne obniżenie napięcia w zasilanej sieci. To wpływa negatywnie na pracę innych odbiorów i może doprowadzić do utknięcia rozruchu silnika a także wyłączenie odbiorów załączanych stycznikami („blackout”).
Obniżenie napięcia w czasie rozruchu można ograniczyć w dopuszczalnym zakresie (najczęściej Udop ≥ 0,85xUn), stosując większy transformator i większe przekroje przewodów, ale podwyższa to koszt instalacji.

Wobec tego, w niektórych przypadkach należy szukać sposobów zmniejszenia prądów rozruchowych, aby bez potrzeby nie powiększać elementów sieci (transformatora).
Niżej przedstawiamy uproszczony dobór mocy transformatora w zależności od mocy zasilanego silnika trójfazowego. Podana na tabliczce znamionowej moc silnika jest jego znamionową mocą mechaniczną oddawaną na wale (jest to moc czynna wyrażona w kilowatach [kW]). Moc czynna pobierana przez silnik przy obciążeniu znamionowym zależy od jego sprawności i wyraża się wzorem:

$$P = \frac{P_n}{h_n}$$

gdzie: *P_n – moc mechaniczna oddawana na wale silnika*
η_n – sprawność znamionowa silnika

Prąd pobierany przez silnik przy pracy normalnej i znamionowym obciążeniu mechanicznym zależy od współczynnika mocy silnika i wyraża się wzorem:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n h_n \cos j_n}$$

gdzie: *U_n – napięcie znamionowe silnika*
$\cos \varphi_n$ – współczynnik mocy przy obciążeniu znamionowym

Całkowita moc pobierana przez silnik podczas znamionowej pracy (jest to moc pozorna wyrażona w [kVA]):

$$S_C = \frac{P_n}{h_n \cos j_n}$$

Moc transformatora zasilającego silnik trójfazowy S_T powinna być większa od mocy pobieranej przez silnik S_C wyrażonej w [kVA], zgodnie z uproszczonym wzorem :

$$S_T = k \frac{P_n}{h_n \cos j_n} > S_C$$

gdzie: k - współczynnik (k > 1)

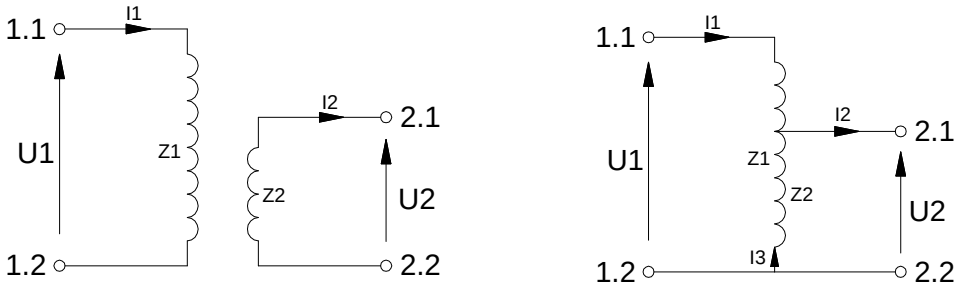
Przy doborze mocy transformatora dla silnika o małej mocy współczynnik *k* można pominąć.
Przy doborze mocy transformatora dla silnika o dużej mocy należy uwzględniać współczynnik *k* , którego wartość będzie zależała od:
- *momentu, prądu rozruchowego, czasu trwania rozruchu oraz współczynnika mocy przy rozruchu silnika, który podczas rozruchu jest znacznie mniejszy od znamionowego.*

Autotransformatory

Autotransformator jest specjalną odmianą transformatora, w której połączono uzwojenia pierwotne i wtórne rezygnując z galwanicznego rozdzielenia obwodów.
Gdy stronę pierwotną autotransformatora o liczbie zwojów Z_1 zasilimy napięciem U_1 to po stronie wtórnej o liczbie zwojów Z_2 otrzymamy napięcie U_2 zgodnie z przekładnią:

$$J = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

gdzie: J - przekładnia autotransformatora, U_1,U_2 – napięcia pierwotne i wtórne, Z_1,Z_2 – liczby zwojów uzwojeń pierwotnego i wtórnego



Schematy transformatora i autotransformatora

Na skutek galwanicznego połączenia obydwu uzwojeń uzyska się mniejsze zużycie ilości żelaza i miedzi do budowy autotransformatora. Ma to wpływ na zmniejszenie strat i wzrost sprawności autotransformatora, a w efekcie zmniejszenie masy, gabarytów i ceny.
Z porównania transformatora i autotransformatora o tych samych mocach przechodnich *(wyjściowych)* S_{PRZECH}, wynika iż autotransformator ma mniejszą moc własną *(budowy)* S_{WT} :

$$S_{WT} = S_{PRZECH} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

a zatem jest lżejszy:

$$\frac{m_A}{m_T} \approx \left(\frac{U_1 - U_2}{U_1} \right)^{\frac{3}{4}}$$

gdzie: S_{PRZECH} – moc przechodnia (wyjściowa) autotransformatora, S_{WT} – moc własna transformatora, m_A, m_T – masa odpowiednio autotransformatora i transformatora.

<u>Dla przykładu</u> : - jeśli moc przechodnia $S_{PRZECH} = 100\ kVA$;

- napięcia pierwotne i wtórne $U_1 = 230\ V,\ U_2 = 115\ V$

to - moc własna (budowy) autotransformatora $S_{WT} = 100 \cdot \left(\frac{230 - 115}{230} \right) = 50\ kVA$

- i odpowiednio stosunek masy autotransformatora do transformatora

$$\frac{m_A}{m_T} = \left(\frac{230 - 115}{230} \right)^{\frac{3}{4}} \approx 0{,}60$$

Wynika stąd że do transformacji mocy 100 kVA przy zastosowaniu autotransformatora obniżającego wystarczy rdzeń odpowiadający mocy transformatora 50 kVA, a waga autotransformatora wyniesie około 60% wagi transformatora 100 kVA.

Zmniejszenie masy i gabarytów autotransformatora stanowi jego zaletę w porównaniu z transformatorem.
Jednak autotransformatory posiadają też wady :
- galwaniczne połączenie obwodów pierwotnego i wtórnego autotransformatora, które powoduje iż wszelkie zakłócenia, przepięcia przenoszą się bezpośrednio na drodze przewodzenia do obwodu wtórnego.
- wszystkie zwarcia doziemne w sieci elektroenergetycznej są przenoszone przez autotransformatory, co może powodować ryzyko obniżenia poziomu bezpieczeństwa użytkowników.
- niższe napięcie zwarcia autotransformatora w porównaniu z transformatorem spowodowane niższą impedancją

uzwojeń autotransformatora w porównaniu z transformatorem.:

$$U_{ZA} = U_{ZT} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

gdzie: U_{ZA}, U_{ZT} – napięcia zwarcia odpowiednio autotransformatora i transformatora

Dlatego zastosowanie autotransformatorów jest ograniczone. Znajdują one zastosowanie min. w systemach elektroenergetycznych do połączeń sieci o różnych poziomach napięć, w układach rozruchu dużych silników indukcyjnych klatkowych, w zastosowaniach laboratoryjnych, wszędzie tam gdzie dopuszcza się brak galwanicznego rozdziału obwodów pierwotnego i wtórnego oraz gdzie korzyści płynące z mniejszej masy i strat przewyższają nakłady związane z ograniczeniem prądu zwarcia.
Np. nie dopuszcza się stosowania autotransformatorów do zasilania urządzeń górniczych, medycznych czy okrętowych.

Autotransformator ELHAND, typu EA3M-8/30kVA

Autotransformatory do rozruchu silników indukcyjnych

W zależności od mocy i rodzaju silników indukcyjnych ich rozruch może odbywać się przez :

- bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej,
- obniżenie napięcia zasilającego silnik (przełącznik gwiazda/trójkąt lub autotransformator),
- zwiększenie rezystancji obwodu wirnika (rozrusznik),
- zmianę liczby par biegunów (przełącznik biegunów),
- zmianę częstotliwości napięcia zasilania (przekształtnik częstotliwości)

W celu ograniczenia prądu rozruchowego silników asynchronicznych klatkowych dużych mocy, można zasilić je napięciem obniżonym przez autotransformator. Rozruch autotransformatorowy jest w założeniu podobny do rozruchu z przełącznikiem gwiazda-trójkąt. W przypadku autotransformatora możemy jednak tak obniżyć napięcie na czas rozruchu silnika, aby prąd pobierany z sieci nie przekroczył wartości zadanej.

Korzyścią tego sposobu rozruchu jest to, że maleją prądy :
- płynący w uzwojeniu silnika I_{RS} – jest mniejszy o przekładnię autotransformatora:

$$I_{RS} = I_2 = I_p / J$$

- pobierany z sieci zasilającej w czasie rozruchu I_1 – jest mniejszy o kwadrat przekładni autotransformatora:

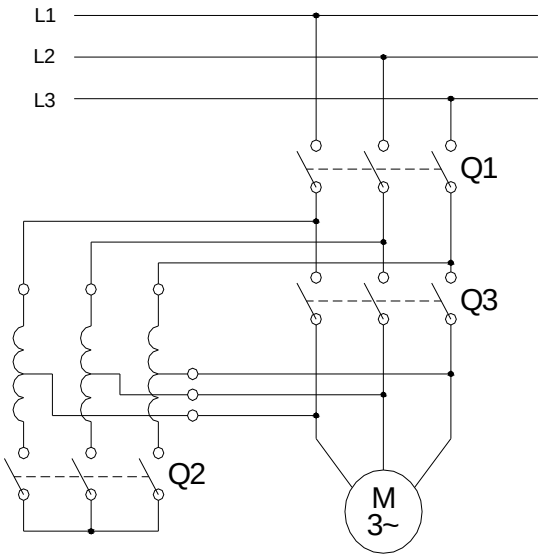
$$I_1 = I_2 \cdot \frac{1}{J} = I_p \cdot \frac{1}{J^2}$$

Wadą tego sposobu rozruchu jest to, że w takim samym stopniu co prąd pobierany z sieci maleje początkowy moment rozruchowy silnika M_{PR} :

$$M_{PR} = M_p \cdot \frac{1}{J^2}$$

gdzie: J – przekładnia autotransformatora , I_P – początkowy prąd rozruchu przy zasilaniu silnika pełnym napięciem, I_{RS} – prąd płynący w uzwojeniu silnika, I_2 – prąd wtórny autotransformatora, I_1 – prąd pierwotny autotransformatora (pobierany z sieci zasilającej), M_{PR} –początkowy moment rozruchowy silnika przy zasilaniu z autotransformatora, M_P – moment początkowy rozwijany przez silnik przy pełnym napięciu

Dlatego przy doborze przekładni autotransformatora rozruchowego należy zawsze upewnić się czy moment rozwijany przez silnik przy obniżonym napięciu jest większy od momentu oporowego napędzanej maszyny.



Układ rozruchowy silnika indukcyjnego klatkowego z autotransformatorem rozruchowym

Przedstawiony na powyższym rysunku układ, jest często stosowanym rozwiązaniem przy rozruchu silników asynchronicznych. Rozruch następuje w dwóch etapach, bez występowania przerw beznapięciowych i trwa do kilkudziesięciu sekund.
Początkowo rozruch silnika przebiega przy zasilaniu przez autotransformator obniżonym napięciem przy zwartych stykach Q1 i Q2 i rozwartym Q3.
Prąd rozruchu w tym czasie jest ograniczany przez odpowiednio dobraną przekładnię autotransformatora.
W drugim etapie przy rozwartych stykach Q2 i Q3 silnik zasilany jest z sieci przez Q1 i szeregowo włączone indukcyjności części uzwojeń autotransformatora. Uzwojenia te pełnią rolę dławików ograniczających prąd rozruchu. Po osiągnięciu przez silnik odpowiedniej prędkości obrotowej przy zwartych Q1 i Q3 silnik zasilany jest pełnym napięciem bezpośrednio z sieci.
W razie konieczności i w porozumieniu z Odbiorcą, ELHAND wykonuje autotransformatory rozruchowe z kilkoma odczepami.
Należy pamiętać że wartość prądu rozruchu jest znacznie większa od prądu znamionowego autotransformatora.
Aby nie doprowadzić do przegrzania uzwojeń autotransformatora przy wielokrotnym rozruchu, ich temperaturę należy kontrolować przy użyciu czujników temperatury wmontowanych do wnętrza uzwojenia.

Autotransformator rozruchowy ELHAND typu EA3R z czujnikami temperatury

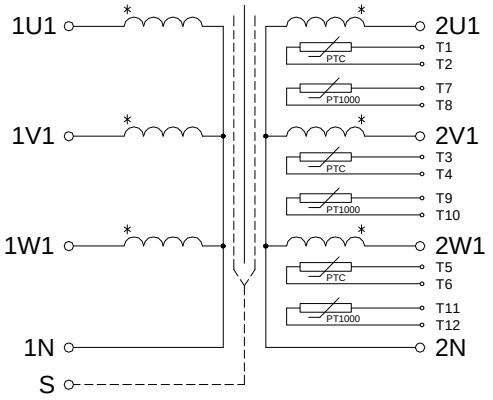
Medyczne transformatory separacyjne

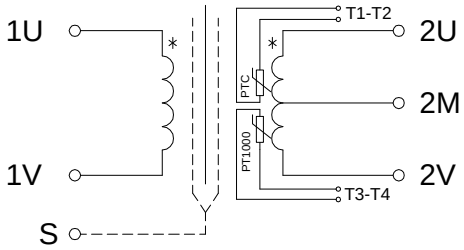
Separacyjne transformatory medyczne są podstawowym elementem zestawów zasilających izolowaną sieć elektryczną „IT” w pomieszczeniach medycznych. W oparciu o wymagania normy EN 61558-2-15, transformatorom tym stawia się bardzo wysokie wymagania techniczne decydujące o bezawaryjnej i bezpiecznej eksploatacji.
Transformatory te mogą występować w wykonaniu jednofazowym (typ ET1MED) i trójfazowym (typ ET3MED). Zakres dopuszczalnych mocy określono w w/w normie w przedziale od 0,5 do 10kVA. Ponadto, ograniczono napięcie pierwotne – zasilające, które nie powinno przekraczać 1000V, a wtórne napięcie wyznaczono maksymalnie do 250V. Częstotliwość znamionowa medycznych transformatorów separacyjnych nie powinna przekraczać 500Hz.
Aby sprostać wymaganiom dotyczącym prądów upływności, w tych transformatorach stosuje się wzmocnioną izolację. Zgodnie z normą EN 61558-2-15 prąd upływu uzwojenia wtórnego transformatora do ziemi, mierzony w stanie bez obciążenia, nie powinien przekraczać 0,5 mA. Prąd upływu z ekranu do ziemi, mierzony w stanie obciążenia, nie powinien przekraczać 3,5 mA.

Kolejne wymagania dotyczą jałowego napięcia wtórnego, prądu jałowego i napięcia zwarcia. Różnica Δ_W między napięciem wtórnym w stanie jałowym U_{WJ} a napięciem wtórnym w stanie obciążenia U_{WOB}, wyrażona w procentach napięcia wtórnego pod obciążeniem, nie powinna przekraczać 5%:

$$\Delta_W = \frac{U_{WJ} - U_{WOB}}{U_{WOB}} \cdot 100\% \leq 5\%$$

Prąd w stanie jałowym separacyjnych transformatorów medycznych powinien zostać ograniczony maksymalnie do 3% znamionowego prądu pierwotnego przy zasilaniu napięciem znamionowym, a napięcie zwarcia nie powinno przekroczyć 3% znamionowego napięcia zasilania.

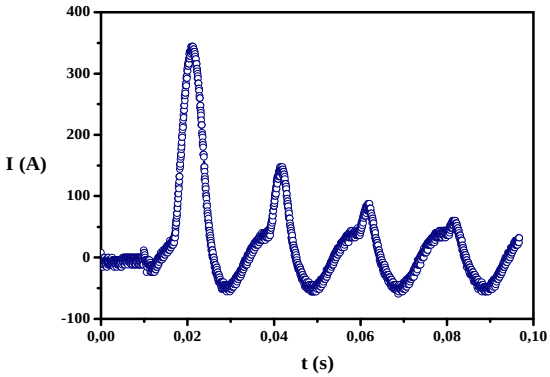


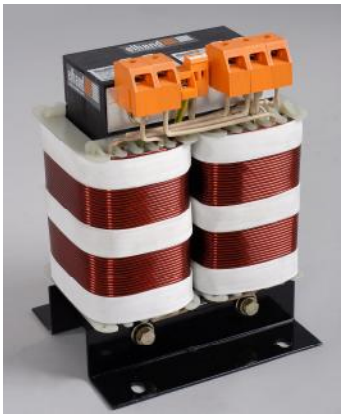


Schematy połączeń medycznych transformatorów separacyjnych typu ET3MED i ET1MED

Transformatory medyczne w stanach awaryjnych mogą pracować w przeciążeniu. Dopuszcza się przeciążenie na poziomie 1,6xIn w czasie jednej godziny lub 2xIn w czasie 30min. Nadzór nad temperaturą pracy transformatora sprawuje przekaźnik współpracujący z czujnikami temperatury. Transformatory medyczne typu ET1MED oraz ET3MED wyposażone są w czujniki temperatury PTC oraz PT1000 zamontowane w uzwojeniach, które pozwalają w skuteczny sposób kontrolować pracę transformatora.

Ważnym parametrem, na który zwraca uwagę norma EN 61558-2-15 jest prąd włączania udarowego. Przywołana norma wymaga, aby sama konstrukcja transformatora, bez zastosowania dodatkowych elementów w instalacji, ograniczała wartość prądu włączania udarowego do 12-to krotnej wartości szczytowej znamionowego prądu pierwotnego.





Przykładowy prąd włączania udarowego transformatora ELHAND typu ET1MED-6,3kVA w stanie obciążenia

Transformatory przekształtnikowe

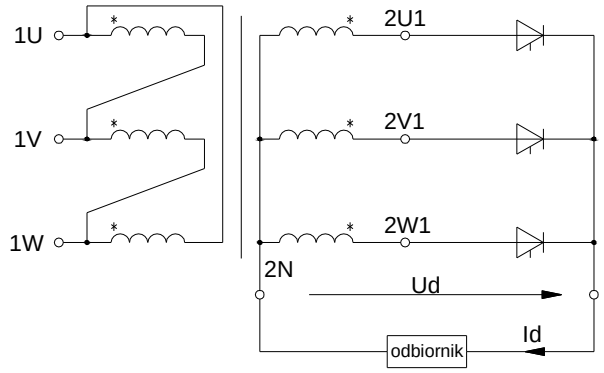
Układy przekształtnikowe zasilane są najczęściej za pośrednictwem transformatorów o parametrach dostosowanych do wymagań przekształtników.

Transformatory przekształtnikowe pracują w skrajnie trudnych warunkach. Ich prądy wtórne zawierają bardzo dużo harmonicznych. Skład jakościowy oraz ilościowy harmonicznych prądu zależy od układu przekształtnika, w którym transformator pracuje. W układach przekształtników z przewodem neutralnym prąd po stronie wtórnej transformatora przybiera kształt jednokierunkowych impulsów prostokątnych. Powoduje to podmagnesowanie rdzenia strumieniem zawierającym składową stałą. Jest to efekt niekorzystny z punktu widzenia energetycznego transformatora.

Transformatory przekształtnikowe są z reguły większe gabarytowo oraz cięższe od typowych transformatorów zasilających. Różnice te wynikają z celowego obniżenia indukcji w rdzeniu transformatora jeszcze na etapie projektu. Jest to podyktowane koniecznością ograniczenia nadmiernych strat powodowanych niezwykle wysoką zawartością wyższych harmonicznych w prądzie wtórnym.

Od transformatorów przekształtnikowych wymaga się aby oprócz dopasowania poziomu napięcia do wymogów odbiornika realizowały również ochronę zaworów przekształtnika. Transformatory przekształtnikowe posiadają znaczną indukcyjność rozproszenia, która ogranicza stromość narastania prądu przewodzenia tyrystorów. Mają też wzmocnioną izolację zwojową. Te właściwości powodują, że transformatory przekształtnikowe mają większe gabaryty i cenę w porównaniu z tradycyjnymi.

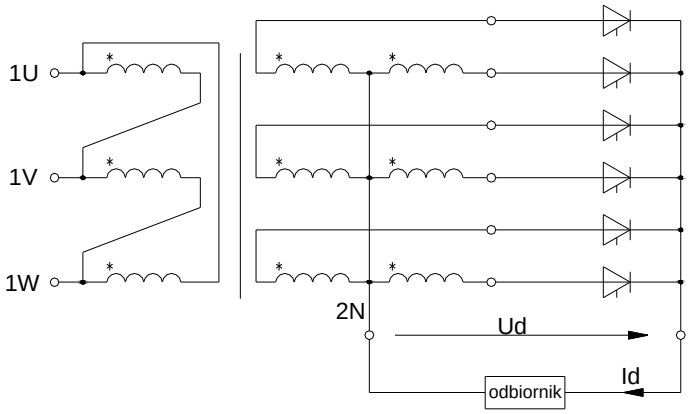
W zależności od układu przekształtnika, trójfazowe transformatory przekształtnikowe produkowane są w wielu odmianach. Jedną z najprostszych konstrukcji jest transformator dla układów przekształtników trójpulsowych. Uzwojenia pierwotne tych transformatorów najczęściej połączone są w trójkąt wtórne natomiast w gwiazdę z wyprowadzonym zaciskiem neutralnym (grupa Dyn):



Schemat przekształtnika 3-pulsowego z przewodem neutralnym

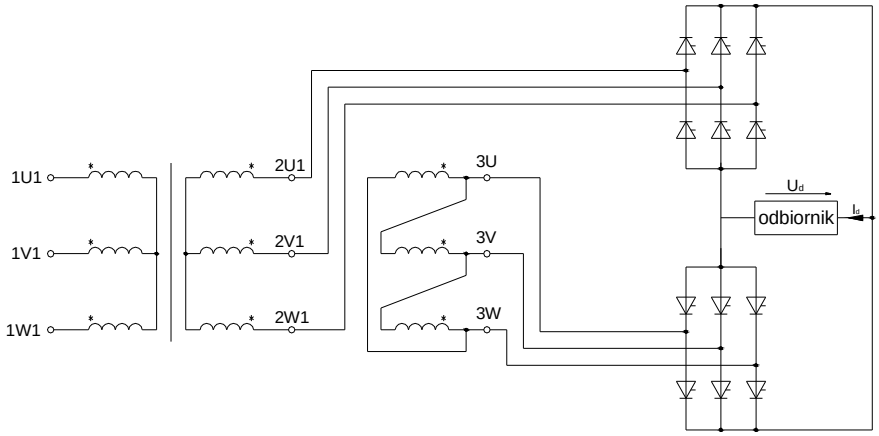
Więcej zastosowań znajdują transformatory wykonywane dla układów sześciopulsowych. Układ taki zasila się poprzez transformator lub dławiki sieciowe. Transformator stosuje się wtedy gdy konieczne jest dopasowanie napięcia wyjściowego przekształtnika do wymaganego napięcia odbiornika. Układ mostkowy przekształtnika nie wymaga wyprowadzenia przewodu neutralnego po stronie wtórnej transformatora, a jego uzwojenia mogą tworzyć następujące układy połączeń: Yy, Yd ,Dy, Dd.

Następnym rozwiązaniem konstrukcyjnym może być specjalny transformator do zasilania przekształtnika sześciofazowego. Uzwojenia pierwotne tego transformatora tworzą trójkąt, uzwojenia wtórne natomiast skojarzone są w układ sześciofazowy z wyprowadzonym zaciskiem neutralnym :



Schemat przekształtnika 6-pulsowego z wyprowadzonym przewodem neutralnym

Kolejną liczną grupą transformatorów przekształtnikowych są transformatory pracujące w układach przekształtników złożonych wielopulsowych:



Schemat przekształtnika złożonego 12-pulsowego

Transformatory okrętowe i dla przemysłu stoczniowego

Transformatory znajdują wiele zastosowań w przemyśle okrętowym i stoczniowym. Mogą pracować na lądzie w urządzeniach stoczniowych jak i na jednostkach pływających we wszystkich strefach klimatycznych, zasilając obwody sterowania, oświetlenia czy realizując rozruch silników sterów strumieniowych.
Dlatego powinny spełniać obostrzone wymagania pracy (odporność na wibracje, udar, warunki klimatyczne), różniąc się rozwiązaniami konstrukcyjnymi od transformatorów do zastosowań lądowych.

Okrętowe transformatory mocy

Transformatory tego przeznaczenia powinny spełniać wymagania norm EN(IEC) 61558 i EN(IEC)60726, a także wymagania oddzielnych przepisów morskich towarzystw klasyfikacyjnych, nadzorujących budowę lub remont statku.
Bez uznania lub bez certyfikatu tych towarzystw, zainstalowanie transformatorów na statku nie jest możliwe.
Statki budowane są najczęściej pod nadzorem n/w towarzystw klasyfikacyjnych:

- ABS – American Bureau of Shipping - USA
- BV – Bureau Veritas - Francja
- CCS – China Classification Society - Chiny
- DNV – Det Norske Veritas - Norwegia
- GL – Germanischer Lloyd - Niemcy
- LR – Lloyds Register of Shipping - Wielka Brytania
- NKK – Nippon Kaiji Kyokai - Japonia
- RINA – Registro Italiano Navale - Włochy
- PRS – Polski Rejestr Statków - Polska
- RMRS – Russian Maritime Register of Shipping - Rosja

Dla potrzeb okrętów Marynarki Wojennej NATO, transformatory powinny także posiadać certyfikat;

- AQAP – wydawany przez Wojskową Instytucję Narodową kraju należącego do NATO.

Okrętowy transformator mocy ELHAND typu ET3SM w obudowie IP23

Autotransformatory rozruchowe sterów strumieniowych

Autotransformatory rozruchowe typu EA3RM-COMPACT służą do rozruchu silników sterów strumieniowych. Autotransformatory te współpracują z silnikami o mocach od kilku kW do kliku MW. Poziomy napięć na odczepach, czas trwania rozruchu i wszelkie parametry określające warunki pracy maszyny są szczegółowo uzgadniane w fazie projektowania.

Metodę rozruchu za pomocą autotransformatora rozruchowego wykorzystuje się zwłaszcza w napędach dużych mocy gdy parametrem krytycznym jest prąd pobierany z sieci podczas rozruchu. W przypadku autotransformatora rozruchowego możemy dowolnie obniżyć napięcie na czas rozruchu silnika poprzez odpowiedni dobór przekładni, tak aby prąd pobierany z sieci nie przekroczył wartości zadanej.

Korzyści rozruchu autotransformatorowego :

- maleje prąd płynący w uzwojeniu silnika I_{RS} – jest mniejszy o przekładnię autotransformatora:

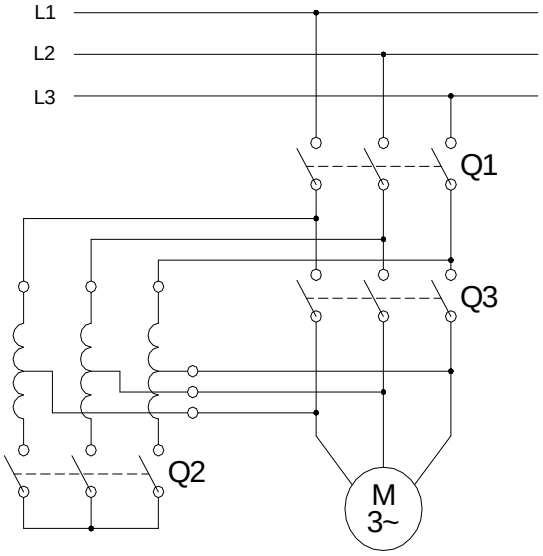
$$I_{RS} = I_2 = I_p \cdot J$$

- maleje prąd pobierany z sieci zasilającej w czasie rozruchu I_1 – jest mniejszy o kwadrat przekładni autotransformatora:

$$I_1 = I_2 \cdot \frac{1}{J} = I_p \cdot \frac{1}{J^2}$$

- eliminuje się możliwość wyłączenia urządzeń statku, na skutek zbyt niskiego napięcia powstającego podczas bezpośredniego rozruchu silnika steru.

gdzie: J – przekładnia autotransformatora , I_P – początkowy prąd rozruchu przy zasilaniu silnika pełnym napięciem, I_{RS} – prąd płynący w uzwojeniu silnika, I_2 – prąd wtórny autotransformatora, I_1 – prąd pierwotny autotransformatora (pobierany z sieci zasilającej)



Układ rozruchowy silnika indukcyjnego z autotransformatorem rozruchowym

Rozruch następuje bez występowania przerw beznapięciowych, w dwóch etapach.

Początkowo rozruch silnika przebiega przy zasilaniu przez autotransformator obniżonym napięciem przy zwartych stykach Q1 i Q2 i rozwartym Q3.

Prąd rozruchu w tym czasie jest ograniczany przez odpowiednio dobraną przekładnię autotransformatora.

W drugim etapie przy rozwartych stykach Q2 i Q3 silnik zasilany jest z sieci przez Q1 i szeregowo włączone indukcyjności części uzwojeń autotransformatora. Uzwojenia te pełnią rolę dławików ograniczających prąd rozruchu. Po osiągnięciu przez silnik odpowiedniej prędkości obrotowej przy zwartych Q1 i Q3 silnik jest zasilany pełnym napięciem bezpośrednio z sieci.

Autotransformator rozruchowy ELHAND sinika steru strumieniowego typu EA3RM-COMPACT

Transformatory bezpieczeństwa dla brygad pracujących w dokach stoczniowych
W odpowiedzi na zapotrzebowanie przemysłu stoczniowego ELHAND opracował projekt przenośnego, trójfazowego transformatora bezpieczeństwa. Transformatory typu ET3oM przeznaczone są do zasilania napięciem bezpiecznym 42 lub 24 V, wydzielonych stanowisk roboczych w dokach stoczniowych. Zasilają urządzenia i elektronarzędzia używane przez brygady remontowe.
Przenośne transformatory bezpieczeństwa typu ET3oM produkujemy w wykonaniu morskim, w pierwszej klasie ochronności. Spełniają wymagania normy EN 61558 i przepisów PRS. Konstrukcyjnie transformator jest przystosowany do trudnych warunków stoczniowych oraz ma zwiększoną odporność na uszkodzenia mechaniczne. Ponadto szczelna obudowa o stopniu ochrony IP54 zabezpiecza transformator przed oddziaływaniem zanieczyszczeń i wilgoci.

Przenośny, trójfazowy transformator bezpieczeństwa ELHAND typu ET3oM do zasilania urządzeń ręcznych

Transformatory z uzwojeniami w konfiguracji Vv

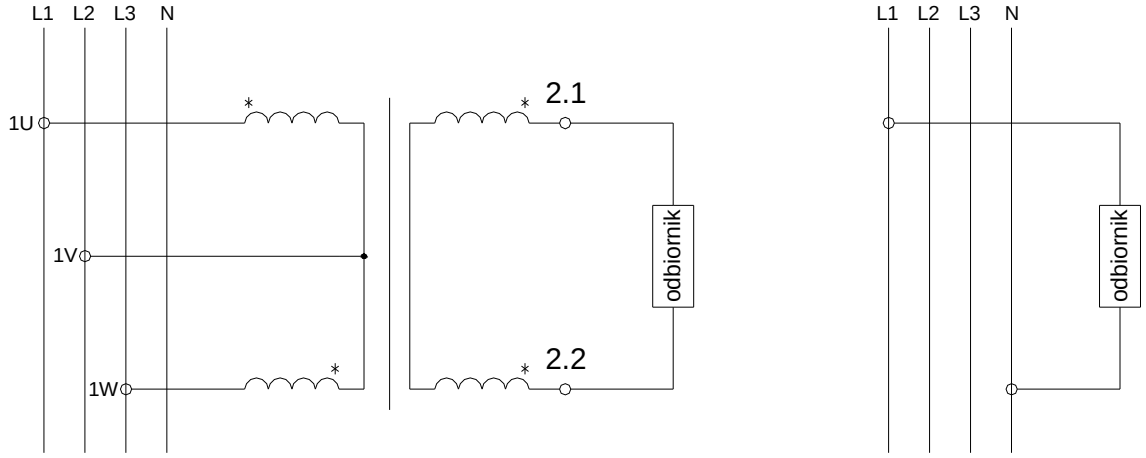
Transformator z uzwojeniami w konfiguracji **Vv** może zmniejszyć niekorzystną asymetrię występującą w przypadku zasilania odbiornika jednofazowego z sieci trójfazowej.

Transformator specjalny typu ET3V1

Problem zachowania symetrii obciążenia pojawia się szczególnie wtedy jeśli z sieci trójfazowej należy zasilić jednofazowy odbiornik o dużej mocy.

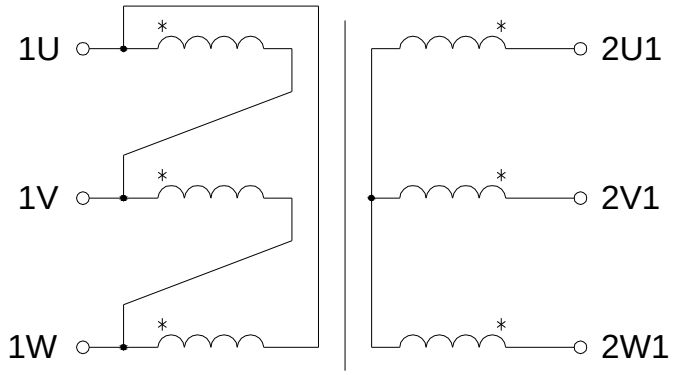
Tradycyjne zasilanie takich odbiorników napięciem międzyfazowym trójfazowej sieci wywołuje silną asymetrię w sieci elektrycznej, obciążając jedynie dwie fazy.

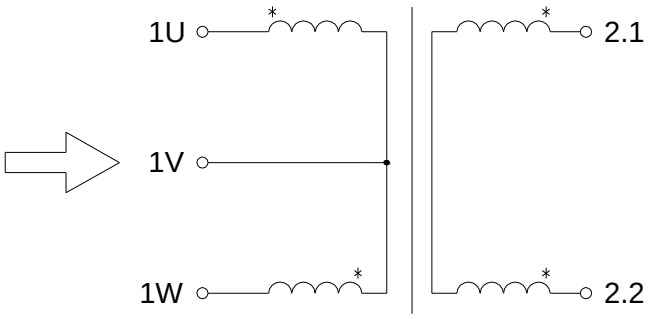
Z rysunku nr 1 wynika, że po zastosowaniu transformatora typu ET3V1, obciążone są wszystkie trzy fazy sieci zasilającej. W przedstawionym rozwiązaniu również występuje asymetria obciążenia, jednak znacznie mniejsza niż podczas zasilania odbiornika jednofazowego bezpośrednio z sieci. Poza tym z punktu widzenia bezpieczeństwa obsługi odbiornika, korzystne jest także galwaniczne rozdzielenie obwodów transformatora.



Rys.1 Zwiększenie symetrii obciążenia po zastosowaniu transformatora typu ET3V1

Poprawne zabezpieczenie przeciążeniowe i zwarciowe transformatora Vv po stronie pierwotnej może powodować pewne trudności, ze względu na dwukrotnie większy prąd w fazie środkowej. W tej sytuacji należy wykonać obliczenia zwarciowe uwzględniając specyfikę konstrukcji transformatora, a następnie dobrać wkładki topikowe indywidualnie dla każdej fazy.





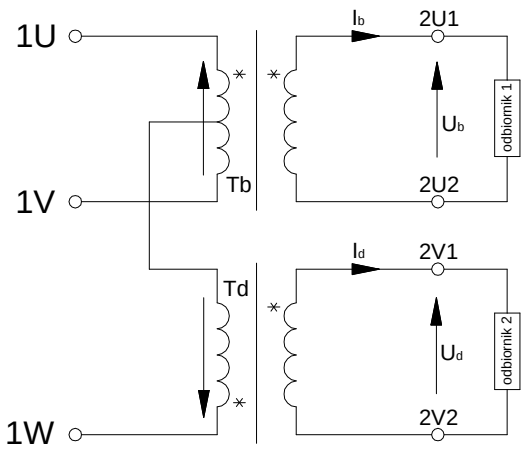
Rys.2 Konfiguracja połączeń uzwojeń transformatora typu ET3V1

Transformator z uzwojeniami w układzie Vv trudno jednoznacznie zakwalifikować do transformatorów jedno- lub trójfazowych. Transformator taki zasilany jest napięciem z sieci trójfazowej natomiast obciążenie stanowi odbiornik jednofazowy. Transformator ten powstał poprzez modyfikację grupy połączeń Dy. Usunięte zostały uzwojenia pierwotne i wtórne z środkowej kolumny transformatora. Pozostałe dwie skrajne cewki połączono w konfiguracji Vv przedstawionej na rysunku 2.
Podstawową zaletą tak powstałego transformatora jest zdecydowane ograniczenie asymetrii obciążenia, co decyduje o zastosowaniu w technicznie trudnych sytuacjach, np.: do zasilania jednofazowych urządzeń podtrzymania napięcia (UPS) z sieci trójfazowej.
Specyficzna konstrukcja wpływa na parametry użytkowe maszyny.

Transformator ELHAND typu ET3V1

Transformatorowy układ Scotta

Połączenia między dwoma różnymi obwodami elektrycznymi, lub między odbiornikiem a siecią elektryczną często realizuje się stosując elementy pośredniczące. Urządzenia te dopasowują parametry energii elektrycznej lub konfigurację sieci zasilającej do potrzeb odbiornika. Takim przykładem elementu pośredniczącego w połączeniu sieć – odbiornik jest transformatorowy układ Scotta.
Tworzą go jednofazowe transformatory pracujące w konfiguracji przedstawionej na poniższym rysunku. Jest on przykładem dopasowania trójfazowej sieci zasilającej oraz odbiornika dwufazowego lub grupy odbiorników jednofazowych.

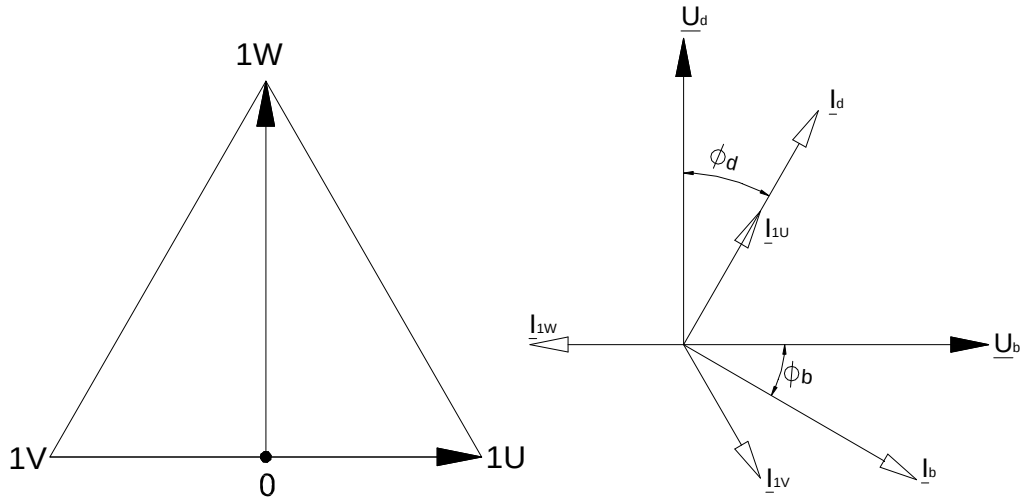


Schemat połączeń transformatorowego układu Scotta

Transformatory, bazowy T_b i dodawczy T_d są jednofazowymi transformatorami o tych samych mocach. Po środku uzwojenia pierwotnego transformatora T_b wykonuje się odczep, który służy do połączenia z końcem uzwojenia pierwotnego transformatora T_d. Aby napięcia wtórne U_d i U_b transformatorów były równe, co do modułu transformatory muszą być zasilane z sieci symetrycznej oraz liczby zwojów uzwojeń pierwotnych muszą zachować następującą proporcję:

$$\frac{U_{1W-0}}{U_{1U-1V}} \approx \frac{Z_{1d}}{Z_{1b}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow Z_{1d} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot Z_1$$

Jeśli konstrukcyjnie zapewniona zostanie taka proporcja pomiędzy zwojami pierwotnymi transformatorów, to przy równych liczbach zwojów uzwojeń wtórnych $Z_{2d}=Z_{2b}$ uzyska się identyczne napięcia wtórne transformatorów $U_d=U_b$. W takim przypadku moduły prądów I_{1U}, I_{1V} oraz I_{1W} będą równe, a kąt przesunięcia fazowego między nimi wyniesie $2\pi/3$.



Wykres topograficzny napięć oraz wykres wektorowy układu

Ważną zaletą układu Scotta jest fakt, że przy symetrycznym obciążeniu dwufazowym również symetrycznie obciążona jest trójfazowa sieć zasilająca.

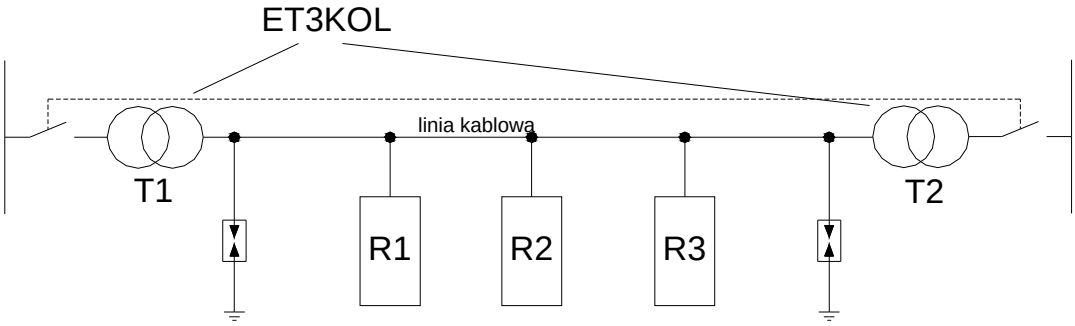
Transformatory pracujące w układzie Scotta znajdują częste zastosowanie w elektrotermii.

Transformatory dla kolei

Zasilanie kolejowych przytorowych obwodów elektrycznych ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji, odbywa się, najczęściej za pośrednictwem transformatorów separacyjnych, których parametry i konstrukcja dostosowane są do zmiennych i trudnych warunków pracy.

Najczęściej są stosowane do zasilania urządzeń blokad liniowych, do podgrzewania rozjazdów kolejowych oraz zasilania obwodów sterowania ruchem kolejowym.

Transformatory zasilające urządzenia samoczynnych blokad liniowych:
Transformatory te zasilają urządzenia sterowania ruchem kolejowym



Transformator ELHAND do zasilania blokad liniowych typu ET3KOL-16kVA

Samoczynne blokady liniowe stosowane są w PKP na liniach o dużym natężeniu ruchu. Dzięki nim uzyskuje się zwiększenie przepustowości szlaku na którym zastosowano ten typ urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Dzięki swojej budowie, zapewniają większe niż inne dawniej stosowane urządzenia liniowe bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Warunkiem tego jest uzyskanie bezawaryjnego zasilania. Taką rolę pełnią obwody automatyki przemysłowej które z transformatorami zasilającymi stanowią całość.
Zasilanie odbywa się poprzez transformatory separacyjne typu ET3KOL. Transformatory instalowane są na obu krańcach linii zasilającej. Gwarantuje to rezerwę zasilania blokad w wypadku wystąpienia awarii jednego z nich. Odpowiednią sekwencją łączeń transformatorów steruje układ automatyki. Trójfazowe transformatory separacyjne w wykonaniu kolejowym ET3KOL dzięki specjalnej budowie oraz bardzo skutecznej impregnacji próżniowej przystosowane są do pracy w każdej strefie klimatycznej. Ograniczniki przepięć w połączeniu ze wzmocnioną izolacją powodują iż transformatory te odporne są na przepięcia łączeniowe oraz atmosferyczne. Duża odporność na przepięcia od strony zasilania podczas wyładowań atmosferycznych zmniejsza ilość występujących uszkodzeń elektroniki przytorowej, stosowanej w elementach oddziaływania tor-pojazd. W wyniku zastosowania tych transformatorów, uzyskuje się obniżenie kosztów eksploatacji (eliminacja napraw nadajników).

Transformatory zasilające systemy elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych EOR:
Transformatory zasilające systemy do ogrzewania rozjazdów kolejowych (EOR) są nietypowymi transformatorami separacyjnymi. Przystosowane są do eksploatacji w środowisku o bardzo dużej wilgotności oraz znacznych rocznych i dobowych amplitudach temperatur. Pracują zwykle w zespołach kilku transformatorów separujących obwody grzałek elektrycznego ogrzewania rozjazdów kolejowych. Są to układy najczęściej bezobsługowe, umieszczone w studzienkach lub skrzyniach na obrzeżach torowiska.
Pracują w zakresie temperatur otoczenia od -40°C do +10°C. Możliwa jest ich praca przy 20%-ym trwałym przeciążeniu bez szkody dla izolacji. Dodatkowo transformatory zalewane są żywicą – co sprawia, że są one wodoszczelne i całkowicie odporne na obecność wody mogącej pojawić się w skrzynce montażowej.
W odróżnieniu od transformatorów toroidalnych, mają niewielkie prądy załączania, ograniczone na etapie projektu. Mogą być zabezpieczane zwarciowo wyłącznikami nadprądowymi S301 o charakterystyce typu C.

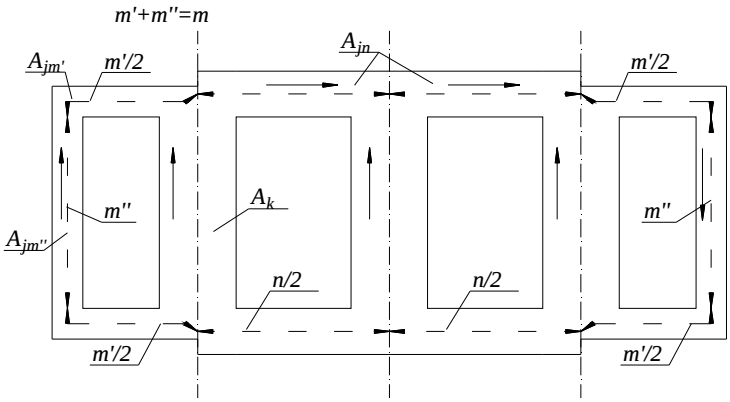
Transformator ELHAND do zasilania ogrzewania rozjazdów typu ET1KOLŻ-2,5kVA

Transformatory zasilające obwody sterowania ruchem kolejowym:
Te transformatory spełniają odpowiedzialną rolę w urządzeniach zabezpieczenia ruchu kolejowego.
Ich parametry techniczne muszą spełniać wymagania normy EN(IEC)61558 a także zaostrzone wymagania norm branżowych, dotyczące: prądów jałowych, odporności na zwarcia i przeciążenia czy temperatury pracy.
Nasza firma produkuje transformatory przeznaczone do zasilania kolejowych obwodów sterowania o mocach od 40 do 500 VA, typu ET1KOL.

Transformator ELHAND do zasilania kolejowych obwodów sterowania typu ET1KOL-0,70 kVA

Transformator pięciokolumnowy

W wielu projektach występuje konieczność dostosowania gabarytów transformatora do istniejącej obudowy maszyny. Konstrukcja rdzenia pięciokolumnowego pozwala na zmniejszenie wysokości transformatora.
W rdzeniu pięciokolumnowym występują dwie zewnętrzne nie uzwojone kolumny stanowiące przedłużenie oraz połączenie jarzma dolnego z górnym. Zastosowanie takiego magnetowodu w trójfazowym transformatorze pozwala przy zachowaniu pełnej mocy transformatora i niezmienionych wymiarach kolumn zmniejszyć przekrój jarzm do ok. 60% przekroju jarzma w typowym rdzeniu trójkolumnowym.
W ten sposób uzyskujemy zmniejszenie wysokości transformatora o ok. 80% wysokości jednego jarzma.



Szkic ogólny rdzenia pięciokolumnowego.

Powyższy szkic przedstawia rdzeń trójfazowego transformatora pięciokolumnowego. Wyodrębniono części jarzmowe o różnych długościach (m`, m``, n), oraz różnych polach przekroju (Ajm`, Ajm``, Ajn).

W praktyce stosuje się kilka różnych konstrukcji rdzenia pięciokolumnowego:

- jednakowe przekroje wszystkich odcinków jarzmowych, równe od 50-58% przekroju kolumny (oznaczenie np 50/50)
- jarzma miedzy kolumnami głównymi o przekroju ok. 58%, a przekroje jarzm powrotnych ok. 45% przekroju kolumny (oznaczenie 58/45)
- przekroje wszystkich poziomych odcinków jarzm wynoszą ok. 58% przekroju kolumny, a przekroje pionowych odcinków jarzm powrotnych wynoszą ok.45% przekroju kolumny. (oznaczenie 58/58-45)

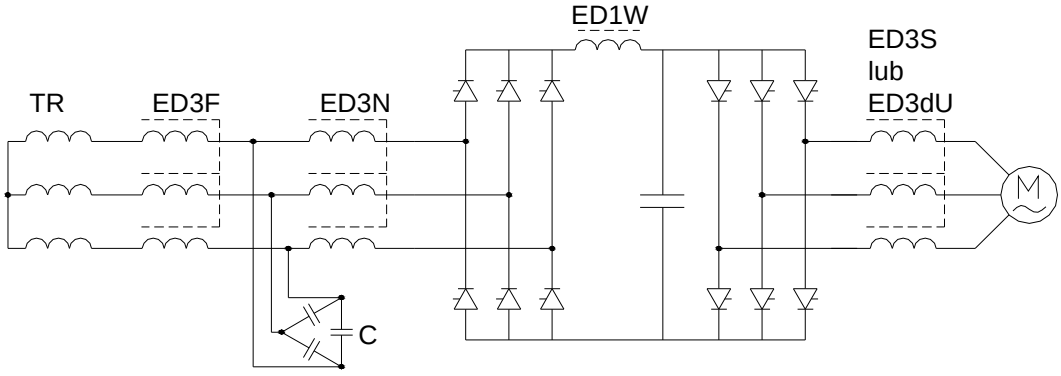
W produkowanych przez naszą firmę transformatorach pięciokolumnowych często stosujemy jednakowe przekroje wszystkich odcinków jarzmowych równe połowie przekroju kolumny – proporcja 50/50. W rozwiązaniu takim indukcja maksymalna jarzm kolumnowych wypada ok. 5% większa a w jarzmach domykających 5-10% mniejsza niż w kolumnach .

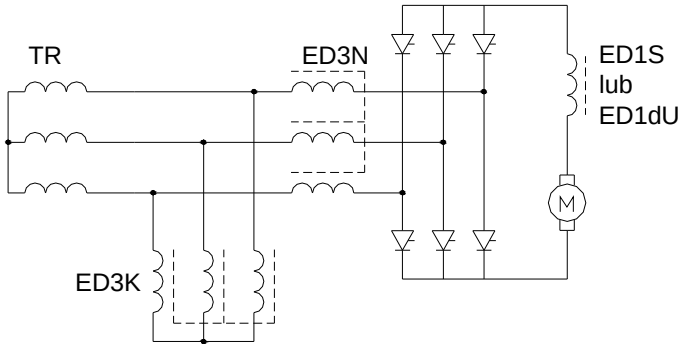
Proporcja wymiarowa rdzenia 50/50 zapewnia największą oszczędność materiału oraz optymalne dopasowanie rozmiarów transformatora do istniejącego korpusu maszyny.
Jarzma domykające w pięciokolumnowej konstrukcji rdzenia mogą stanowić drogę o niskiej reluktancji dla strumieni trzeciej harmonicznej i jej wielokrotności. Przepływ strumieni trzeciej harmonicznej powodowałby silne zniekształcenie strumieni w uzwojonych kolumnach, czego efektem byłaby niesinusoidalność napięć fazowych. Aby temu zapobiec należy pamiętać o połączeniu uzwojenia pierwotnego lub wtórnego transformatora w trójkąt(D), lub uzwojenia pierwotnego w gwiazdę z przewodem zerowym (YN).

Transformator pięciokolumnowy ELHAND typ ET3oGH

Dławiki rdzeniowe - informacje ogólne

Dławiki rdzeniowe stały się nieodłącznym elementem nowoczesnych układów energoelektroniki i energetyki. Możliwe miejsca pracy dławików rdzeniowych w układzie przedstawiają poniższe rysunki:





Dławiki z rdzeniami z blachy elektrotechnicznej znajdują zastosowanie w zakresie częstotliwości do kilkuset herców. Podstawowe parametry dławików to indukcyjność oraz prąd znamionowy, które dla dławików o tej konstrukcji w wykonaniu naszej firmy ELHAND, mieszczą się w granicach od kilkudziesięciu (µH) do kilkuset (mH) oraz od kilku do kilkuset (A). W obwodach prądu przemiennego dławiki z rdzeniami stalowymi stosowane są w dolnoprzepustowych filtrach napięć wyjściowych lub w filtrach selektywnych LC umożliwiających eliminację wybranych harmonicznych prądu. W obwodach prądu stałego dławiki stosuje się najczęściej do wygładzania charakterystyk napięć i prądów wyjściowych prostowników oraz do zapewnienia w szerokim zakresie pracy przekształtnika, ciągłego przebiegu prądu wyprostowanego. Na uwagę zasługuje również zastosowanie dławików indukcyjnych do kompensacji mocy biernej pojemnościowej.

1. Dławiki sieciowe typu ED1N i ED3N

Przekształtniki są odbiornikami, które najczęściej wymagają zastosowania dławików sieciowych w obwodach łączących przekształtnik z siecią zasilającą. Dławiki te pełnią rolę ochronną zarówno w stosunku do samego przekształtnika jak i sieci zasilającej. Zawory układów przekształtnikowych potrzebują ochrony zapewniającej powstrzymanie narastania prądu przewodzenia do chwili przełączenia struktury PNPN w stan przewodzenia. W takich układach zachodzi konieczność stosowania dławików sieciowych.
Zastosowanie dławików sieciowych w układach przekształtników powoduje również osłabienie wzajemnego oddziaływania przekształtników zasilanych z tego samego transformatora, podczas komutacji. Użycie dławików powoduje spadek amplitudy impulsu prądu wstecznego przy wyłączaniu zaworu , przepięć komutacyjnych oraz mocy wydzielanej w obwodach tłumiących. Proces komutacji przebiega więc znacznie łagodniej. Dławiki sieciowe zabezpieczają ponadto sieć zasilającą przed niekorzystnym wpływem przekształtników ograniczając propagacje wyższych harmonicznych w sieci. W wypadku dławików sieciowych należy zwrócić uwagę, aby charakterystyka magnetowodu uniemożliwiała wejście dławika w stan nasycenia w całym zakresie spodziewanych prądów odbiornika.

2. Dławiki silnikowe typu ED1S i ED3S

Dławiki silnikowe znajdują szerokie zastosowanie w przekształtnikowych układach napędowych zarówno prądu stałego jak i przemiennego. Są instalowane w obwodach łączących przekształtnik z silnikiem. W zależności od rodzaju układu napędowego, z którym współpracują mają do spełnienia wiele zadań min. zapewnienie ciągłości oraz wygładzenie pulsacji prądu silnika, minimalizację prądu zwarciowego w obwodzie obciążenia przekształtnika jak również ograniczenie przepięć komutacyjnych i kompensację pojemności linii zasilającej.

2.1. Zadania dławików silnikowych w sterowanych układach prostownikowych

Tętnienie prądu wyprostowanego w obwodzie silnika zasilanego przez prostownik sterowany powoduje iskrzenie pod szczotkami oraz utrudnia proces komutacji.
Brak ciągłości przebiegu prądu w obwodzie zasilającym silnik powoduje niekorzystne zmiany w przebiegu charakterystyk mechanicznych silnika oraz prowadzi do pogorszenia własności dynamicznych napędu. Z tego powodu, jednym z ważniejszych zadań dławika silnikowego ED1S jest zapewnienie jak najszerszego zakresu przewodzenia prądu ciągłego w obwodzie wyjściowym przekształtnika. Prąd ten przyjmuje charakter nieciągły tym częściej im mniejsze są wartości prądu i indukcyjności obciążenia.

2.2. Rola dławików silnikowych w układach napędowych prądu przemiennego

Napięcia wyjściowe przekształtników to ciąg prostokątnych impulsów o regulowanej szerokości i częstotliwości. Szybkość narastania impulsów przebiegu napięcia jest bardzo duża i stwarza zagrożenie dla izolacji zasilanych maszyn. Ograniczenie szybkości narastania napięcia a w konsekwencji ryzyka uszkodzenia izolacji silnika uzyskuje się umieszczając pomiędzy silnikiem a falownikiem dławik silnikowy typu ED3S.
Dławiki silnikowe ED3S stosowane są również w celu ograniczenia prądów zwarciowych do czasu zadziałania zabezpieczeń i wyłączenia prądu w obwodzie. Najczęściej dobór odpowiedniej indukcyjności dławika silnikowego jest jedyną możliwością ochrony zaworów układów przekształtnikowych. Dobór indukcyjności dławika silnikowego ED3S uzależniony jest od maksymalnej wartości prądu zwarciowego w układzie. Prąd ten nie może przekraczać niepowtarzalnej, szczytowej wartości prądu tyrystora I_{TSM}.

W praktyce często zachodzi konieczność doprowadzenia napięcia do napędów znacznie oddalonych od źródła zasilania. Długie linie zasilające posiadają duże pojemności, które przyczyniają się do znacznego wzrostu strat mocy w obwodzie. Dławik silnikowy ED3S oprócz ochrony izolacji maszyny kompensuje pojemność linii zasilającej oraz ogranicza harmoniczne i przepięcia komutacyjne w obwodzie silnika.

3. Dławiki filtrów pasywnych oraz dławiki ochronne baterii pojemnościowych

3.1. Dławiki filtrów pasywnych typu ED3LC

Wprowadzenie przekształtników tyrystorowych do zasilania i sterowania maszyn elektrycznych dużych mocy spowodowało pojawienie się wyższych harmonicznych przedostających się do sieci w czasie pracy przekształtnikowych układów napędowych. W celu ograniczenia niekorzystnego wpływu układów przekształtnikowych na sieć elektryczną, a także na pracę baterii kondensatorowych które mogą być podłączone do tej sieci, stosuje się układy filtrów wyższych harmonicznych.
Filtry to szeregowe układy rezonansowe LC włączone równolegle w obwód zasilania przekształtnika, które spełniają podwójną rolę – kompensują moc bierną pobieraną przez układ napędowy oraz zapobiegają przedostawaniu się wyższych harmonicznych do sieci elektrycznej. Reaktancja filtru w zależności od numeru harmonicznej wynosi :

$$X_{nf} = nwL_f - \frac{1}{nwC_f},$$

gdzie: L_f ,C_f – indukcyjność oraz pojemność gałęzi obwodu stanowiącej filtr; n – rząd harmonicznej; ω – pulsacja .

Przy odpowiednio dobranych wartościach indukcyjności i pojemności, filtr dla harmonicznej podstawowej oraz dla harmonicznych niższego rzędu niż n_r (częstotliwość rezonansowa) będzie stanowił obciążenie pojemnościowe, natomiast dla wszystkich harmonicznych wyższych rzędów obciążenie indukcyjne. Dla częstotliwości rezonansowej gałąź LC będzie stanowiła bardzo małą impedancję. Prąd o częstotliwości rezonansowej będzie zamykał się między przekształtnikiem a filtrem nie przedostając się do sieci zasilającej. W trójfazowych układach najczęściej stosuje się obwody filtrujące dla częstotliwości 5, 7, 11, 13 harmonicznej. Dla podstawowej harmonicznej gałęzie filtru zawsze mają charakter pojemnościowy, co oznacza, iż zmniejszają prąd bierny podstawowej częstotliwości.

3.2. Dławiki ochronne baterii pojemnościowych typu ED3F

Pojemnościowe baterie kompensacyjne instalowane kilkanaście lat temu, nie były zabezpieczane dławikami tłumiącymi. Powoduje to obecnie łatwe do przewidzenia problemy eksploatacyjne, kończące się najczęściej uszkodzeniem kondensatorów baterii. Dławiki typu ED3F zabezpieczają baterie pojemnościowe przed przeciążeniem prądami harmonicznymi.
W większości sieci przemysłowych w wyniku instalowania wielu odbiorników nieliniowych poziom wyższych harmonicznych napięcia i prądu jest niebezpieczny dla transformatorów, silników oraz szczególnie dla baterii kondensatorów. Poprawne wyznaczenie parametrów dławików ED3F decyduje o skuteczności ochrony baterii kompensacyjnej. W tym celu niemal konieczne jest wykonanie pomiarów zawartości wyższych harmonicznych w projektowanym miejscu pracy baterii kompensacyjnej. Na podstawie otrzymanego widma harmonicznych wybieramy odpowiednią częstotliwość rezonansową układu bateria-dławik. Jest to najczęściej częstotliwość pośrednia między częstotliwościami tych harmonicznych napięcia i prądu, które nie występują lub mają najmniejszy udział w widmie pomiarowym. Odstrojony układ rezonansowy bateria-dławik będzie wykazywał nieznaczną impedancję dla częstotliwości harmonicznych znajdujących się w pobliżu częstotliwości rezonansowej. Jednocześnie będzie silnie tłumił prądy o częstotliwościach odległych od częstotliwości rezonansowej.

4. Dławiki kompensacyjne typu ED3K

Grupa dławików kompensacyjnych przeznaczona jest do kompensacji mocy biernej pojemnościowej, będącej efektem pracy maszyn synchronicznych oraz rozległych sieci kablowych NN i SN przy ich niedostatecznym obciążeniu. Bardzo często dławiki łączy się w baterie dławikowe współpracujące z automatycznymi regulatorami cosϕ. Baterie takie umożliwiają grupową, znacznie efektywniejszą nadążną kompensację mocy biernej, która zapobiega ewentualnemu przekompensowaniu sieci.
Podstawowym parametrem użytkowym tego typu dławików jest wytwarzana przez nie moc bierna indukcyjna, którą wyznacza się z zależności :

$$Q_{ED3K} = I_n^2 (w_n L),$$

gdzie: I_n – znamionowa wartość skuteczna prądu sinusoidalnie przemiennego; ω –znamionowa pulsacja; L – indukcyjność dławika.

5. Dławiki wygładzające typu ED1W

Na wyjściu prostowników diodowych oraz tyrystorowych, a także przekształtników prócz składowej stałej napięcia i prądu otrzymujemy zwykle niepożądane w obwodzie obciążenia składowe przemienne. Włączony w szereg z obciążeniem dławik wygładzający pozwala na uzyskanie dostatecznie małych tętnień napięcia i prądu przy dużej częstotliwości składowych przemiennych. W układach prostownikowych zasilanych napięciem o częstotliwości przemysłowej wygładzanie napięcia i prądu tylko za pomocą dławika wymagałoby stosowania elementów o bardzo dużych indukcyjnościach. W takim wypadku dławik łączy się z pojemnością tworząc filtr LC. Ważnymi parametrami dławika wygładzającego, określającymi jego moc budowy, są:
indukcyjność, wartość prądu znamionowego oraz amplituda i częstotliwość pulsacji.

6. Dławiki ograniczające stromość napięcia du/dt, typu ED3dU

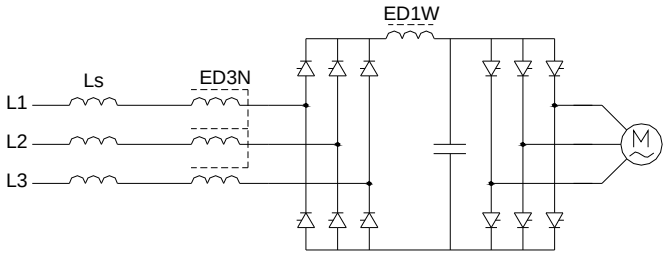
Dławiki ED3dU montowane na wyjściu przekształtnika, ograniczają stromość napięcia du/dt ok. 2-2,5 razy do 700 V/μs i amplitudę przepięć do 1000V.
Chronią uzwojenia stojana asynchronicznego silnika przed przebiciem i pozwalają zwiększyć długość kabla zasilającego silnik do 100 mb.

Dławiki sieciowe

Sieć zasilająca może być narażona na oddziaływanie odbiorników nieliniowych powodujących odkształcenia przebiegu napięcia sinusoidalnego, a zatem wzrost strat i zakłócenia w pracy pozostałych maszyn i urządzeń przyłączonych do tej sieci.
W celu ograniczenia propagacji harmonicznych w lokalnych zakładowych sieciach NN, są stosowane dławiki sieciowe. Oprócz tego realizują one inne zadania, min. tłumią przepięcia komutacyjne, a w wypadku zwarcia zmniejszają wartość ustalonego prądu zwarciowego oraz stromość jego narastania.

Podstawowe funkcje dławików sieciowych w przekształtnikowych układach zasilania

Układy przekształtników tyrystorowych małej mocy mogą być zasilane bezpośrednio z sieci bez indywidualnego transformatora. W takich okolicznościach konieczne jest stosowanie, w linii pomiędzy siecią zasilającą a przekształtnikiem dławików sieciowych (typu ED1N lub ED3N).
Dławiki te pełnią rolę ochronną zarówno w stosunku do samego przekształtnika jak i sieci zasilającej.



Uproszczony schemat przekształtnika zasilającego silnik klatkowy

Prostowniki sterowane oraz przekształtniki częstotliwości generują w sieci szereg harmonicznych, które silnie zniekształcają przebieg sinusoidy napięcia niosąc ze sobą wzrost strat mocy we wszystkich maszynach i urządzeniach zasilanych z sieci.
Dławiki sieciowe (ED1N lub ED3N) ograniczają rozprzestrzenianie się wyższych harmonicznych w sieci oraz tłumią przepięcia komutacyjne powstające podczas przełączania tyrystorów. Zastosowanie dławików sieciowych powoduje więc osłabienie wzajemnego zakłócania się przekształtników podczas komutacji.
Zawory układów przekształtnikowych często potrzebują ochrony zapewniającej powstrzymanie narastania prądu przewodzenia do chwili przełączenia struktury pnpn w stan przewodzenia. Najprostszą metodą realizacji tego zadania jest zainstalowanie dławików sieciowych.
Dobierając dławik należy zwrócić uwagę na wzajemną zależność indukcyjności sieci zasilającej L_S oraz indukcyjności dławika L_{ED3N}, które powinny spełniać warunek (1).

$$L_{ED3N} \geq \frac{U_{Tm}}{\left(di_T/dt\right)} - L_S \qquad (1)$$

gdzie: U_{Tm} – największa możliwa w danym układzie wartość napięcia blokowania w chwili poprzedzającej przełączenie tyrystora; $(di_T/dt)_{crit}$ – krytyczna stromość narastania prądu przewodzenia tyrystora; L_S – indukcyjność zastępcza sieci i źródła.

Jeżeli z zależności (1) otrzymamy wynik $L_{ED3N} \leq 0$ oznacza to, że instalowanie dławików sieciowych jest zbędne ponieważ indukcyjność sieci w wystarczającym stopniu ogranicza wartość pochodnej prądu.
Bardziej praktycznym sposobem wyznaczenia parametrów technicznych dławików sieciowych jest założenie dopuszczalnego spadku napięcia na dławiku, który nie powinien przekroczyć kilku procent napięcia

znamionowego sieci. Znając wartość prądu obciążenia możemy korzystając z równania (2) określić indukcyjność dławika przyjmując kilkuprocentowy spadek napięcia na dławiku.

$$U_L = 2 \cdot p \cdot f \cdot L_{ED3N} \cdot I \qquad (2)$$

gdzie: I – prąd znamionowy obciążenia, f – częstotliwość napięcia sieci, L_{ED3N} - indukcyjność dławika sieciowego.

Należy zwrócić uwagę na to, by charakterystyka magnetowodu uniemożliwiała wejście dławika sieciowego w stan nasycenia w całym zakresie spodziewanych prądów odbiornika.

Dławik sieciowy ELHAND typu ED3N-0,77mH/70A

Dławiki silnikowe

Przekształtniki są najczęściej stosowanymi układami zasilania i regulacji prędkości obrotowej silników elektrycznych. W celu poprawienia charakterystyk mechanicznych oraz własności dynamicznych układu napędowego często między silnikiem a układem przekształtnika umieszcza się dławiki silnikowe (ED1S lub ED3S)
Dławiki silnikowe znajdują szerokie zastosowanie w przekształtnikowych układach napędowych zarówno prądu stałego jak i przemiennego. W zależności od rodzaju układu napędowego, z którym współpracują mają do spełnienia wiele zadań min. zapewnienie ciągłości oraz wygładzenie pulsacji prądu silnika, minimalizację prądu zwarciowego w obwodzie obciążenia przekształtnika jak również ograniczenie przepięć komutacyjnych i kompensację pojemności linii zasilającej.

Zadania dławików silnikowych w sterowanych układach prostownikowych
Tętnienie prądu wyprostowanego w obwodzie silnika zasilanego przez prostownik sterowany powoduje iskrzenie pod szczotkami oraz utrudnia proces komutacji. Odpowiednio dobrany dławik silnikowy ED1S umieszczony w obwodzie obciążenia prostownika umożliwia ograniczenie wartości skutecznej pierwszej harmonicznej prądu do dopuszczalnego poziomu (2–15) % prądu znamionowego, uzależnionego od mocy oraz zakresu regulacji prędkości kątowej silnika. Indukcyjność obwodu konieczną do utrzymania dopuszczalnej wartości k-tej harmonicznej prądu □I_k (%) w obwodzie, znając amplitudę składowej zmiennej napięcia zasilającego wyprostowanego Ud_z wyznacza się z zależności (1).

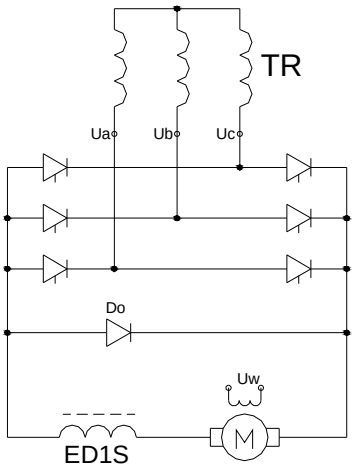
$$L_{ob} = \frac{Ud_z \cdot 100}{wkm\Delta I_k(\%)Id_n} \qquad (1)$$

gdzie: □ -pulsacja, m – liczba faz, k – krotność harmonicznej, Id_n – znamionowa wartość prądu przekształtnika, □I_k(%) – dopuszczalna wartość odpowiedniej harmonicznej prądu.

Znając niezbędną indukcyjność obwodu L_{ob} oraz indukcyjność twornika maszyny L_t możemy wyznaczyć indukcyjność dławika silnikowego (ED1S) ograniczającego pulsację prądu w obwodzie obciążenia przekształtnika (2) (rys1).

$$L_{ED1S} = L_{ob} - L_t \qquad (2)$$

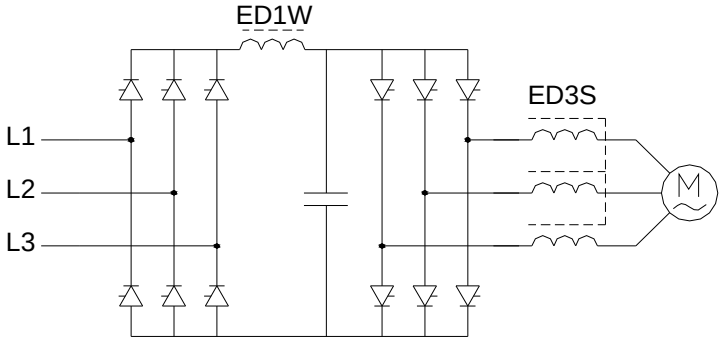
Należy pamiętać, iż materiał magnetyczny rdzenia i konstrukcja dławika silnikowego powinny umożliwiać zachowanie stałej indukcyjności przy prądzie twornika równym podwójnej wartości prądu znamionowego. Warunek ten wynika z przeciążalności prądowej przekształtnika.



rys.1 Uproszczony schemat symetrycznego mostka trójfazowego

Rola dławików silnikowych w układach napędowych prądu przemiennego

Napięcia wyjściowe falowników to ciąg prostokątnych impulsów o regulowanej szerokości i częstotliwości. Szybkość narastania impulsów przebiegu napięcia jest bardzo duża i stwarza zagrożenie dla izolacji zasilanych maszyn. Ograniczenie szybkości narastania napięcia a w konsekwencji ryzyka uszkodzenia izolacji silnika uzyskuje się umieszczając pomiędzy silnikiem a falownikiem dławik silnikowy (typu ED3S) (rys.2).



rys.2 Uproszczony schemat przekształtnika zasilającego silnik klatkowy.

Dławiki silnikowe (ED3S) stosowane są również w celu ograniczenia prądów zwarciowych do czasu zadziałania zabezpieczeń i wyłączenia prądu w obwodzie. Najczęściej dobór odpowiedniej indukcyjności dławika silnikowego jest jedyną możliwością ochrony tyrystorów (tranzystorów mocy) układów przekształtnikowych (rys.2). Dobór indukcyjności dławika silnikowego (ED3S) uzależniony jest od maksymalnej wartości prądu zwarciowego w układzie. Prąd ten nie może przekraczać niepowtarzalnej, szczytowej wartości prądu tyrystora (tranzystora mocy) I_{TSM} .

W praktyce często zachodzi konieczność doprowadzenia napięcia do napędów znacznie oddalonych od źródła zasilania. Długie linie zasilające posiadają duże pojemności, które przyczyniają się do znacznego wzrostu strat mocy w obwodzie. Dławik silnikowy (ED3S) oprócz ochrony izolacji maszyny kompensuje pojemność linii zasilającej oraz ogranicza harmoniczne i przepięcia komutacyjne w obwodzie silnika.

Dławiki silnikowe mają dużą indukcyjność, bardzo skutecznie zmniejszają szybkość narastania napięcia i znacząco obniżają amplitudę przepięć napięcia chroniąc izolację stojana silnika asynchronicznego. Dławik silnikowy kompensuje też pojemność kabla zasilającego i ogranicza stromość narastania prądu przy zwarciach w obwodach, chroniąc przy tym falownik. Ich wadą w porównaniu z dławikami ograniczającymi stromość narastania napięcia du/dt (ED3dU), są większe wymiary i duża masa.

W obwodzie pośredniczącym przekształtnika w celu wygładzenia pulsacji oraz zapewnienia ciągłości prądu wyprostowanego umieszczany jest dławik wygładzający (ED1W). Optymalny dobór jego indukcyjności ma istotny wpływ na pracę całego układu napędowego.

Dławik silnikowy ELHAND typu ED3SM-0,29mH / 250A

Dławik silnikowy ELHAND typu ED3S-0,15mH / 400A

Dławiki du/dt, ograniczające stromość napięcia - typu ED3dU

Dławiki ED3dU montowane na wyjściu przekształtnika, ograniczają stromość napięcia du/dt ok. 2-2,5 razy do 700 V/µs i amplitudę przepięć do 1000V.
Chronią uzwojenia stojana asynchronicznego silnika przed przebiciem i pozwalają zwiększyć długość kabla zasilającego silnik do 100 mb.

Dławiki wygładzające

W obwodzie obciążenia każdego układu prostownikowego otrzymuje się napięcie wyjściowe będące sumą dwóch składowych stałej i zmiennej. Celem redukcji tętnień, najczęściej niekorzystnych z punktu widzenia odbiornika, między wyjście prostownika a obciążenie włącza się filtr prostowniczy.
Firma ELHAND produkuje dławiki wygładzające ED1W, które znajdują zastosowanie w filtrach prostowniczych.

Filtry wygładzające, ich zadaniem jest korekcja kształtu przebiegów czasowych napięcia i prądu prostownika. Układ filtru ma niewielki wpływ na wartość składowej stałej, ogranicza natomiast składową zmienną, a tym samym współczynnik tętnień.
Własności oraz skuteczność działania filtru prostowniczego określa współczynnik wygładzania:

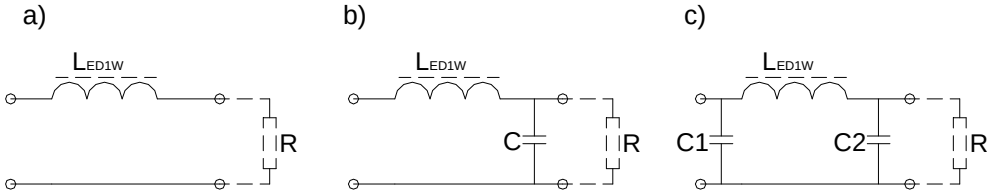
$$b_s = \frac{k_{t1}}{k_{t2}},$$

gdzie: k_{t1} i k_{t2} są współczynnikami tętnień (napięcia lub prądu) odpowiednio na wyjściu i wejściu prostownika.

Często rolę filtru spełnia włączony w szereg z obciążeniem dławik wygładzający ED1W (Rys.1a). Indukcyjność dławika wygładzającego pracującego w obwodzie wyjściowym prostownika m – pulsowego zasilającego odbiornik o rezystancji R, przy zadanym współczynniku wygładzania napięcia i prądu wyjściowego b_s, wyraża się zależnością:

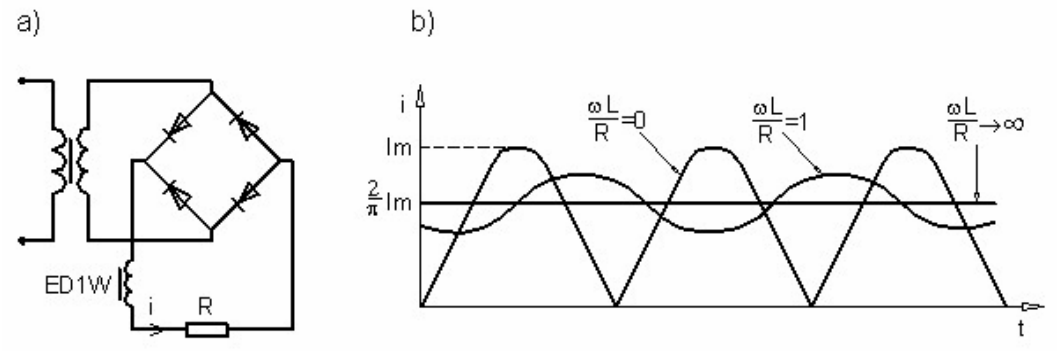
$$L_{ED1W} = \frac{(1-b_s)(R+r)}{2pfmb_s},$$

gdzie: R- rezystancja odbiornika; r- rezystancja wewnętrzna obwodu prostownika; m- współczynnik zależny od rodzaju prostownika; b_s- współczynnik wygładzania; f -częstotliwość napięcia zasilającego prostownik.



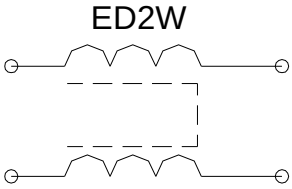
Rys.1 Najczęściej spotykane układy filtrów wygładzających. a) indukcyjny, b) indukcyjno-pojemnościowy typu G, c) indukcyjno-pojemnościowy typu P.

W prostownikach jednofazowych, jednopulsowych z filtrem indukcyjnym bardzo trudne jest uzyskanie ciągłego charakteru prądu w obwodzie obciążenia, gdyż impulsy prądu występują tylko co drugi półokres. Z tego powodu filtry indukcyjne raczej nie współpracują z prostownikami jednopulsowymi. Częściej wykorzystuje się prostowniki jednofazowe dwupulsowe z filtrem w postaci dławika indukcyjnego (Rys.2). W układzie tym, już przy stosunkowo niedużych prądach obciążenia występuje ciągły przepływ prądu bez dużych tętnień.



Rys.2 Prostownik mostkowy dwupulsowy z filtrem indukcyjnym. a) schemat układu, b) przebiegi czasowe prądów.

Jeżeli reaktancja dławika ωL>>R to w obwodzie występuje bardzo dobra filtracja tętnień prądu. Dodatkową zaletą tego układu jest to, iż wartość średnia prądu nie zależy od indukcyjności.
Ograniczenie tętnień prądu poprzez wzrost indukcyjności dławika nie wprowadza strat napięcia.
Filtr prostowniczy w postaci dławika wygładzającego ED1W znacznie efektywniej spełnia swoje zadanie współpracując z prostownikiem, w którym składowa zmienna ma kilkakrotnie wyższą częstotliwość (np. w przekształtnikach impulsowych).
W praktyce filtry indukcyjne stosowane są najczęściej w układach trójfazowych większych mocy.
Poprzez połączenie dławika wygładzającego z kondensatorem otrzymuje się strukturę filtru LC (Rys.1b,1c) o parametrach korzystnych zarówno przy małych jak i przy dużych prądach obciążenia. Dławik w układzie tym stanowi impedancję szeregową, kondensator zaś dodatkowo bocznikuje obciążenie dla składowych zmiennych.
Często wykorzystywaną odmianą dławików wygładzających są dławiki typu ED2W.
Posiadają one dwa niezależne uzwojenia umieszczone na rdzeniu w kształcie UI .
Wykorzystywane są w układach współpracujących z przekształtnikami wielopulsowymi dużych mocy.



Rys.3 Schemat dławika wygładzającego typu ED2W

Jeżeli skuteczność pojedynczego filtru jest zbyt mała to dalsze ograniczenie składowej zmiennej uzyskuje się budując filtr wielostopniowy złożony z kilku kaskadowo połączonych ogniw. Wypadkowy współczynnik wygładzania jest równy:

$$b = b_1 \cdot b_2 \cdot \mathbf{K}$$

gdzie: b – współczynnik wygładzania filtru wielostopniowego; b_1 ,b_2 – współczynniki wygładzania kolejnych stopni filtru.

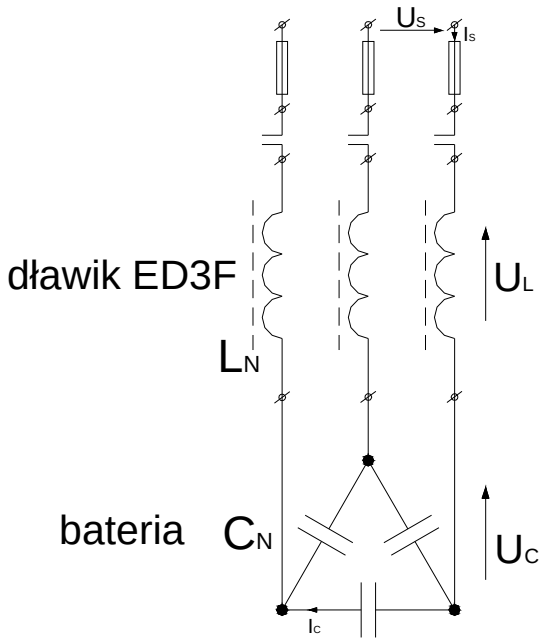
Należy pamiętać, że zastosowanie filtru wygładzającego wpływa w istotny sposób na charakterystykę wyjściową całego układu prostowniczego. W stanach nieustalonych powstających podczas włączania i wyłączania prostownika, w obwodzie mogą wystąpić znaczne oscylacje prądu lub napięcia powodowane rezonansowym charakterem układu LC i znaczną jego dobrocią.

Dławik wygładzający ELHAND typu ED1WHX-40mH / 600A; 6kV

Dławik wygładzający ELHAND typu ED2W-2x0,033mH / 3500A

Dławiki do ochrony baterii kondensatorowych

Dławiki ochronne typu ED3F zabezpieczają baterie pojemnościowe przed przeciążeniem prądami harmonicznymi.



Rys.1 Schemat jednego stopnia baterii kompensacyjnej z dławikami tłumiącymi.

W wyniku instalowania wielu odbiorników nieliniowych poziom wyższych harmonicznych napięcia i prądu jest niebezpieczny dla transformatorów, silników a szczególnie dla baterii kondensatorów. Poprawne wyznaczenie parametrów dławików ochronnych (ED3F) decyduje o skuteczności ochrony baterii kompensacyjnej. W tym celu niemal konieczne jest wykonanie pomiarów zawartości wyższych harmonicznych w projektowanym miejscu pracy baterii kompensacyjnej. Na podstawie pomierzonego widma harmonicznych wybieramy odpowiednią częstotliwość rezonansową układu bateria-dławik. Jest to najczęściej częstotliwość pośrednia między częstotliwościami tych harmonicznych napięcia i prądu, które nie występują lub mają najmniejszy udział w widmie pomiarowym. Układ rezonansowy bateria-dławik będzie wykazywał nieznaczną impedancję dla częstotliwości harmonicznych znajdujących się w pobliżu częstotliwości rezonansowej. Jednocześnie będzie silnie tłumił prądy o częstotliwościach odległych od częstotliwości rezonansowej f_R.
Wybór optymalnej częstotliwości rezonansowej układu (np. f_R=189Hz) i znajomość częstotliwości sieci (f_N=50Hz) przy której będzie pracowała bateria pozwala wyznaczyć współczynnik tłumienia p% (1), który następnie wykorzystamy w uproszczonych rachunkach.

$$p\% = \left(\frac{f_N}{f_R}\right)^2 \cdot 100\% = 7\% \qquad (1)$$

Tab.1 Przykładowe częstotliwości rezonansowe układu bateria-dławik:

Współczynnik tłumienia – p%	5%	5,67%	7%	12,5%	14%
Częstotliwość rezonansowa – fR	~224 Hz	~210 Hz	~189 Hz	~141 Hz	~134 Hz

Każdy stopień baterii kompensacyjnej zabezpieczany jest dławikiem ochronnym o indukcyjności wyznaczonej dla pojemności stopnia baterii i założonej częstotliwości rezonansowej układu. Niezbędne jest określenie mocy Q_{CN} i napięcia znamionowego U_{CN} kondensatorów stanowiących poszczególne stopnie baterii kompensacyjnej. Pozwala to właściwie wykonać obliczenia zmierzające do wyznaczenia prądów I_S w obwodach i indukcyjności L_N dławików ochronnych.
Korzystając z zależności opisującej moc kondensatora (np. 25kVar/440V 50Hz) możemy określić pojemność stopnia baterii kompensacyjnej (2).

$$C_{\Delta} = \frac{Q_{CN}}{2 \cdot p \cdot f_N \cdot U_{CN}^2} = 411mF \Rightarrow C_N = 3 \times 137mF \quad (2)$$

Następnie wyznaczamy reaktancje pojemnościową X_C, indukcyjną X_L oraz wypadkową reaktancję baterii z dławikami X_{BAT} (3,4,5), przy założeniu, iż częstotliwość rezonansowa układu powinna wynosić ~189Hz (p=7%).

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot p \cdot f_N \cdot C_{\Delta}} = 7{,}75\Omega \quad (3)$$

$$X_L = X_C \cdot p = 0{,}54\Omega \quad (4)$$

$$X_{BAT} = X_C - X_L = 7{,}21\Omega \quad (5)$$

Na tej podstawie określamy indukcyjność fazową dławika L_N oraz prąd I_S wymuszany przez baterię (6,7) :

$$L_N = \frac{X_L}{2 \cdot p \cdot f_N} = 1{,}72mH \quad (6)$$

$$I_S = \frac{U_S}{\sqrt{3} \cdot X_{BAT}} = 32A \quad (7)$$

Rzeczywiste napięcie U_{CR} na zaciskach baterii osiągnie wartość (8) :

$$U_{CR} = \frac{U_S}{1-p} = 430V \quad (8)$$

Stąd można wyznaczyć rzeczywistą moc bierną Q_{CR} baterii pojemnościowej 25kvar/440V 50Hz, moc bierną dławika ochronnego Q_L i wypadkową moc bierną stopnia baterii Q_{BAT} (9,10,11) :

$$Q_{CR} = 2 \cdot p \cdot f_N \cdot C_{\Delta} \cdot U_{CR}^2 = 23{,}86k\,\mathrm{var} \quad (9)$$

$$Q_L = 3 \cdot 2 \cdot p \cdot f_N \cdot L_N \cdot I_S^2 = 1{,}66k\,\mathrm{var} \quad (10)$$

$$Q_{BAT} = Q_{CR} - Q_L = 22{,}2k\,\mathrm{var} \quad (11)$$

Od dławików ochronnych (ED3F) wymaga się poprawnej pracy w warunkach zmiennego obciążenia. Udział prądów harmonicznych obciążających baterię i dławiki zmienia się w zależności od konfiguracji sieci zakładowej i ilości pracujących aktualnie przekształtników czy innych nieliniowych odbiorników. Określono zatem parametr zwany liniowością magnetyczną. Przedstawia on maksymalny prąd dławika I_{LIN}, dla którego tolerancja indukcyjności powinna zawierać się w przedziale $L \geq 0{,}95L_N$. Jest on więc miarą stabilności parametrów dławika w podczas przeciążenia.
Intensywność zniekształcenia sinusoidy napięcia sieciowego w miejscu pracy baterii pojemnościowej może w znacznym stopniu zależeć od odbiorników nieliniowych pracujących w sąsiednich przedsiębiorstwach zasilanych z tej samej rozdzielni. Należy również zwrócić uwagę, że ilość zniekształceń (czyli THDU, THDI) może zmienić się radykalnie na przestrzeni zaledwie kilku miesięcy (w miarę instalowania np. przekształtników we wspomnianych już sąsiednich przedsiębiorstwach). Dlatego aby uniknąć problemów eksploatacyjnych instalowane układy kompensacyjne powinny zawierać dławiki ochronne.

Dławik ELHAND do ochrony baterii typu ED3F-22,2/400/7-25/440

Dławiki pasywnych filtrów wyższych harmonicznych (filtracyjne)

Znaczny poziom wyższych harmonicznych w przemysłowych oraz miejskich sieciach elektroenergetycznych jest spowodowany szybkim wzrostem ilości eksploatowanych przekształtników i odbiorników nieliniowych. Odkształcenie sinusoidy napięcia prowadzi do zwiększenia strat, a w skrajnych sytuacjach nawet do zakłóceń w pracy maszyn i urządzeń. W celu ograniczenia niekorzystnego wpływu odbiorników nieliniowych i przekształtników na sieć elektroenergetyczną, zasilane z niej maszyny oraz na połączone z siecią baterie kondensatorów stosuje się układy filtrów wyższych harmonicznych.

ELHAND produkuje dławiki ochronne **typu ED3LC** przeznaczone do pracy w układach filtrów LC wyższych harmonicznych.

Zadania filtrów wyższych harmonicznych w sieciach elektroenergetycznych.

W najczęściej spotykanych układach przekształtników trójfazowych mostkowych (układy sześciopulsowe) przebieg prądu po stronie pierwotnej transformatora - przy założeniu symetrii napięć zasilających, impedancji komutacyjnych i kątów opóźnienia wyłączania zaworów – będzie zawierał oprócz składowej podstawowej harmoniczne min.: 5, 7, 11, 13, których numery określa ogólne równanie (1).

$$n = kp \pm 1, \qquad (1)$$

gdzie: n – rząd harmonicznej, k – liczba naturalna, p – liczba pulsów napięcia wyprostowanego.

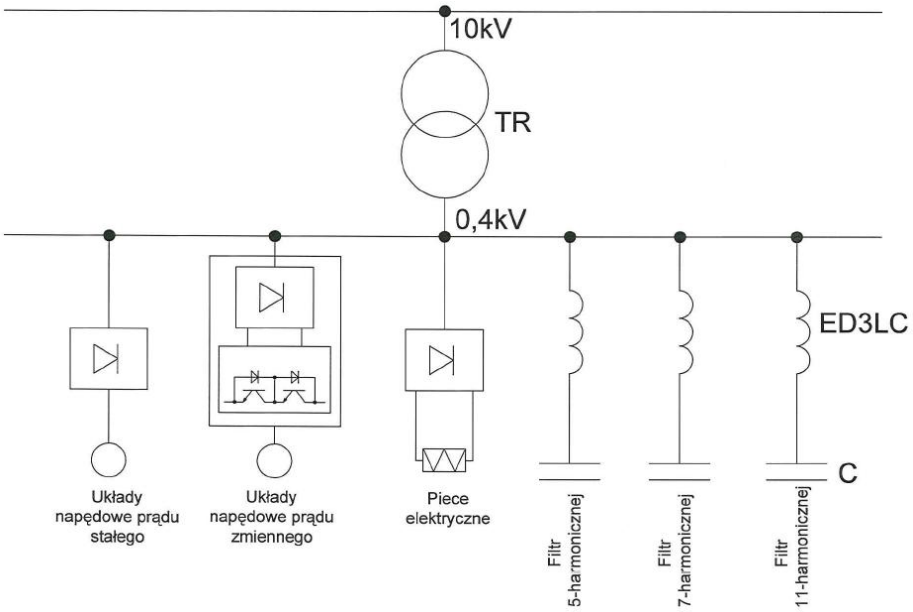
Wartości amplitud składowych harmonicznych możemy wyznaczyć korzystając z równania (2).

$$A_n = \frac{1}{n} A_1, \qquad (2)$$

gdzie: A_1 – amplituda podstawowej harmonicznej napięcia, A_n – amplituda n-tej harmonicznej.

Zbyt duża zawartość wyższych harmonicznych prądu zasilającego może spowodować znaczny wzrost strat mocy w urządzeniach i maszynach współpracujących z przekształtnikiem w wyniku przepływu prądu o podwyższonej częstotliwości lub wywołać zaburzenia w pracy urządzeń przez zniekształcenie napięcia zasilającego. Szczególnie odnosi się to do baterii kondensatorów pracujących równolegle z układem przekształtnikowym. Zmniejszenie impedancji kondensatorów połączone ze wzrostem częstotliwości może spowodować uszkodzenia baterii na skutek przeciążenia prądami o częstotliwościach wyższych harmonicznych.
Ponadto niebezpiecznym zjawiskiem jest rezonans równoległy w układzie. Harmoniczne wytwarzane przez bezstopniowe układy napędowe mogą być wzmocnione aż **10-15 razy** w obwodzie rezonansu równoległego utworzonego przez reaktancję pojemnościową baterii kondensatorów i indukcyjność sieci. Zjawisko to może doprowadzić do uszkodzenia zarówno baterii kondensatorów jak i przekształtnika.
Składowe harmoniczne w niekorzystnych warunkach mogą stanowić zagrożenie dla konstrukcji mechanicznej maszyn elektrycznych. Pary harmonicznych np. 5 i 7 mogą wywołać drgania mechaniczne o częstotliwości 6-tej harmonicznej w generatorze lub silniku. Drgania te powstają wskutek wahań momentu obrotowego w wyniku zniekształcenia krzywej napięcia zasilającego. Gdy częstotliwość tych drgań zbiegnie się z częstotliwością rezonansu mechanicznego, wówczas konstrukcja mechaniczna maszyny narażona będzie na znaczne przeciążenia.
Uciążliwy efekt głośnej pracy maszyn elektrycznych będący skutkiem zjawiska magnetostrykcji jest ze względu na stosunkowo wysokie częstotliwości składowych harmonicznych prądu dodatkowo wzmocniony. Prądy odkształcone zawartością wyższych harmonicznych powodują ponadto znacznie intensywniejsze nagrzewanie przewodów i kabli elektroenergetycznych w skutek zjawiska naskórkowości oraz efektu bliskości.

Zadaniem filtrów LC, których elementami są dławiki ochronne typu ED3LC jest ograniczenie niekorzystnego wpływu wyższych harmonicznych prądu na sieć elektroenergetyczną i wszystkie urządzenia z nią połączone.
Rysunek 1 przedstawia typowy układ do kompensacji mocy biernej oraz filtracji harmonicznych. Występują tu trzy gałęzie filtrujące dostrojone do 5, 7, 11-tej harmonicznej. Ilość zainstalowanych gałęzi filtrujących zależy od wymaganej mocy biernej koniecznej do kompensacji oraz od pomiarów i dokładnej analizy zawartości poszczególnych harmonicznych w sieci.



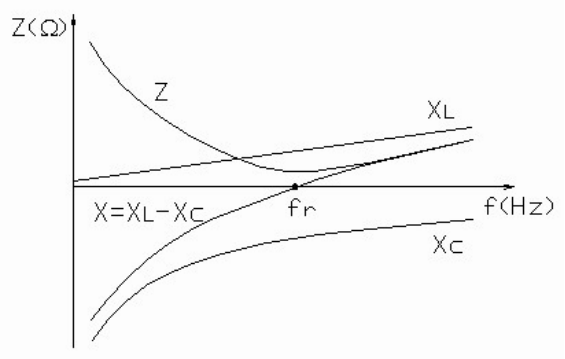
rys1. Uproszczony schemat obwodu kompensacji mocy biernej i filtracji harmonicznych

Filtry to szeregowe układy rezonansowe LC włączone równolegle w obwód zasilania przekształtnika, które spełniają podwójną rolę: kompensują moc bierną pobieraną przez układ napędowy oraz zapobiegają przedostawaniu się wyższych harmonicznych do sieci elektrycznej. Reaktancja filtru w zależności od numeru harmonicznej wynosi (3).

$$X_{nf} = nwL_f - \frac{1}{nwC_f}, \qquad (3)$$

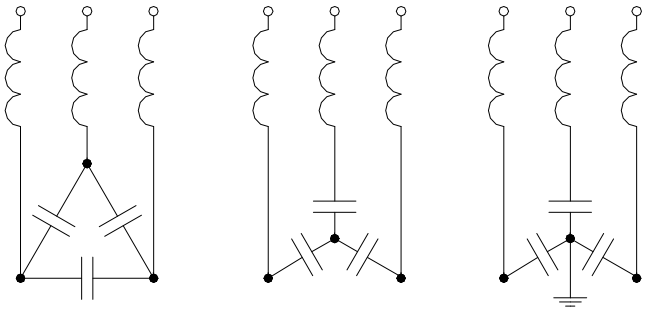
gdzie: L_f ,C_f – indukcyjność oraz pojemność gałęzi obwodu stanowiącej filtr; n – rząd harmonicznej; ω – pulsacja

Przy odpowiednio dobranych wartościach indukcyjności i pojemności filtr dla harmonicznej podstawowej oraz dla harmonicznych niższego rzędu niż n_r (częstotliwość rezonansowa) będzie stanowił obciążenie pojemnościowe, natomiast dla wszystkich harmonicznych wyższych rzędów obciążenie indukcyjne. Dla częstotliwości rezonansowej gałąź LC będzie miała niewielką impedancję równą w zasadzie rezystancji uzwojeń dławika. Prąd o częstotliwości rezonansowej będzie zamykał się między przekształtnikiem a filtrem nie przedostając się do sieci zasilającej. Dla podstawowej harmonicznej gałęzie filtru zawsze mają charakter pojemnościowy, co w praktyce oznacza realizację kompensacji mocy biernej (rys.2).



rys2. Charakterystyka impedancyjna filtru LC

Istnieje wiele rozwiązań przemysłowych filtrów, często są to pasywne filtry LC (rys.3).



rys3. Przykładowe układy pasywnych filtrów LC

Gałęzie filtru LC przedstawionego na (rys.3a) znajdują się w czasie pracy pod napięciem przewodowym sieci. W związku z tym baterie kondensatorów i dławiki będą tu, (szczególnie w zakresie średnich napięć) znacznie droższe niż w układach (rys.3b,c). Dlatego konfiguracja filtru (rys.3a) powszechnie stosowana jest w układach niskonapięciowych. Wadą tego rozwiązania jest brak możliwości filtrowania harmonicznych potrójnych. Jest to możliwe wyłącznie w układzie gwiazdy z uziemionym punktem zerowym.
W układzie z (rys.3b) rozkład napięć na poszczególnych fazach filtru uzależniony jest od pojemności oraz indukcyjności każdej gałęzi. Ze względu na konieczność zapewnienia prawidłowego napięcia pracy we wszystkich trzech fazach wymagana jest ścisła symetria pojemności i indukcyjności. Układy (rys.3a,b) mogą być stosowane w dowolnym systemie sieci trójfazowej. Natomiast układ (rys.3c) nie może być stosowany w sieci z izolowanym punktem zerowym lub z punktem zerowym uziemionym przez dławik gaszący. W układzie takim gałęzie filtru pracują praktycznie pod równymi napięciami ($U_p / \sqrt{3}$). W przypadku zwarcia jednej fazy z ziemią na pozostałych gałęziach pojawia się napięcie międzyprzewodowe U_p. Napięcie to jest $\sqrt{3}$ razy większe niż w stanie normalnej pracy. Bateria kondensatorów w takiej sytuacji powinna zostać wyłączona bardzo szybko ($t \leq 1$min.). Natomiast w sieciach o izolowanym punkcie zerowym zwarcia doziemne są przeważnie jedynie sygnalizowane i utrzymują się znacznie dłużej, co stanowi poważne zagrożenie dla układu filtrów.

Dławik filtracyjny ELHAND typu ED3LC-0,5mH/250A

Dławiki powietrzne

Nasza firma produkuje dławiki bezrdzeniowe-powietrzne jedno i trójfazowe.
Projekty wykonujemy w/g indywidualnych wymagań technicznych klienta.
Charakterystyka napięciowo prądowa dławików powietrznych jest liniowa, to znaczy nie występuje efekt nasycenia ferromagnetycznego. Dławiki powietrzne w porównaniu z dławikami rdzeniowymi charakteryzują się mniejszą masą.
W bezrdzeniowej konstrukcji dławików powietrznych na skutek silnego rozproszenia strumienia magnetycznego występują zwiększone straty.
Dławiki powietrzne pełnią rolę elementów indukcyjnych wygładzających lub ograniczających szybkość narastania zbocza napięcia du/dt. Współpracują z przekształtnikami niskich i średnich napięć.

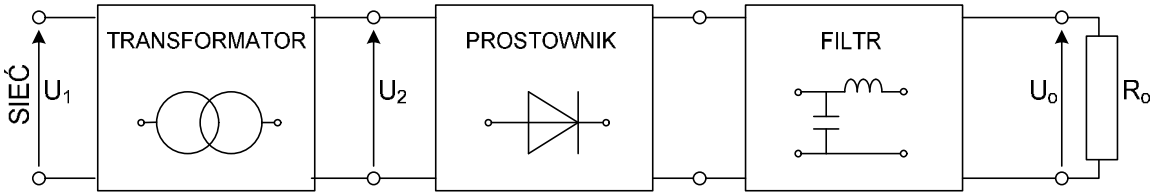
Dławik powietrzny ELHAND typu 3xED1PH-2mH/540A; 6kV

Dławik powietrzny ELHAND typu 2xED1P-4mH/170A; 0,75kV; 300Hz

Zasilacze napięcia (prądu) stałego

Budowa zasilacza

Znaczna część urządzeń wymaga zasilania napięciem (prądem) stałym. Używa się wtedy zasilaczy napięcia (prądu) stałego. Zasilacz składa się zazwyczaj z transformatora sieciowego, układu prostowniczego oraz filtru (w zależności od wymaganego współczynnika tętnień napięcia wyjściowego).



Schemat funkcjonalny zasilacza napięcia (prądu) stałego

Transformator w układzie zasilacza napięcia (prądu) stałego oddziela galwanicznie zasilane urządzenia od sieci oraz zasila układ prostowniczy napięciem o odpowiednich wartościach. Te transformatory różnią się od zwykłych transformatorów większą mocą gabarytową oraz prądem pobieranym z sieci. Przy tej samej mocy oddawanej do obciążenia mają one większe wymiary i pobierają prąd o większym natężeniu.

Układ prostownikowy przetwarza napięcie (prąd) przemienne na wyprostowane napięcie (prąd) pulsujące o składowej stałej różnej od zera. Wykorzystuje się w nim elementy półprzewodnikowe (diody lub tyrystory), charakteryzujące się jednokierunkowym przewodzeniem prądu.
Układ prostowniczy charakteryzuje się liczbą pulsów. Określa ona ilość nie wygładzonych pulsów w przebiegu napięcia wyprostowanego przypadających na jeden okres przemiennego napięcia zasilającego.
Stąd podział prostowników na : 1; 2; 3; 6; 12; 24; pulsowe.

Filtr ma za zadanie ograniczyć tętnienia aby w odbiorniku uzyskać odpowiednią wartość napięcia i prądu stałego. W zasilaczach stabilizowanych, między filtrem a odbiornikiem, może znajdować się dodatkowo stabilizator napięcia lub prądu stałego.

Układy prostownikowe jednofazowe

Układy prostownikowe, w zależności od struktury i liczby faz zasilającego napięcia przemiennego, dzieli się na:

- jedno
- wielofazowe.

Jeżeli napięcie podlega prostowaniu w czasie jednego półokresu każdej z faz, to prostownik jest nazywany półfalowym lub jednokierunkowym. Jeżeli natomiast napięcie prostowane jest w czasie obu półokresów, to prostownik jest nazywany całofalowym, dwukierunkowym lub mostkowym. Dodatkowy podział układów prostowniczych występuje ze względu na elementy z jakich został on wykonany:

- prostowniki niesterowane (diodowe)
- prostowniki sterowane (tyrystorowe lub tranzystorowe)
- prostowniki niejednorodne (zawierające zarówno diody jak i tyrystory lub tranzystory)

Najważniejsze wielkości charakteryzujące prostownik to:

- napięcie zasilania U_2
- składowe stałe napięcia wyjściowego U_{os} i prądu wyjściowego I_{os}
- wartość skuteczna napięcia wyjściowego U_o
- dopuszczalny prąd wyjściowy $I_{os\ max}$
- sprawność energetyczna η_p, obliczona jako stosunek mocy prądu stałego na wyjściu do mocy pozornej prądu zmiennego na wejściu prostownika

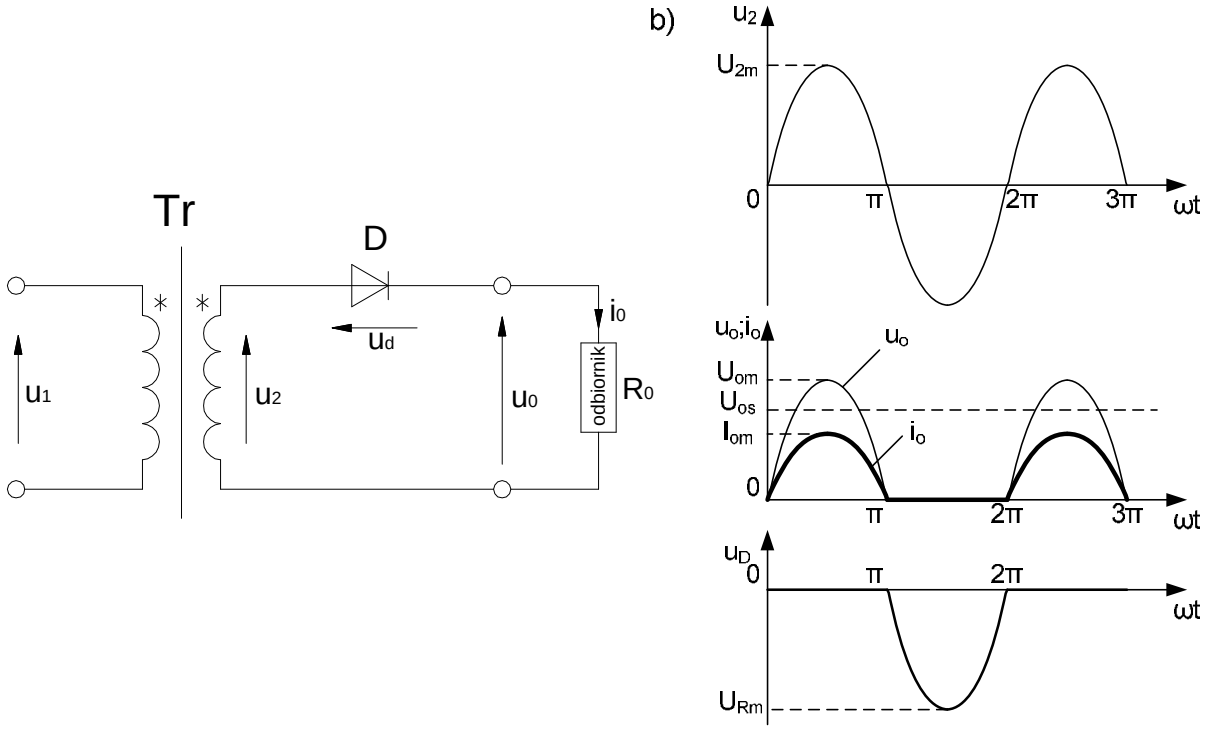
$$h = \frac{P_o}{S_2} = \frac{U_{os} I_{os}}{U_2 I_2}$$

- współczynnik tętnień k_t, zdefiniowany jako stosunek amplitudy składowej podstawowej tętnień na wyjściu U_{o1m} i składowej stałej U_{os}

$$k_t = \frac{U_{o1m}}{U_{os}}$$

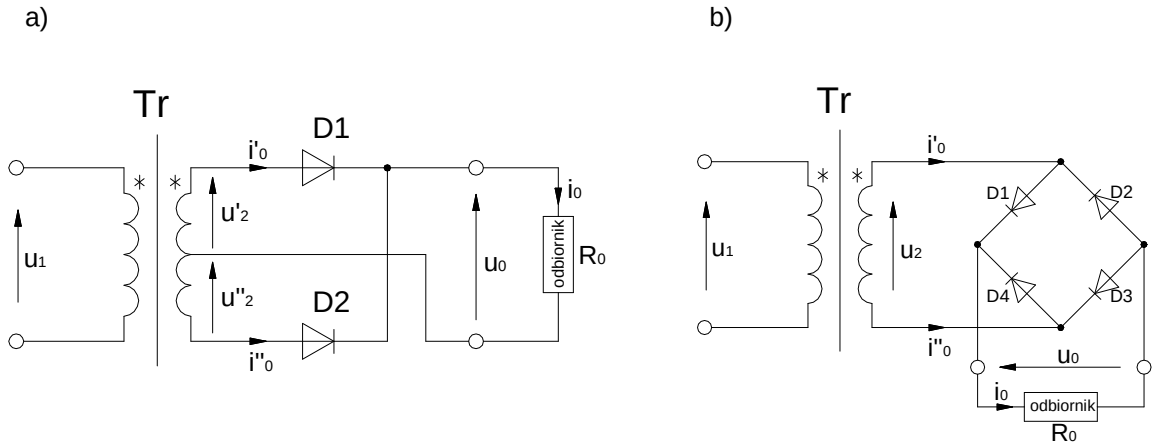
- maksymalna wartość napięcia wstecznego U_{Rm}, które występuje na elemencie prostowniczym

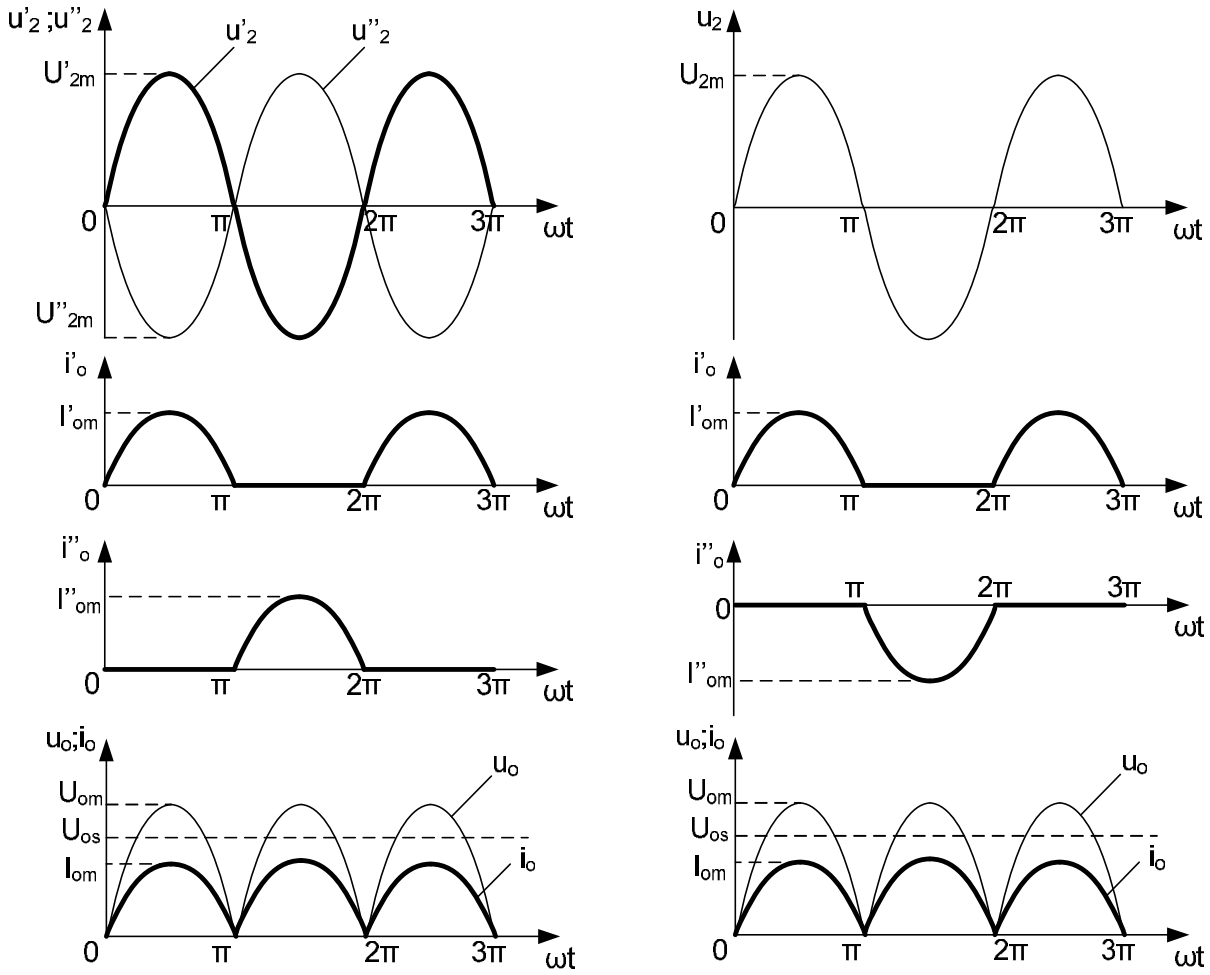
Wielkości charakteryzujące prostowniki najłatwiej przedstawić za pomocą schematu oraz przebiegów napięć i prądów dla prostownika jednofazowego półfalowego z obciążeniem rezystancyjnym:



Prostownik jednofazowy z obciążeniem rezystancyjnym: a) schemat; b) przebiegi napięć i prądu w układzie

Prostownik półfalowy z obciążeniem rezystancyjnym ma bardzo małą sprawność (mniejszą niż 29%) oraz duże tętnienia. Oznacza to, że 71% energii pobieranej ze źródła jest tracona. Słabo jest wykorzystywany wówczas transformator sieciowy, przez który przepływa również składowa stała I_{os} prądu (powoduje ona podmagnesowanie rdzenia transformatora). Skutkuje to koniecznością użycia transformatora o większych wymiarach, niż wynika to z mocy wydzielanej w obciążeniu. W praktyce układ jednopołówkowy stosuje się rzadko, na ogół przy małych mocach.
Częściej stosuje się układy prostownicze dwupołówkowe, które mają lepsze właściwości. Ogólną zasadę działania prostowników dwupołówkowych przedstawia poniższy rysunek:

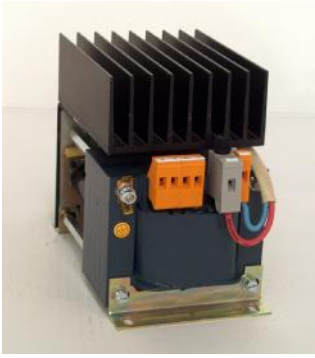




Schemat prostownika dwupołówkowego z obciążeniem rezystancyjnym oraz przebiegi napięć i prądów:
a) z wyprowadzonym środkiem uzwojenia wtórnego transformatora; b) w układzie mostkowym Graetza

W obu układach prąd płynie przez obciążenie w jednym kierunku i ma charakter pulsujący. Obydwa układy mają większość parametrów identycznych. Jednakże w układzie mostkowym napięcie wsteczne na każdej diodzie jest dwukrotnie mniejsze, co umożliwia zastosowanie diod o mniejszym dopuszczalnym napięciu wstecznym. Mostek zapewnia też lepsze wykorzystanie mocy transformatora. Wadą jego jest konieczność użycia czterech diod. Podsumowanie podstawowych parametrów jednofazowych układów prostowniczych z obciążeniem rezystancyjnym przedstawiono w tabeli:

UKŁAD	PÓŁFALOWY	CAŁOFALOWY Z WYPROWADZONYM ŚRODKIEM	CAŁOFALOWY MOSTKOWY
składowa stała napięcia U_{os}	$U_{OS} \approx \frac{U_{2m}}{p} = \frac{\sqrt{2}U_2}{p}$	$U_{OS} \approx \frac{2 \cdot U_{2m}}{p} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}U_2}{p}$	$U_{OS} \approx \frac{2 \cdot U_{2m}}{p} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}U_2}{p}$
wartość skuteczna napięcia na obciążeniu U_o	$U_O = \frac{U_{2m}}{2} = \frac{\sqrt{2}U_2}{2}$	$U_O = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = U_2$	$U_O = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = U_2$
sprawność energetyczna η_p	$h_p \approx \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{p^2} \approx 0{,}286$	$h_p \approx \frac{8}{p^2} \approx 0{,}811$	$h_p \approx \frac{8}{p^2} \approx 0{,}811$
współczynnik tętnień k_t	$k_t \approx \frac{p}{2} \approx 1{,}571$	$k_t \approx \frac{2}{3} \approx 0{,}666$	$k_t \approx \frac{2}{3} \approx 0{,}666$
maksymalna wartość napięcia na diodzie U_{Rm}	$U_{Rm} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$	$U_{Rm} = 2 \cdot U_{2m} = 2 \cdot \sqrt{2}U_2$	$U_{Rm} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$



Zasilacz ELHAND typu EZ1-0,25 kVA; 400V±5%AC// 24V-7,5ADC

Układy prostownikowe wielofazowe

Przy dużych prądach obciążenia korzysta się zazwyczaj z trójfazowych źródeł zasilających. Stosuje się wtedy układy prostownikowe wielofazowe. Wyróżnia się dwa podstawowe ich rodzaje:

- układy prostownikowe jednokierunkowe
- układy prostownikowe dwukierunkowe (mostkowe)

W pierwszym przypadku układ prostowniczy, zasilany z transformatora *m*-fazowego, zawiera w każdej fazie jedną diodę. Diod tych jest więc razem (*m)*. Wszystkie są skierowane zgodnie i ich katody są zwarte i połączone z zaciskiem odbiornika. Każda z faz przewodzi kolejno przez 1/m okresu, wówczas gdy napięcie ma wartość większą niż napięcia pozostałych faz. Wskutek tego prąd w obciążeniu płynie ciągle i ma charakter tętniący.
W wielofazowych układach jednokierunkowych składową stałą napięcia na obciążeniu możemy wyznaczyć z wzoru:

$$U_{OS} \approx U_{fm} \frac{m}{p} \sin \frac{p}{m}$$

gdzie:

U_{OS} – wartość składowej stałej napięcia
U_f – wartość skuteczna napięcia fazowego (uzwojenia wtórnego)
$U_{fm} = \sqrt{2}\, U_f$ – wartość maksymalna napięcia fazowego
m – liczba faz (m≥0)

Składowa stała wzrasta w miarę zwiększania liczby faz. Zależność stosunku U_{OS}/U_{fm} od liczby faz układu prostowniczego jednokierunkowego przedstawia poniższa tabelka:

m	1	2	3	4	6	12	∞
U_{OS}/U_{fm}	0,32	0,64	0,81	0,90	0,96	0,99	1

Wartość maksymalna i skuteczna prądu fazowego wynoszą odpowiednio:

$$I_{fm} \approx \frac{I_{OS}}{m}; \qquad I_f \approx \frac{I_{OS}}{\sqrt{m}}$$

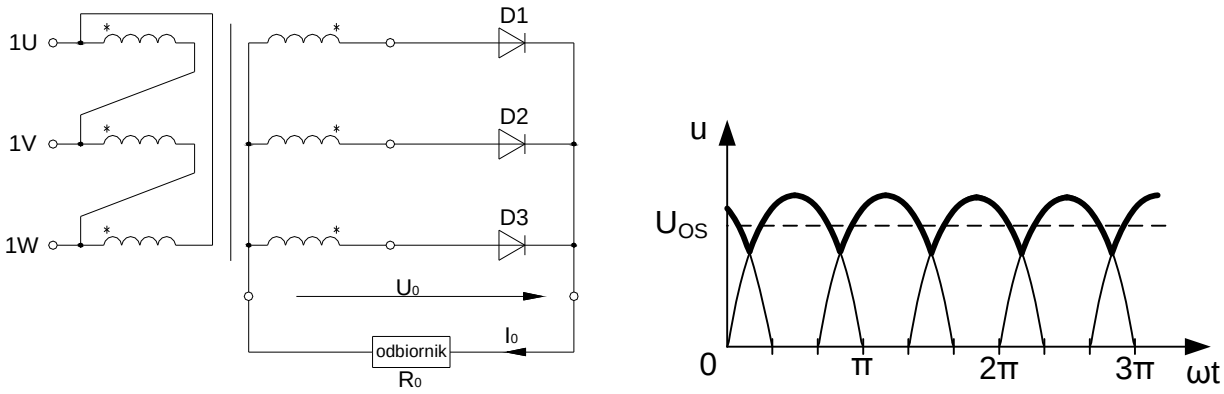
Sprawność mocowa:

$$h_p = \frac{U_{OS} I_{OS}}{m U_f I_f} = \frac{\sqrt{2} m \cdot \sin \frac{p}{m}}{p}$$

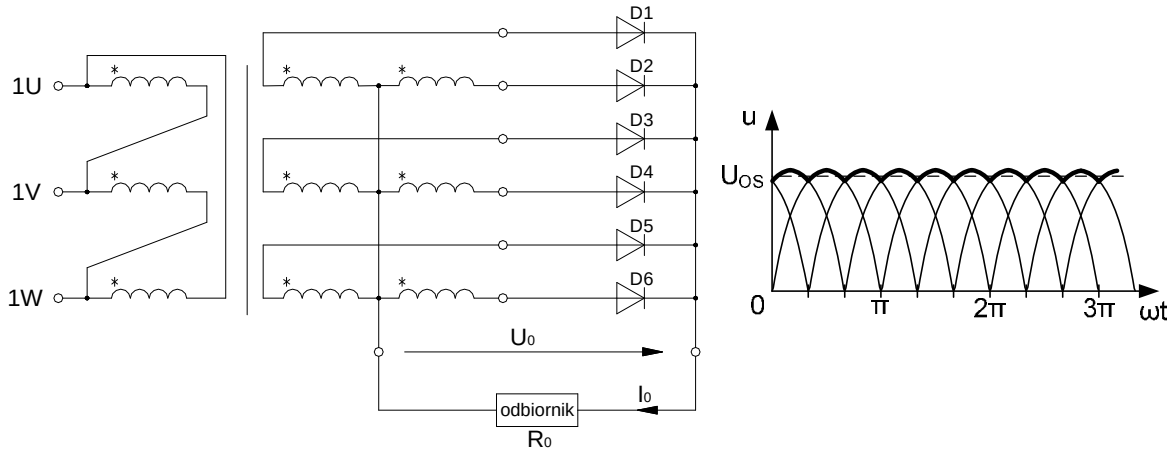
Współczynnik tętnień wyraża się zależnością:

$$k_t = \frac{2}{m^2 - 1}$$

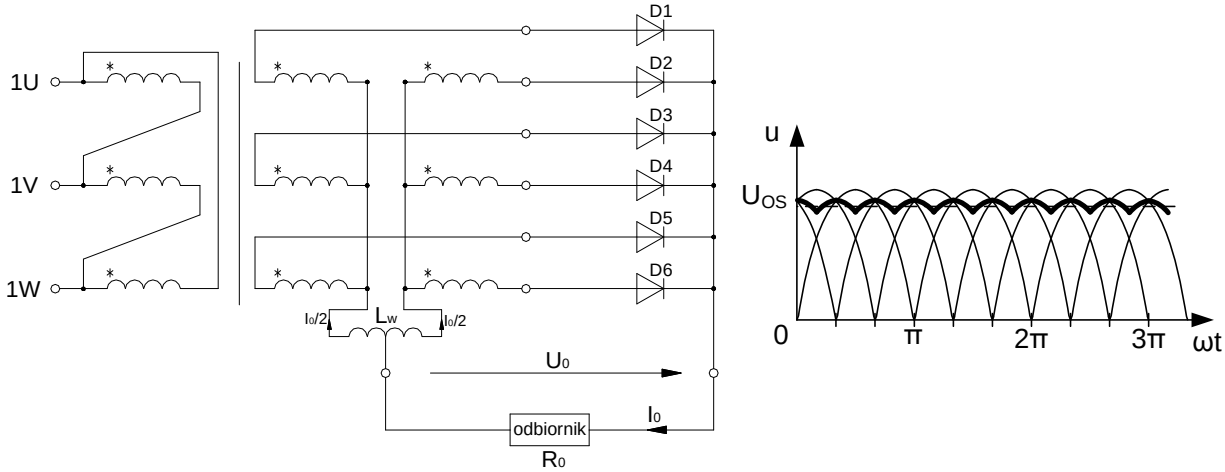
Poniżej przedstawiono kilka przykładowych schematów prostowników jednokierunkowych, z których każdy charakteryzuje się innymi parametrami wyjściowymi. Przy doborze odpowiedniego układu należy zwracać uwagę zarówno na powyższe parametry wyjściowe jak i względy ekonomiczne (koszt prostownika i transformatora zasilającego) a następnie wybrać najbardziej optymalne rozwiązanie.



Rys 1 Schemat prostownika jednokierunkowego trójpulsowego.



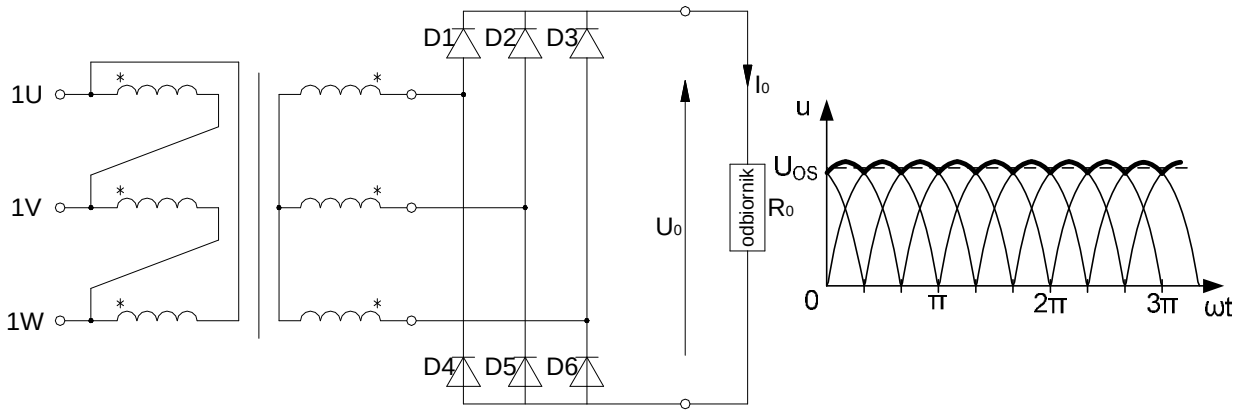
Rys 2 Schemat prostownika jednokierunkowego sześciopulsowego.



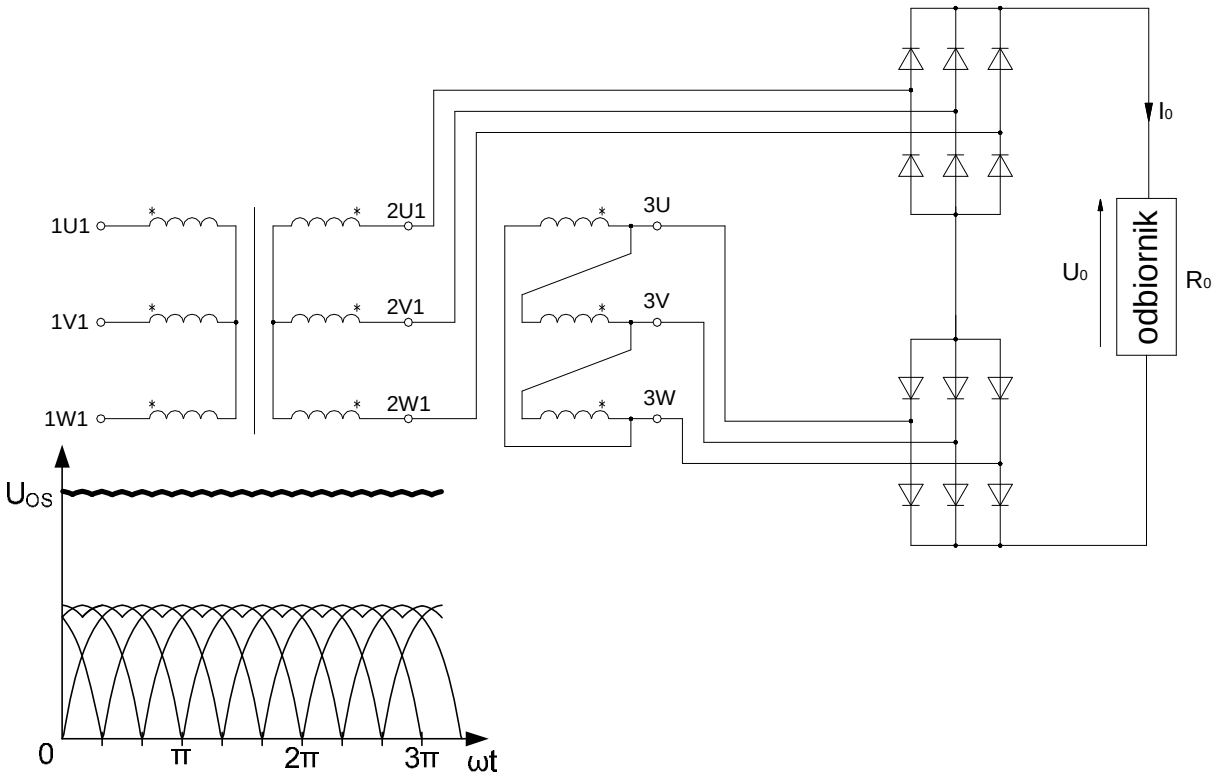
Rys 3 Schemat prostownika jednokierunkowego sześciopulsowego, złożonego z dwóch równolegle połączonych poprzez dławik wyrównawczy prostowników trójpulsowych.

W układach jednokierunkowych prądy w uzwojeniach wtórnych transformatora, połączonych z przekształtnikiem, płyną tylko przez część okresu. Stąd też moce typowe transformatorów znacznie przekraczają wartość mocy obwodu prądu stałego. Dodatkowo w układach jednokierunkowych, z uwagi na składową stałą prądu uzwojeń wtórnych, występuje niekorzystne zjawisko podmagnesowania rdzenia, zmniejszające sprawność przekształtnika i całego układu. Najkorzystniej pod względem wykorzystania transformatora prezentuje się układ sześciopulsowy z dławikiem wyrównawczym.

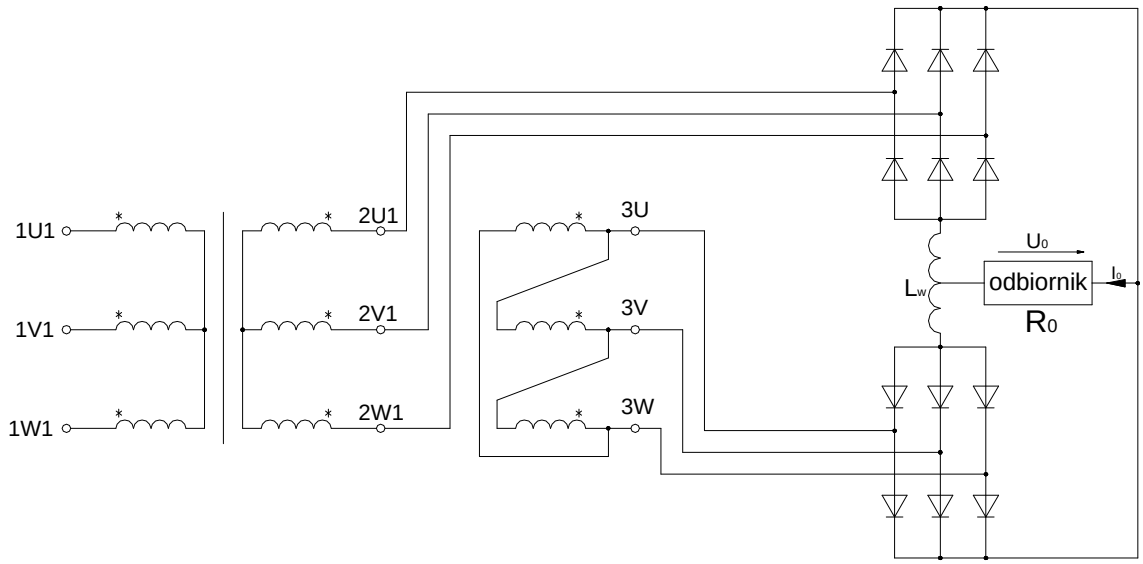
W drugim rodzaju wielofazowych układów prostowniczych, tzn. w układach dwukierunkowych (mostkowych), każda faza jest połączona z dwiema diodami: jedną z pierwszej grupy (D1, D2, D3) i jedną z drugiej grupy (D4, D5, D6). Prąd obciążenia, włączonego między połączone anody i katody obu grup diod, płynie zawsze przez dwie diody i dwie fazy uzwojenia wtórnego transformatora. Przebieg napięcia na obciążeniu wynika z chwilowych wartości napięć międzyfazowych. Prąd każdej fazy składa się natomiast z dwóch impulsów o czasie trwania 1/m okresu. Kierunek ich przepływu jest przeciwny, a więc prąd fazowy nie zawiera składowej stałej i nie powoduje podmagnesowania rdzenia. Dzięki temu uzyskuje się lepsze wykorzystanie transformatora i większą sprawność energetyczną prostownika η_p. Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane dwukierunkowe układy prostownicze:

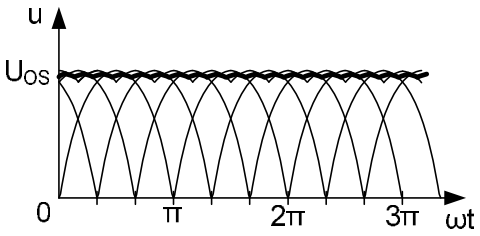


Rys 4 Schemat prostownika dwukierunkowego sześciopulsowego w układzie mostkowym.



Rys 5 Schemat prostownika dwunastopulsowego, złożonego z dwóch szeregowo połączonych prostowników sześciopulsowych mostkowych.





Rys 6 Schemat prostownika dwunastopulsowego, złożonego z dwóch równolegle połączonych poprzez dławik wyrównawczy prostowników sześciopulsowych mostkowych.

Układy mostkowe sześciopulsowe należą do najczęściej stosowanych układów przekształtnikowych głównie ze względu na najbardziej ekonomiczny bilans kosztów układu i jego parametrów wyjściowych. W układzie tym moce pozorne uzwojeń wtórnych i pierwotnych transformatora przekształtnikowego są sobie równe i przyjmują najmniejszą wartość z możliwych dla układów sześciopulsowych.
W celu uzyskania wysokich napięć wyjściowych stosuje się układy złożone z przekształtników połączonych szeregowo(*Rys.5*). Natomiast do zasilania odbiorników charakteryzujących się poborem dużych prądów buduje się układy złożone z równolegle połączonych przekształtników mostkowych (*Rys.6*).

Zasilacz ELHAND typu EZ3-50 kVA ; 400V±2x2,5%AC// 110V-427ADC; IP24

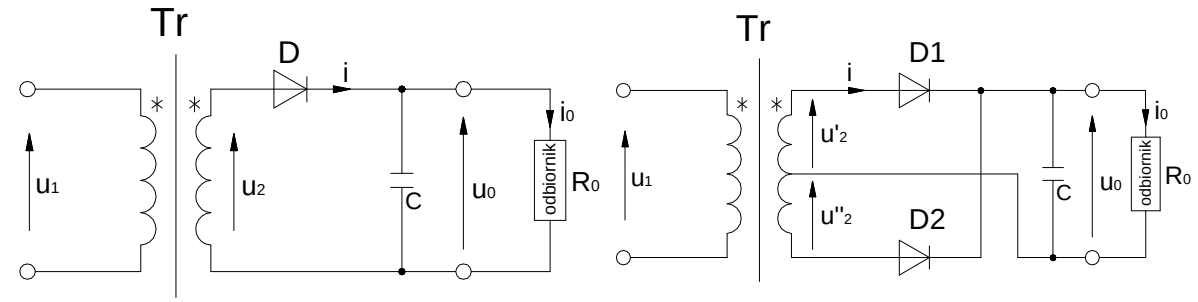
Filtracja - poprawa parametrów wyjściowych układów prostownikowych

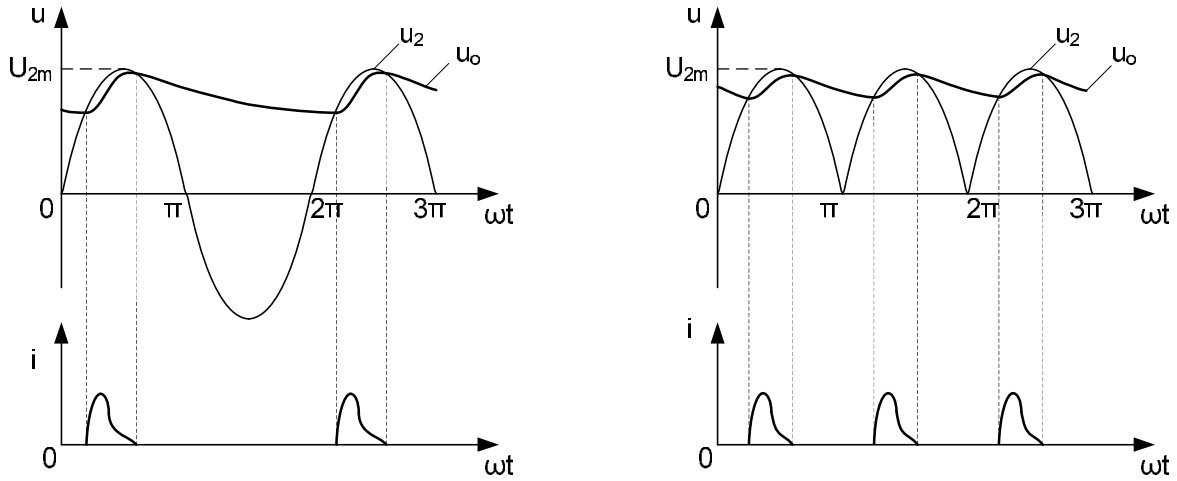
W celu poprawy właściwości układów prostownikowych stosuje się w nich elementy reaktancyjne L, C. Spełniają one dwa podstawowe zadania: zmniejszają tętnienia oraz magazynują energię wówczas, gdy zmienne napięcie prostowane ma dużą wartość, aby zwrócić ją do obciążenia w czasie, gdy napięcie to maleje.
Elementy te można łączyć w dwojaki sposób:

- pojemnościowe – równolegle do obciążenia,
- indukcyjne – szeregowo z obciążeniem.

Rozwiązania takie stosuje się przede wszystkim w układach prostownikowych, gdzie współczynnik tłumienia jest niekorzystny.

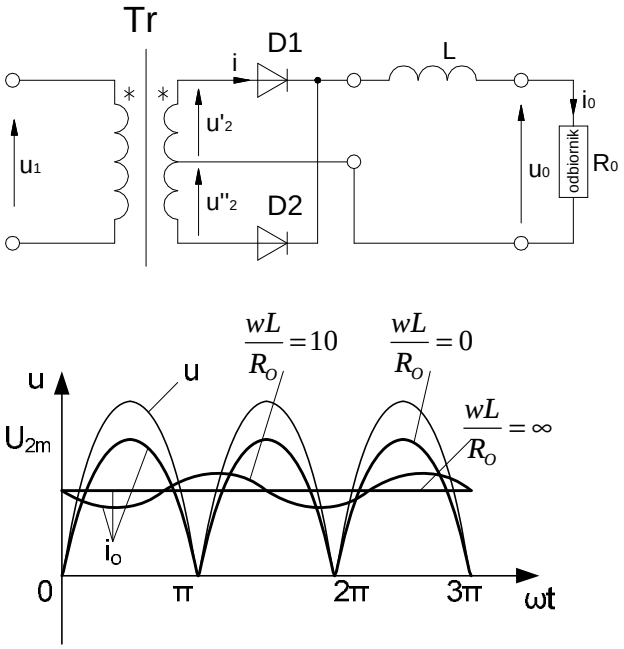
a) b)





Układy prostownicze jednofazowe z obciążeniem rezystancyjno – pojemnościowym. Schematy oraz przebiegi napięć i prądów: a) prostownik półfalowy; b) prostownik całofalowy

Układy prostownikowe z obciążeniem rezystancyjno-pojemnościowym mają lepszą sprawność i mniejsze tętnienia niż układy z obciążeniem rezystancyjnym. Układy te uzyskują najlepsze właściwości przy dużych wartościach rezystancji obciążenia R_O. Dlatego znalazły one zastosowanie w zakresie niezbyt dużych mocy najczęściej w układach jednofazowych, rzadko – w układach trójfazowych.



Prostownik całofalowy z obciążeniem rezystancyjno – indukcyjnym.

Układy z obciążeniem rezystancyjno-indukcyjnym to przede wszystkim układy całofalowe, ponieważ w układach jednofazowych półfalowych trudno uzyskać ciągły przepływ prądu przez obciążenie.
Składowa stała napięcia wyjściowego nie zależy od indukcyjności.
Ze wzrostem indukcyjności maleje natomiast współczynnik tętnień, czyli zmniejsza się udział składowych zmiennych w napięciu wyjściowym:

$$k_t = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2wL}{R_O}}}$$

Gdy stosunek wL / R_O wzrasta, to przebieg napięcia wyjściowego zbliża się do idealnego. Właściwości filtracyjne prostownika z obciążeniem rezystancyjno-indukcyjnym poprawiają się również ze wzrostem obciążenia (I_{OS} wzrasta, R_O maleje). Dlatego też układy te stosuje się przy dużych prądach obciążenia, głównie w wersji trójfazowej lub sześciofazowej.