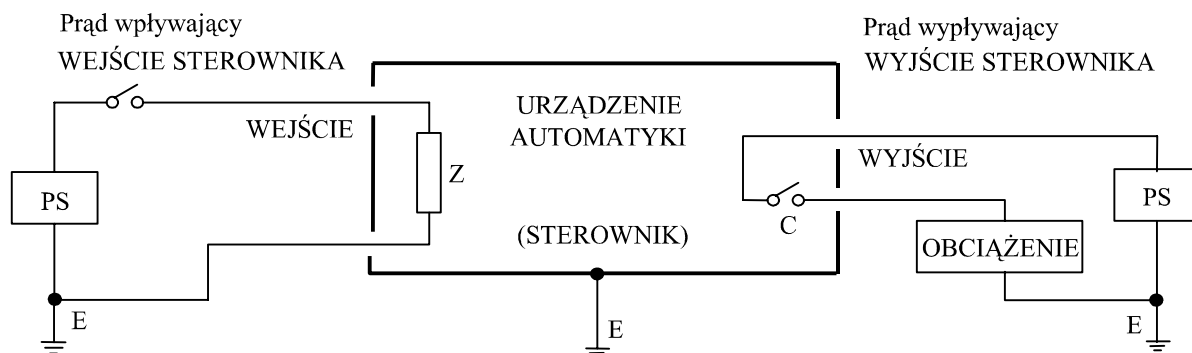


Układy wyjść dwustanowych (UWD)

Wyjścia dwustanowe w urządzeniach automatyki

Wyjścia dwustanowe są typowym interfejsem większości urządzeń automatyki. Na Rys. 1. pokazano umiejscowienie wyjść dwustanowych w typowym urządzeniu sterującym jakim jest sterownik programowalny.



Rys. 1. Ogólny schemat wejść i wyjść dwustanowych w urządzeniach automatyki. Gdzie: C - wyjście (przełącznik, triak, tranzystor, itp.), Z - impedancja wejścia, PS - zewnętrzne źródło zasilania, E - uziemienia (opcjonalne).

Podział wyjść dwustanowych

Układy wyjść dwustanowych służą do wyprowadzania sygnałów dwustanowych (cyfrowych) z urządzenia przetwarzającego dane z procesu technologicznego do:

- urządzeń sterujących tym procesem,
- sygnałów sterujących i danych dla urządzeń transmisji, wizualizacji, raportowania, archiwizacji itp..

Są obwodami pośredniczącymi pomiędzy niskonapięciowymi układami sterowania a elementami sterowania dużą mocą. Elementy pośredniczące (łączniki, przełączniki, styczniki lub sterowniki mocy) sterują elementem napędowym (np. silnikiem) lub innymi elementami wykonawczymi. Łączniki można podzielić na stykowe (przełączniki, styczniki) lub bezstykowe, czyli elektroniczne (przełączniki elektroniczne, sterowniki mocy).

Ze względu na **przeznaczenie funkcjonalne** można wyróżnić:

1. Wyjścia dwustanowe **statyczne** (sterowanie przełączników, styczników, sterowanie lampek sygnalizacyjnych). Wykonywane są do sterowania napięciami stałymi i zmiennymi, na różne prądy i napięcia wyjściowe. Często układy wyjść dwustanowych sterują bezpośrednio elementami wykonawczymi.
2. Wyjścia **cyfrowe kodowane** (równoległe i szeregowo). Służą one najczęściej do przekazywania sygnałów do elementów nastawczych z wejściem cyfrowym.
3. Wyjścia **impulsowe**, które można podzielić na:
 - a) wyjścia z modulacją **częstotliwości impulsów** (np. sygnał do sterowników prędkości obrotowej silników),
 - b) wyjścia z modulacją **liczby i szerokości impulsów** (sterowanie przyrostowe, urządzenia wykonawcze mające całkujący charakter),
 - c) wyjścia z modulacją **współczynnika wypełnienia** (sygnał quasi-analogowy np. przy sterowaniu silników),
 - d) wyjście z modulacją **liczby impulsów** (elementy nastawcze np. silniki krokowe).

Układy wyjść dwustanowych (UWD) powinny wykonywać część poniższych funkcji:

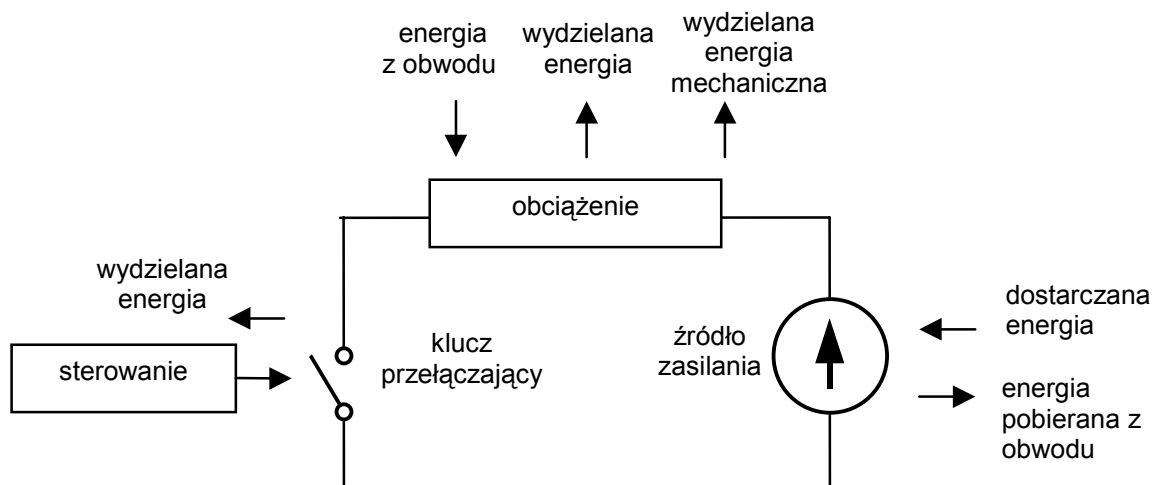
- dostarczenie wymaganej energii urządzeniom pośredniczącym, ewentualnie wykonawczym,

Układy wyjść dwustanowych - I część

- oddzielenie galwaniczne obiektu i sterownika,
- być odporne na zakłócenia elektromagnetyczne,
- dostosowanie poziomów napięć sterownika i obciążenia,
- sygnalizację stanu wyjść,
- ustawianie nieaktywnego stanu początkowego wyjść,
- sygnalizowanie przzerwania linii wyjściowej,
- odporność na przeciążenia termiczne,
- odporność na zwarcie wyjścia do masy i zasilania,
- sygnalizacja stanów awaryjnych.

Układy wyjść dwustanowych składają się w największym uproszczeniu z trzech podstawowych części (Rys. 2):

- napięcia zasilania obwodu,
- obciążenia,
- klucza przełączającego.



Rys. 2. Schemat blokowy obwodu wyjść dwustanowych.

Parametry obwodów wyjściowych wg normy PN-IEC 1131-2

Jedną z ważniejszych norm dotyczących urządzeń automatyki jest norma PN-IEC 1131 dotycząca sterowników programowalnych. Określa ona między innymi parametry wyjść dwustanowych. Pokazano je w Tabeli 1.

| Wartość znamionowa prądu (stan 1) | I_N [A] | 0,1A | 0,25A | 0,5A | 1,0A | 2,0A |
|--|-----------|-------|-------|-------|-------|------|
| Zakres prądu dla stanu 1 (ciągła wartość prądu przy stałym napięciu) | Max [A] | 0,12A | 0,30A | 0,60A | 1,20A | 2,4A |
| Spadek napięcia dla wyjść: | max | 3V | | | | |
| - niezabezpieczonych | [V] | | | | | |
| - zabezpieczonych i odpornych na zwarcie | [V] | 3V | | | | |
| Prąd upływu (stan 0) | max [mA] | 0,4 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 4,0 |

Tabela 1. Wartości znamionowe i zakresy robocze wyjść cyfrowych prądu stałego.

Napięcie zasilające

Stosunkowo najprostszą i najlepiej unormowaną częścią obwodu wyjść dwustanowych jest napięcie zasilania. W każdym obszarze zastosowań można spotkać napięcia zasilania o specyficznych parametrach.

Podstawowe parametry źródeł zasilania:

- **typ napięcia** (stałe, zmienne),
- **powiązania źródeł napięcia**. Dla napięć stałych są to zespoły napięć (np. +5V i ±15V). Dla napięć zmiennych są to pojedyncze napięcia 230V 50Hz lub układy napięć jednofazowych (np. 2x110V), trójfazowych (np. 230/400V, 58/100V),
- **wartość napięcia**. Wyróżniamy zasilanie niskonapięciowe (np. **DC**: -9V, ±15V, 12V, 24V, 48V, 60V i **AC**: 12V, 24V) i zasilanie wysokonapięciowe (np. 110V, 220VDC i 230VDC),
- **częstotliwość** napięć zmiennych (np. 50Hz, 400Hz)

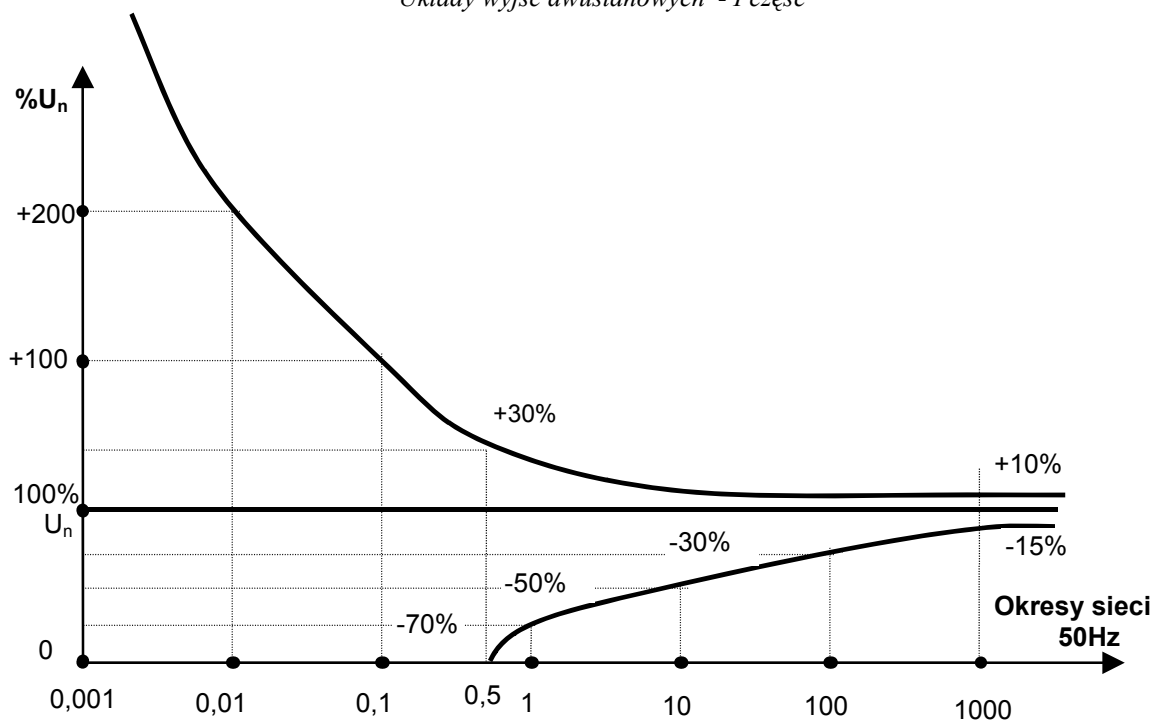
Parametry dodatkowe, które należy rozważyć:

- **profil sieci – charakterystyka zakłóceń** (dla zasilania zmiennoprądowego) pokazana na Rys. 3,
- **charakterystyka zasilania stałoprądowego** pokazana na przykładzie z Rys. 4,
- **impedancja wewnętrzna źródła** (DC i zespolona) i jej charakterystyka częstotliwościowa,
- **przysięgi** (tętnienia) i ich charakterystyka amplitudowo widmowa dla napięć stałych,
- **zniekształcenia harmoniczne** i ich statystyka dla napięć zmiennych (analiza widmowa),
- **odniesienie do potencjału ziemi**. Ważne jest odniesienie obwodów względem potencjału ziemi. Determinuje to sposób przyłączenia do ziemi ochronnej systemów zabezpieczeń przepięciowych. Stosowane są obwody izolowane względem ziemi ochronnej, obwody uziemiane jednopunktowo lub inne rozwiązania (odgromnik).

Profil zasilania

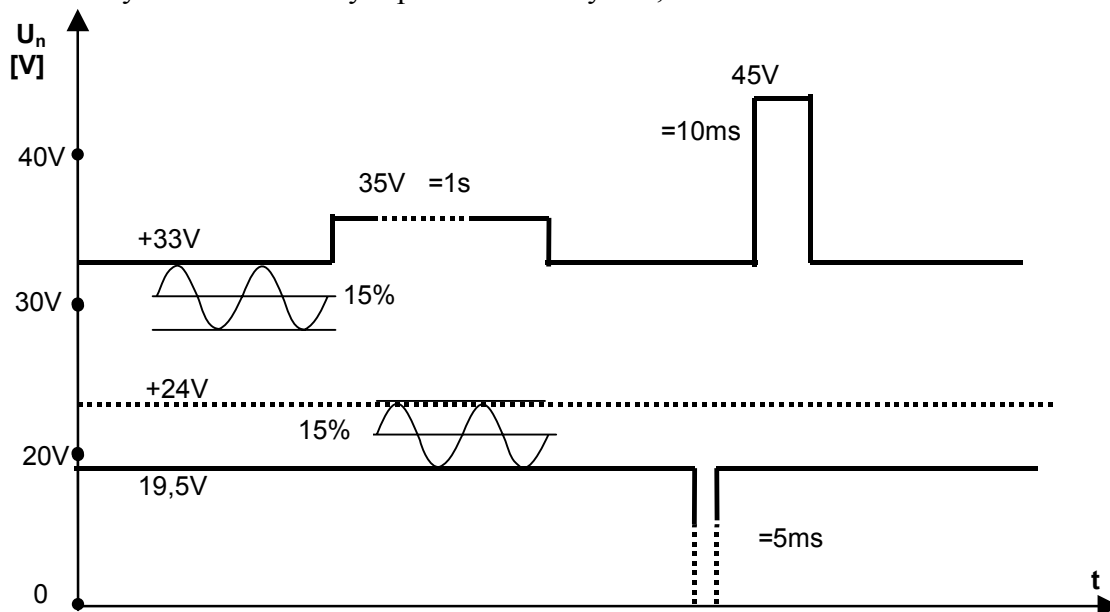
Profil zasilania jest charakterystyką napięciowo-czasową prawdopodobnych anomalii zasilania. Jest to zapis zakłóceń zasilania, których możliwość występowania należy uwzględnić w sensie statystycznym (określone prawdopodobieństwo wystąpienia w określonym przedziale czasu).

Na rys.3. pokazano przykładowy profil zasilania dla napięcia zmiennego. Wynikają z niego, takie parametry jak: dopuszczalne odchyłki napięcia zasilania i czas ich trwania, dopuszczalne chwilowe zaniki, obniżenia i podwyższenia, przepięcia. Dla określonego typu sieci określa się prawdopodobieństwo występowania wymienionych zdarzeń (np ilość w ciągu roku).



Rys. 3. Profil zasilania dla napięcia zmiennego (przykładowy).

Przykład sposobu określania przykładowych charakterystyk zasilania dla napięcia stałego +24V dla systemów automatyki pokazano na Rys. 4.,



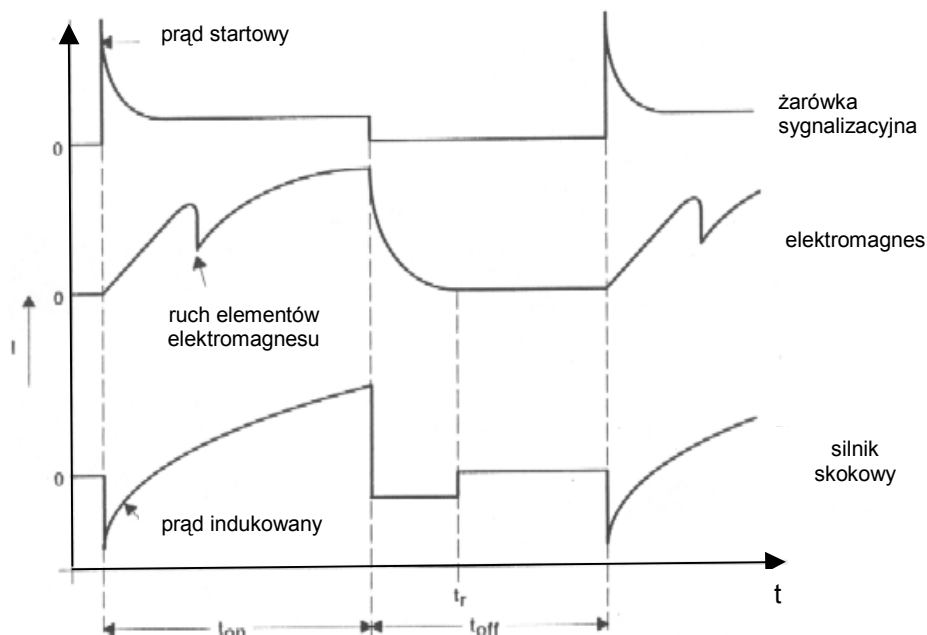
Rys. 4. Charakterystyka zasilania dla napięcia stałego +24V (przykładowy).

Typy obciążeń

Do analizy, projektowania UWD potrzebna jest wiedza o typie sterowanego obciążenia, wielkości potrzebnej mocy, energii. Potrzebne są parametry obciążenia w stanie włączania, wyłączania, w stanach przejściowych i stanach awarii. Za każdym razem trzeba uwzględnić specyfikę aplikacji. Zjawiska w obciążeniu należy zweryfikować pomiarowo, niezależnie od wcześniejszych analiz teoretycznych.

Możemy wyróżnić zasadnicze trzy typy obciążenia: **rezystancyjne**, **pojemnościowe** i **indukcyjne**. W praktyce obciążenia mają charakter mieszany. Są nieliniowe, zmienne w czasie, zawierają także zmienne **siły elektromotoryczne**.

Ilustracją możliwej różnorodności obciążenia jest Rys. 5 przedstawiający prąd w elemencie kluczącym (o tym samym prądzie ustalonym) współpracującym z: żarówką, elektromagnesem, uzwojeniem silnika skokowego.

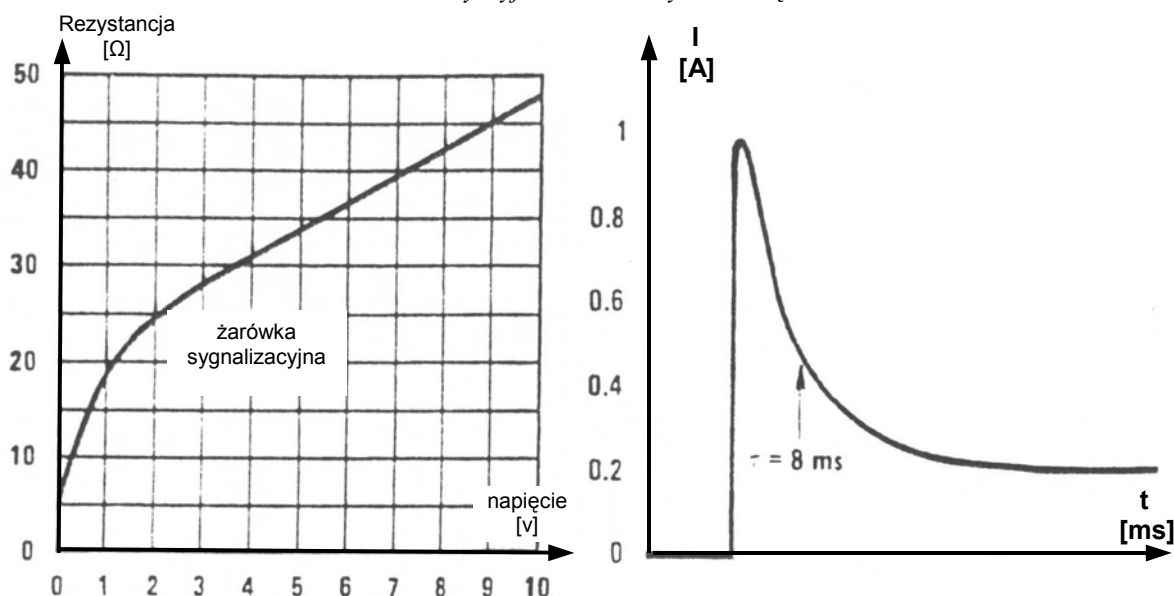


Rys. 5. Prąd w różnych obciążeniach wyjścia.

Obciążenie rezystancyjne

Zdefiniowanie obciążenia rezystancyjnego wymaga tylko określenia: rezystancji, dopuszczalnego prądu, dopuszczalnego napięcia, dopuszczalnej wydzielanej mocy, współczynnika wypełnienia impulsów. Pozwala to określić wydzielaną moc, warunki chłodzenia. Należy pamiętać o wpływie zawsze obecnej szczytkowej indukcyjności i pojemności w obciążeniu.

Typowym przypadkiem obciążenia rezystancyjnego są elementy nagrzewające się. Są to elementy nieliniowe, (np. żarówki sygnalizacyjne), których rezystancja zwiększa się kilka razy od zimnego włókna do świecącego się. Należy pamiętać o nieliniowości rezystorów wynikającej z nagrzewania i nieliniowości chłodzenia, jak i inercji wynikającej z pojemności cieplnej (bezwładność cieplna) powodującej przetężenia przy włączeniu. Przykład charakterystyki statycznej i przebiegu prądu włączenia żarówki przykładowej jest przedstawiony na Rys. 6. Podobne zjawiska występują w elementach grzejnych.



Rys. 6. Charakterystyka statyczna i przebieg prądu włączenia żarówki.

W przypadku obciążenia nieliniowego o wartości ustalonej prądu $I_0 = 1\text{ A}$ szczytowa wartość prądu przy włączeniu może wynieść np. $I_p = 5\text{ A}$. Jest to częsty powód uszkodzania elementów nieliniowych (np. żarówek) przy włączaniu, często z przejściowym zwarcie. Zwarcie powoduje możliwość uszkodzenia klucza.

Możemy stosować dwa sposoby zabezpieczenia klucza przed uszkodzeniem:

a) Przewymiarować zdolności łączeniowe klucza. W tym przypadku zastosować klucz o prądzie przełączanym większym od maksymalnego. Zastosowane układy mają większe gabaryty wynikające z dostosowania ich do chłodzenia przy większych prądach. Istotną wadą jest działanie ograniczenia prądowego (ustawianego) dopiero powyżej 5 A w przypadku awarii (zwarcia).

b) Zastosować układ z ograniczeniem prądowym. Układ z ograniczeniem prądowym na poziomie nieco ponad 1 A, działa tylko podczas włączenia (przetężenie). Zastosowane układy są z reguły mniejsze. Należy uwzględnić niezbędne chłodzenie. Dodatkową zaletą jest wielokrotne zwiększenie żywotności dołączonych elementów nagrzewanych.

Typy obciążeń – obciążenie pojemnościowe

Obciążenie tego typu jest spotykane dość rzadko. Najczęściej jest skojarzone z obciążeniem rezystancyjnym. Są to często gotowe urządzenia elektroniczne z filtrem kondensatorowym na wejściu. Obciążenie pojemnościowe daje bezpieczne rozłączanie klucza. Zagrożeniem jest bardzo duży prąd przy włączeniu obciążeniu. Spotykane przypadki to włączenia napięć zasilających z filtrami pojemnościowymi przyłączonymi do wyjścia klucza.

Typy obciążeń – obciążenie indukcyjne

Jest to najczęściej spotykany typ obciążenia i równocześnie najtrudniejszy do prawidłowego sterowania. Zawsze obok indukcyjności występuje składowa rezystancyjna, a często i pojemnościowa. W indukcyjności zgromadzona jest energia (np. elektromagnesu) oraz występuje często siła elektromotoryczna indukowana z ruchu mechanicznego (zmienna reluktancja) lub przemieszczanie magnesów w dołączonym uzwojeniu silnika. Zasadniczą trudnością jest konieczność wytłumienia energii wracającej do klucza przy rozwarciu obwodu.

Elementy kluczujące – zasady doboru

Podstawową częścią obwodu wyjść dwustanowych jest element kluczujący.

Przed określeniem typu i parametrów elementu kluczującego należy określić **parametry obwodu i zjawiska jakie w nim występują**. Podstawowe parametry to:

- prąd ustalony płynący w obwodzie przy włączeniu,
- prądy w stanach nieustalonych (włączenie i wyłączenie),
- napięcie zasilania U (min., max., profil zasilania),
- energia dostarczona do obwodu z zewnątrz (np. przemieszczenie elektromagnesów, piezoelektryki itp.),
- energia wydzielana w postaci ciepła,
- energia wracająca do układu (indukcyjności).

Dobór elementu przełączającego wymaga **określenia** szeregu **cech**:

- typ zastosowanego elementu kluczującego:
 - tranzystor bipolarny – BJT,
 - tranzystory polowe – MOSFET,
 - tranzystory bipolarne z izolowaną bramką – IGBT,
- stopień integracji – ilość kluczy (elementy pojedyncze lub wielokrotne),
- obecność elementów zabezpieczających w obwodzie (główne zjawiska to: zwarcia, przetężenia, przegrzania, przepięcia, zanik zasilania, zwarcie do zasilania, rozwarcie obciążenia itp.),
- sposoby sterowania (statyczne lub impulsowe, kodowe - szeregowo lub równoległe),
- typ zasilania (prąd stały lub zmienny).

Dalej będziemy zajmować się tylko **wyjściami stałoprądowymi**.

Obwody zmiennoprądowe omówiono przy **łącznikach półprzewodnikowych prądu zmiennego**.

Wykorzystywane jako klucze tranzystory mocy spełniają przede wszystkim funkcje łączników elektronicznych. Stosowane tranzystory mocy pracują dwustanowo, czyli w warunkach normalnej eksploatacji powinny się znajdować w jednym z dwóch stanów:

- **załączenie** (gdy tranzystor jest wystawiony do stanu nasycenia, a prąd obciążenia jest ograniczony jedynie parametrami odbiornika),
- **wyłączenie** (gdy tranzystor jest niewystawiony, a prąd obciążenia jest bliski zeru).

W chwili obecnej w większości układów małej i średniej mocy elementem kluczującym są tranzystory unipolarne (MOSFET). Dla podobnej klasy układów stosujemy tradycyjne tranzystory bipolarne (BJT). Przy większych mocach stosujemy tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (IGBT).

Właściwości tranzystorów bipolarnych (BJT) jako kluczy zostały opisane (przypomniane) w **Dodatku A**, tranzystorów unipolarnych (MOSFET) w **Dodatku B** i tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (IGBT) w **Dodatku C**.

Przy mniejszych mocach stosuje się inteligentne układy scalone mocy (IPIC).

Elementy sterujące wejść dwustronnych można pogrupować też wg **stopnia integracji**:

- pojedyncze elementy kluczujące (podział na obciążenie przy biegunie dodatnim lub ujemnym zasilania),
- wielokrotne elementy kluczujące (układ wielu identycznych kluczy, układy mostkowe, półmostkowe, mostki trójfazowe),
- elementy z rozbudowanymi funkcjami logicznymi (bramkowanie wyjść, pamiętanie, transmisja szeregowo, adresowanie wyjść),

Układy wyjść dwustanowych - I część

- elementy z zabezpieczeniami (nadprądowe, nadnapięciowe, przeciążeniowe, przegrzanie, zwarcia, rozwarca wyjścia, sygnalizacja stanów awaryjnych itp.),
- elementy z zintegrowanymi blokami programującymi funkcję.

W produkowanych układach scalonych mogą występować różne kombinacje w/w cech.

Energia wydzielana w elemencie kluczącym

Obliczenie wydzielanej mocy jest ważnym parametrem warunkującym dobór elementu kluczącego. Pozwala to dobrać element o właściwej wielkości bez przewymiarowania i równocześnie bez przegrzewania.

Moc wydzielana w kluczu składa się z trzech składowych:

- Energia wydzielana w czasie włączenia klucza P_{on} ,
- Energia z przebieg w obwodzie (indukcyjności) wydzielana wewnątrz układu w elementach przeciwprzebiegowych P_{off} ,
- Moc potrzebna do zasilania układów sterujących wewnątrznych P_q .

Pomija się energię strat przełączenia samego elementu kluczącego ze względu na względnie małą częstotliwość łączeń (np. w porównaniu z przetwornicami).

Zależności pokazujemy na przykładzie tranzystora MOSFET, najczęściej stosowanego obecnie klucza.

Moc wydzielana w czasie włączenia klucza

Przy włączeniu obciążeń rezystancyjnych moc wydzielaną w kluczu w czasie włączenia klucza opisuje zależność: $P_{on(av)} = I_d^2 \cdot r_{DS(on)} \cdot d$

gdzie: $P_{on(av)}$ - średnia moc wydzielana w czasie włączenia

I_d - prąd drenu

d - współczynnik wypełnienia

$r_{DS(on)}$ - rezystancja dren-źródło przy włączeniu

Rezystancja R decyduje o stratach mocy, przy włączeniu obciążeń indukcyjnych L o małej stałej czasowej $\tau = \frac{L}{R}$ w stosunku do czasu włączenia klucza t_{on} .

Przy wyraźnie indukcyjnym charakterze obciążenia $\frac{L}{R} \gg t_{on}$ prąd narasta liniowo osiągając wartość szczytową - I_p (np. w uzwojeniach silników skokowych). Kwadrat wartości

skutecznej takiego przebiegu to $\frac{1}{3} I_p^2$. Średnia moc wydzielana w czasie włączenia wyniesie:

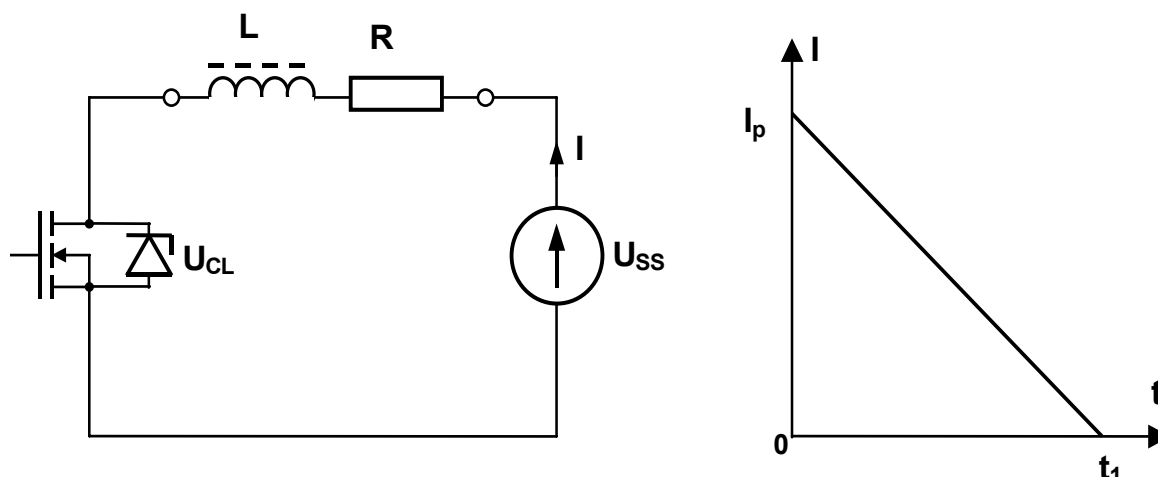
$$P_{on(av)} = \frac{1}{3} \cdot I_p^2 \cdot r_{DS(on)} \cdot d$$

Energia przebieg przejmowana przez układ

Energia zgromadzona w indukcyjności obciążenia musi być rozładowana po rozwarciu obwodu. Brak elementów rozładowujących energię powoduje powstanie niekontrolowanego przebiegu (efekt di/dt) niszczącego półprzewodnikowy element kluczący (np. efekt drugiego przebiegu). Rozwiązaniem jest umieszczenie elementów rozładowujących energię na zewnątrz lub wewnątrz układu scalonego. Typowym rozwiązaniem stosowanym w układach scalonych są diody lub diody Zenera (Rys. 7).

Przebieg opadania prądu jest rozwiązaniem równania

$$L \frac{dI(t)}{dt} = (U_{CL} - U_{SS}) + I(t) \cdot R$$



Rys. 7. Przejmowanie przepięć przez diodę Zenera - uproszczony przebieg prądu.

Energia wydzielana w diodzie Zenera

$$E_T = \int_0^{t_1} U_{CL} \cdot I(t) dt$$

Rozwiązanie uproszczone (założenie liniowego opadania prądu) daje zależność

$$E_T = \frac{3 \cdot L I_p^2 \cdot U_{CL}}{6(U_{CL} - U_{SS}) + 4R \cdot I_p} \quad (\text{JEDEC Standard No.10})$$

$$P_{off} = E_T \cdot f \quad \text{gdzie } f - \text{częstotliwość wyłączenia}$$

Jeżeli w układzie występuje więcej kluczy to łączna moc wydzielana w układzie

$$P_T = (P_{on} + P_{off}) \cdot n + P_q \quad \text{gdzie } n - \text{liczba kluczy}$$

Znając moc wydzielaną możemy określić z parametrów termicznych układu przyrost temperatury układu scalonego, a w przypadku przegrzania określić niezbędną wielkość radiatora chłodzącego.

Obwody odciążające klucze

Energię wydzielaną w elemencie czynnym (kluczu) można wydzielić w elementach zewnętrznych nazywanych obwodami i elementami odciążającymi. Przy stosowaniu elementów półprzewodnikowych istnieje potrzeba stosowania zewnętrznych obwodów odciążających z następujących powodów:

1. Ograniczenia przepięć podczas wyłączania obciążenia indukcyjnego.
2. Ograniczenie nakładania się przebiegów prądu i napięcie w czasie przełączania, co wiąże się z wydzielaną mocą.
3. Zmniejszania się stromości narastania prądu obciążenia i minimalizowanie przetężeń pojawiających się przy załączaniu.

W praktyce występuje najczęściej połączenie kilku obwodów odciążających. Układy o niskiej częstotliwości przełączania, a dużej wartości indukcyjności i prądu obciążenia są typowe dla wykonawczych elementów automatyki (cewki przekaźników, elektromagnesy, uzwojenia silników skokowych). Najistotniejszym powodem stosowania elementów odciążających jest zgromadzona w indukcyjności energia.

Pozostałe zjawiska wymienione w punkcie 2 i 3 mają dominujące znaczenie przy dużych częstotliwościach przełączania, gdzie zwiększają wydzielaną w kluczu moc, zmniejszając tym samym niezawodność. Warunkują także poziom zakłóceń emitowanych przez układy.

Elementy zabezpieczające zewnętrzne można dobrać i wyliczyć analitycznie podobnie jak energię wydzielaną w zabezpieczeniu wewnętrznym klucza, jak pokazano wyżej. Powinniśmy uwzględnić następujące czynniki:

- a) prąd i napięcie w obwodzie,
- b) indukcyjność obwodu,
- c) szybkość wyłączenia klucza,
- d) wymaganą szybkość zaniku prądu w obciążeniu przy wyłączeniu,
- e) maksymalne dopuszczalne napięcie, wydzielana moc i prąd klucza,
- f) długość linii transmisyjnych i zjawiska wynikające z ich indukcyjności i pojemności,
- g) poziomu przepięć indukowanych w liniach w stanach normalnych i awaryjnych,
- h) zwarcia i przetężenia w obciążeniach,
- i) praca z obciążeniami typu pojemnościowego lub nieliniowego,
- j) możliwość zwarć linii sygnałowych do napięcia zasilania układu,
- k) możliwość omyłkowego dołączenia zamiast obciążenia zewnętrznych napięć stałych lub zmiennych,
- l) poziom zakłóceń wysokiej częstotliwości indukowanych w liniach transmisyjnych.

Do zabezpieczenia układów przed skutkami wyżej wymienionych narażeń stosujemy środki techniczne zgrupowane trzech podstawowych grupach:

A. Ochrona przepięciowa:

- tłumiki RC,
- tłumiki RCD,
- ograniczniki diodowe, diody Zenera, diody zabezpieczające,
- nieliniowe elementy bierne (warystory).

B. Ochrona przetężeniowa i zwarciorowa:

- zabezpieczenia przeciążeniowe elektroniczne,
- zabezpieczenia przed zwarciami do napięć zasilających (wykrywanie zwarć),
- elementy bierne termiczne (termistory, pozystory, bimetale),
- bezpieczniki.

C. Ochrona przed zakłóceniami szerokopasmowymi:

- filtry przeciwzakłóceńowe.

Ochrona przepięciowa klucza - obciążenie indukcyjne.

Wartości prądu i indukcyjności dają informację o nagromadzonej w obwodzie energii

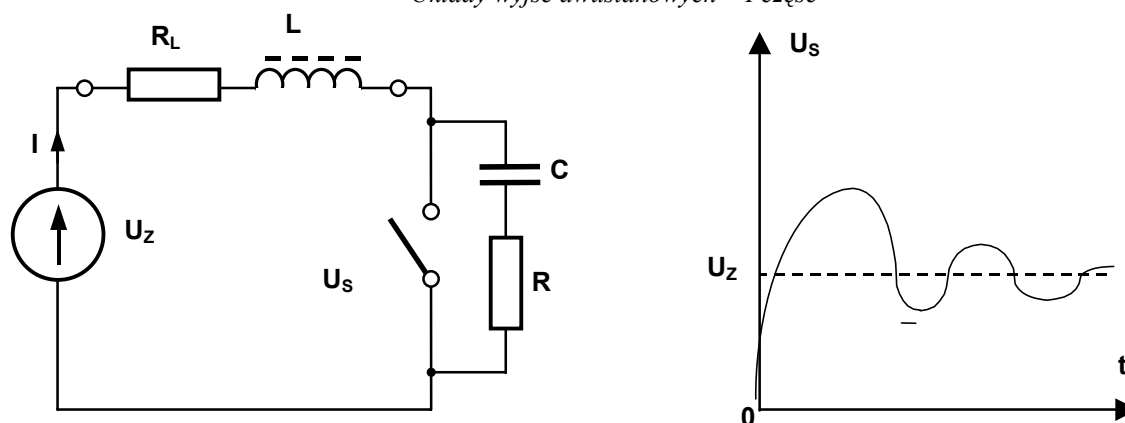
$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$
. Przy rozłączeniu obwodu energia ta musi się rozładować. O ile nie zapewnimy

możliwości kontrolowanego jej rozładowania to powstają przepięcia i energia rozładowuje się w sposób powodujący uszkodzenia. Gdy zależy nam na szybkim przerwaniu (obniżeniu natężenia) prądu w obwodzie (np. prędkość wyłączenia przełącznika) to musimy się liczyć z większym przepięciem.

Tłumiki RC - gasiki

Tłumiki RC stosowane są najczęściej równolegle z elementem kluczującym lub równolegle do obciążenia (rzadko).

Dobór wartości elementów tłumika RC i ich parametrów wymaga przeanalizowania zjawisk w obwodzie z obciążeniem indukcyjnym przy rozwieraniu (rys.8) obwodu.



Rys. 8. Układ tłumiący RC.

Pytanie: Dlaczego przeważnie stosuje się tłumienie mniejsze od krytycznego $R_K = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$

Zadanie: Przeprowadzić symulację kluczowania na powyższym układzie dla różnych zestawów tłumika RC.

Zadanie: Rozwiąż równanie różniczkowe opisujące powyższy obwód i określić największą amplitudę na kluczu (pomiń R_L).

Pytanie: Do jakiej wartości naładuje się kondensator w czasie trwania przełączenia, dla uproszczenia zrezygnujemy z rezystora R (pomiń R_L).

Przy rozwieraniu tworzy się z obciążeniem szeregowy układ RLC silnie tłumiony o częstotliwości drgań własnych wielokrotnie większych od częstotliwości przełączania. Przy rozwieraniu klucza prąd płynie przez obciążenie obniżając swoją amplitudę i ładuje kondensator C. Energia przepięcia zostaje wytłumiona w rezystancji R gasika. Określanie wartości pojemności C oporności i mocy rezystora R wynika z:

- z dopuszczalnej amplitudy przepięcia na kluczu;
- prądu obciążenia;
- indukcyjności obciążenia;
- napięcia zasilania obwodu;
- częstotliwości przełączeń.

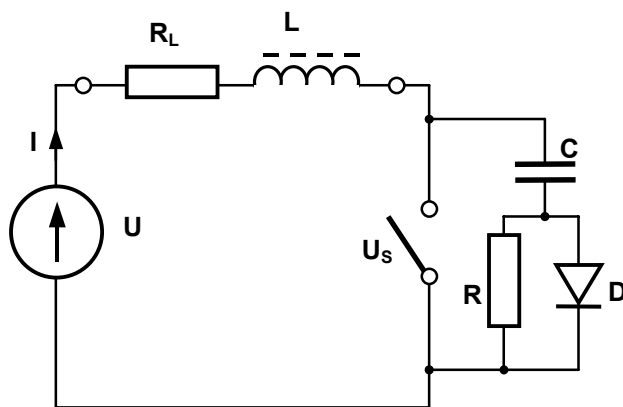
Podczas włączenia klucza energia zmagazynowana w kondensatorze ($W_C = 0,5CU^2$) rozładowuje się przez klucz. Amplitudę impulsu prądu dodającego się do prądu obciążenia ogranicza rezystor R. Stała czasowa RC musi być mniejsza od czasu pomiędzy włączeniami klucza, aby zapewnić rozładowanie. Jednocześnie rezystancja R musi być na tyle duża, aby nie dodawać znacznego impulsu prądu rozładowania kondensatora C do prądu w kluczu.

Zadanie: Dla $U=24V$, największego dopuszczalnego przepięcia na kluczu $U_{kmax}=100V$, prądu końcowego $I_p=1A$, częstotliwości włączania $f=1kHz$, współczynnik wypełnienia $d=0,5$, indukcyjności $L=1H$, określ R, C, moc opornika.

Tłumiki RCD

Sprzeczne wymagania na wartości elementów R i C (szybkie ładowanie i wolne rozładowanie kondensatora C) rozwiązuje tłumik RCD pokazany na Rys. 9. Przy wyłączeniu klucza kondensator szybko przejmuje energię z indukcyjności i ładuje się do wartości

szczytowej U_s . Można użyć przybliżenia energetycznego: $\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2}$. Następnie dioda się zatyka i następuje rozładowanie kondensatora w obwodzie szeregowym R_L, L, C, R do wartości U . Po powtórным włączeniu klucza nie występuje uder prądu z rozładowania kondensatora (wynikało to uprzednio z postulatu małej rezystancji R), lecz dalsze rozładowanie kondensatora C do niskiej wartości napięcia. Stała czasowa powinna zapewnić rozładowanie kondensatora pomiędzy kolejnymi wyłączeniami.



Rys. 9. Tłumik RCD.

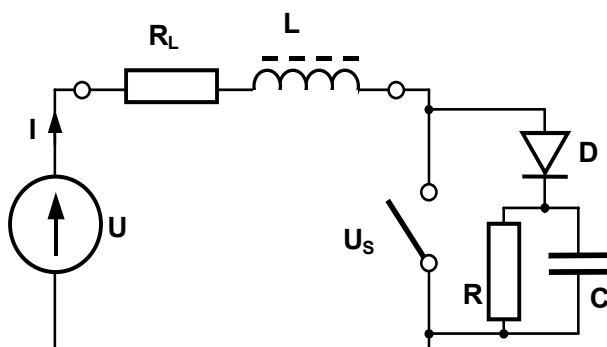
Zadanie: Przeprowadź symulację komputerową powyższego układu dla przyjętych własnych założeń.

Zadanie: Porównaj w symulacji moc (energie) traconą w rzeczywistym elemencie kluczującym przy wyłączeniu (nakładanie prądów i napięć) z powyższym tłumikiem i bez niego. Na ile tę energię przejmie tłumik?

To rozwiązanie jest powszechnie stosowane do odciążania tranzystora kluczującego np. w zasilaczach impulsowych.

Pytanie: Jakie wymagania powinien spełniać kondensator pracujący w układzie z Rys. 9?

W sytuacji, gdy nie jest istotne minimalizowanie strat w kluczu, lecz jedynie ograniczenie przepięcia stosujemy układ elementów DRC pokazany na Rys. 10.



Rys. 10. Tłumik DRC.

Stałą czasową RC dobieramy tak, aby kondensator pomiędzy wyłączeniami rozładował się na tyle, aby móc przejąć energię następnego przepięcia i ograniczyć go do wymaganego

poziomu. Pomocne do obliczeń może być przybliżenie energetyczne $\frac{LI^2}{2} = \frac{C(\Delta U_c)^2}{2}$

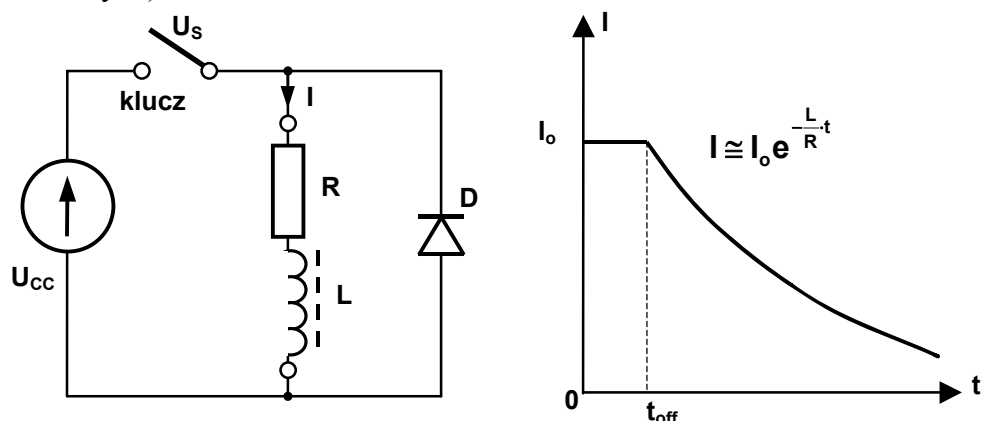
Zadanie: Porównaj straty energii w obu tłumikach R,C,D (Rys. 9 i Rys. 10) w porównywalnym układzie. Przyjąć jako założenie projektowe maksymalne napięcie na kluczu.

Ograniczniki diodowe (diody, diody Zenera).

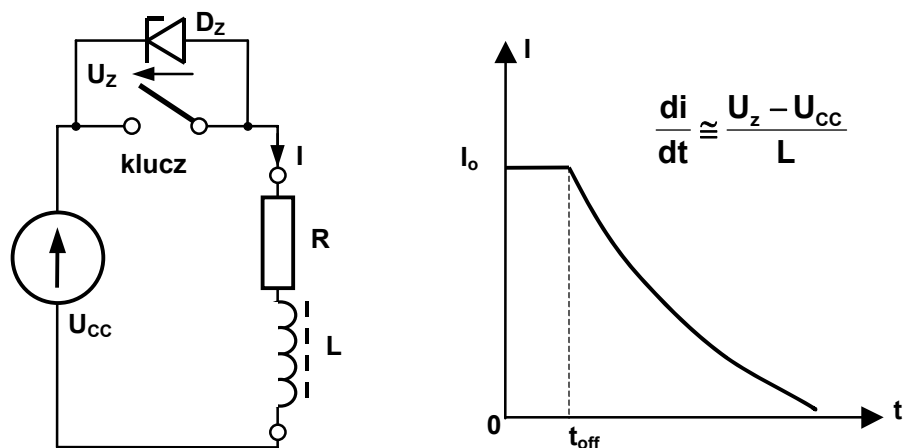
Postęp w dziedzinie półprzewodników spowodował wypieranie tłumików biernych. Wynika to z następujących przyczyn:

1. Wzrostu szybkości elementów przełączających. Powoduje to zmniejszenie strat przełączania zwłaszcza przy małych szybkościach przełączania. Minimalizuje to potrzebę przesuwania tych strat w elementy bierne.
2. Postęp w konstrukcji elementów półprzewodnikowych (np. diody zabezpieczające) mogących przejmować bardzo duże moce impulsowe energii i znaczne moce średnie. Duża szybkość reakcji tych elementów jako zabezpieczeń.
3. Zdolność przejmowania i wydzielania energii elementach półprzewodnikowych powodują, że energię (moc) napięcia możemy przesuwać z elementów biernych do elementów czynnych bez pogarszania niezawodności układów.

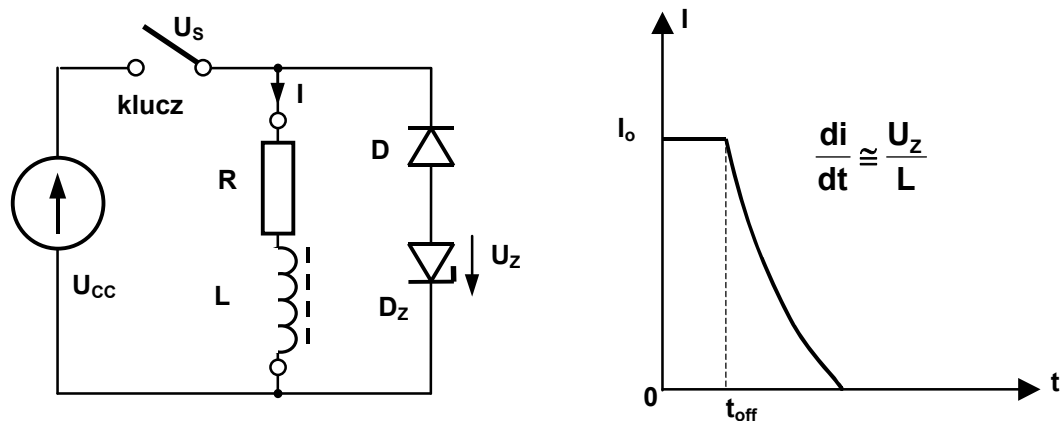
Podane na Rys. 11,12,13 przykłady zastosowania elementów diodowych ilustrują równocześnie możliwość kształtowania szybkości zanikania prądu w obciążeniu przy wyłączeniu klucza, co ma znaczenie dla szybkości działania układów elektromechanicznych (czas zwalniania kotwicy przekaźników, w silnikach krokowych).



Rys. 11. Zastosowanie diody przyłączonej równolegle do obciążenia.



Rys. 12. Zastosowanie diody Zenera przyłączonej równolegle do klucza.



Rys. 13. Zastosowanie diody Zenera przyłączonej równolegle do obciążenia.

Pytanie: W którym z powyższych układów przepięcie na kluczu jest największe?

Diody zabezpieczające stosowane jako ograniczniki przepięć opisano w dodatku D zaś warystory w dodatku E.