

mgr inż. GRZEGORZ HESZEN

Przemysłowy Instytut Automatyki
i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

OCHRONA CYFROWYCH URZĄDZEŃ ELEKTRONICZNYCH PRZED ZAKŁÓCENIAMI ELEKTROMAGNETYCZNYMI

W artykule podano praktyczne zasady konstruowania cyfrowych urządzeń elektronicznych odpornych na zakłócenia. Przestrzeganie tych zasad zabezpiecza konstruktora przed kłopotliwymi i kompromitującymi poprawkami w urządzeniach zainstalowanych u odbiorcy.

1. Źródła i przyczyny zakłóceń

Ogólnie, zakłócenia w pracy urządzenia mogą być natury wewnętrznej lub mogą przedostawać się do urządzenia z zewnątrz.

Zakłócenia wewnętrzne powstają wtedy, gdy zmiany stanów elementów urządzenia powodują niezamierzone zmiany stanów innych elementów urządzenia. Przyczyną tego jest najczęściej wzajemne oddziaływanie elementów przez ich obwody zasilania na skutek zbyt dużej impedancji linii zasilania lub zasilacza, a także w wyniku występowania wspólnej impedancji między obwodami o znacznie różniących się poborach prądowych (obwody sygnałowe i zasilania).

Zakłócenia wewnętrzne mogą być także spowodowane sprzężeniami pojemnościowymi i indukcyjnymi pomiędzy liniami wiodącymi sygnały silnopiędowe i sygnały słabopiędowe; w wyniku tych sprzężeń w liniach wiodących sygnały słabopiędowe powstają impulsy wywołane zmianami sygnału w liniach silnopiędowych.

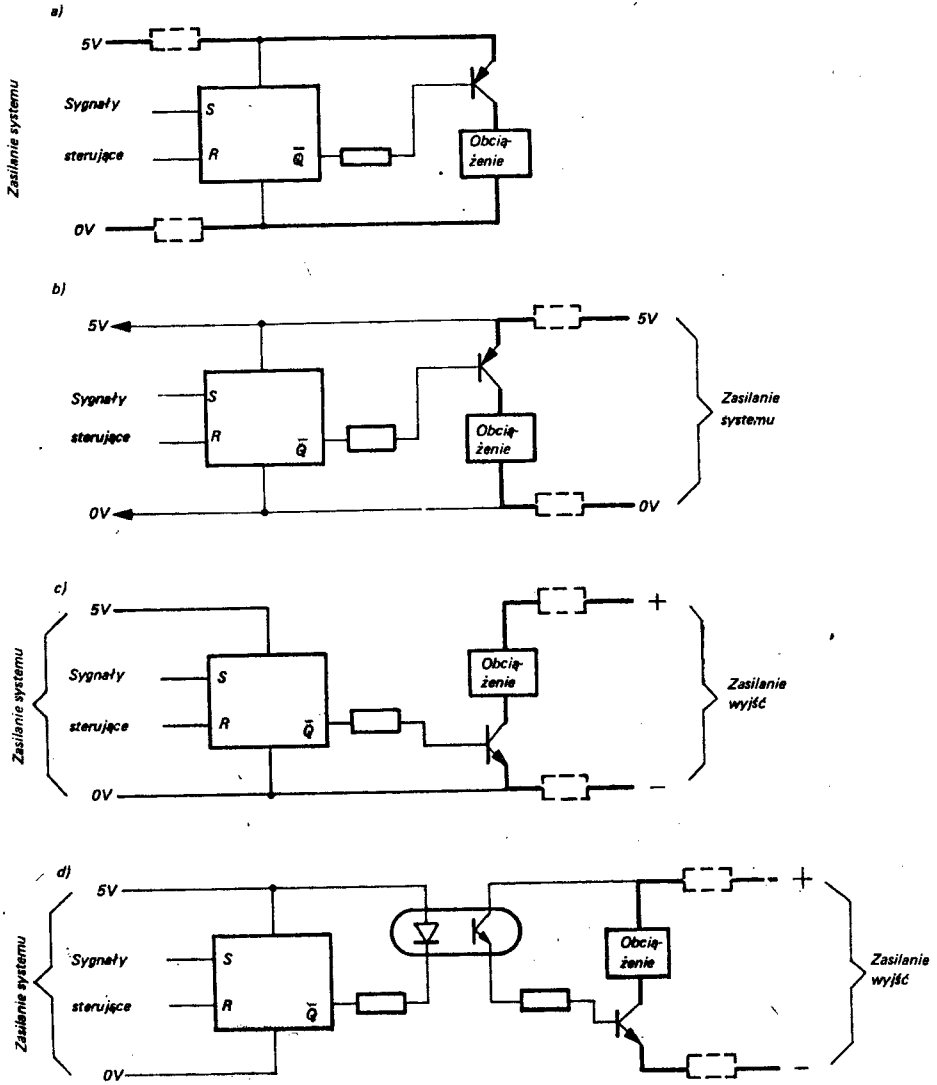
Źródłem zakłóceń przedostających się do urządzenia z zewnątrz są inne urządzenia zasilane z sieci, zwłaszcza w momencie ich załączania i wyłączania, a także urządzenia mogące generować zakłócenia w czasie pracy (np. zgrzewarki elektryczne, urządzenia tyrystorowe, silniki komutatorowe itp). Przyczyną zakłóceń zewnętrznych mogą być też wyładowania elektrostatyczne osób obsługujących urządzenie.

Zakłócenia zewnętrzne mogą przedostawać się do urządzenia zarówno przez linie zasilania sieciowego, jak też linie transmisji danych i linie wejść/wyjść.

2. Ochrona urządzeń przed zakłóceniami wewnętrznymi

Proste przykłady generowania zakłóceń wewnętrznych na skutek występowania wspólnej impedancji między obwodami o znacznie różniących się poborach prądowych przedstawia rys.1. Pokazano na nim współpracę przerzutnika lub rejestru ze stopniem mocy sterującym lampką, przekaźnikiem, zaworem lub innym elementem pobierającym znaczny prąd.

Rysunek 1a i b obrazuje współpracę elementów przy zasilaniu ze wspólnego źródła, przy czym na rys. 1a. zasilanie jest doprowadzone od strony części cyfrowej, a na rys. 1b — od strony sterowanego elementu. Główną ścieżką przepływu prądu pokazuje linia pogrubiona, zaś linia przerywana — impedancje



Rys.1. Przykłady różnych połączeń zasilania i ich wpływ na generowanie wewnętrznych zakłóceń

połączeń, na których może występować istotny spadek napięcia, zwłaszcza w momentach włączania i wyłączania sterowanego elementu. W sytuacji przedstawionej na rys. 1a zasilanie jest doprowadzone nieprawidłowo, gdyż spowodowany przepływem prądu spadek napięcia na impedancjach połączeń jest przyczyną zmiany napięcia odniesienia 0V i zasilania 5V przerzutnika względem sygnałów sterujących. W skrajnym wypadku może to doprowadzić do niepożądanego zmiany stanu przerzutnika przy

włączeniu lub wyłączeniu sterowanego elementu. Rozwiązanie przedstawione na rys. 1b jest nieco lepsze, gdyż spadek napięcia na impedancjach połączeń nie zmienia napięcia odniesienia przerzutnika względem sygnałów sterujących. Rozwiązanie to nie zapewnia jednak stałości napięcia zasilania systemu, gdyż przy włączeniu elementu sterowanego napięcie zasilania systemu maleje o spadek napięcia na impedancjach połączeń.

Prawidłowe rozwiązania oddzielenia zasilania elementów silno- i słaboprądowych przedstawione są na rys. 1c i d. Rozwiązania te wymagają użycia dwóch zasilaczy, jednakże nie jest to wadą wobec faktu, że sterowane elementy wymagają zwykle innego napięcia niż napięcie zasilania systemu cyfrowego. Jak widać na rys. 1c, przepływ prądu w obwodzie elementu sterowanego nie wywołuje ani zmian napięcia odniesienia przerzutnika, ani spadku napięcia zasilania systemu. Jeszcze lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie izolacji galwanicznej w postaci transoptora (rys. 1d), które dodatkowo zabezpiecza przed przedostawaniem się zakłóceń zewnętrznych do systemu poprzez linie zasilania sterowanych elementów. W powyższych przykładach pominięto, dla uproszczenia, impedancje wewnętrzne zasilaczy. Oczywiście jest, że w celu uzyskania jak najniższych spadków napięcia impedancje zasilaczy powinny być jak najmniejsze.

W dużych systemach cyfrowych, gdzie występuje wiele zespołów, najczęściej w formie pakietów, istotne jest także rozproszczenie sieci zasilania. Należy kierować się przy tym zasadą, aby różnice napięć odniesienia 0V i 5V poszczególnych zespołów (pakietów) były jak najmniejsze. Przykłady dwóch sposobów rozproszczenia zasilania w dużych systemach przedstawia rys. 2. W rozwiązaniu pokazanym na rys. 2a napięcie odniesienia 0V np. zespołu n jest wyższe od napięcia odniesienia zespołu 1 o spadki napięcia na ciągu impedancji połączeń $Z_2 \dots Z_n$, wywołanych poborem prądu przez zespoły 1, 2, ..., $n-1$. Różnica napięć odniesienia zespołu 1 i zespołu n może prowadzić do niewłaściwego odbioru sygnałów przesyłanych pomiędzy tymi zespołami. Lepsze rozwiązanie, pokazane na rys. 2b, eliminuje spadki napięcia odniesienia we wspólnej dla wszystkich zespołów szynie zasilania (brak impedancji $Z_2 \dots Z_n$), przez co różnice napięć odniesienia są niższe niż w wypadku 2a.

W praktyce, przy zachowaniu możliwie krótkich połączeń obwodów zasilania i dostatecznie grubych połączeniach, różnice napięć odniesienia nie są na tyle duże, aby w stanie ustalonym wartości sygnałów wychodziły poza dopuszczalny margines odporności na zakłócenia. Na przykład, dla układów TTL margines odporności na zakłócenia wynosi:

dla stanu logicznego 0

$$V_i(0) - V_o(0) = 0,8V - 0,4V = 0,4V$$

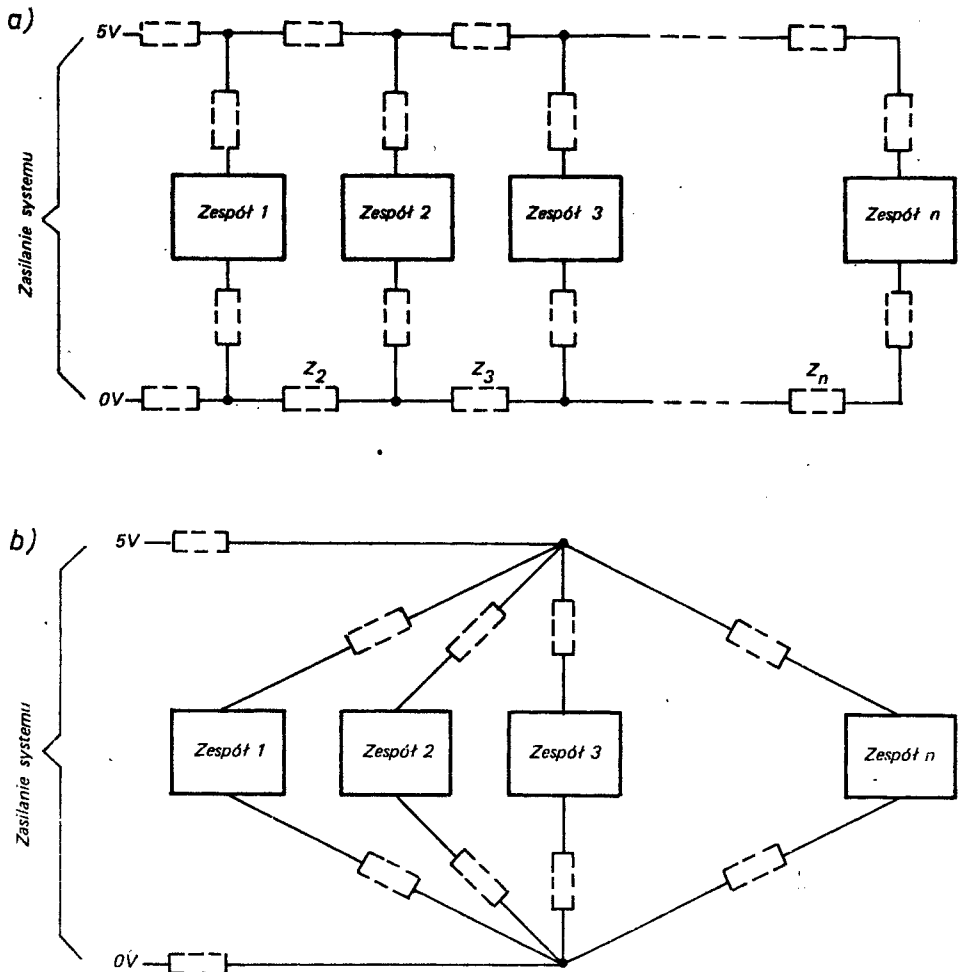
dla stanu logicznego 1

$$V_o(1) - V_i(1) = 2,4V - 2,0V = 0,4V,$$

gdzie V_o , V_i — odpowiednio napięcie wyjściowe lub wejściowe bramki.

Aby zatem system zbudowany z elementów TTL był niezakłócalny wewnętrznie w stanie ustalonym, wystarcza, aby różnice napięć odniesienia nie przekraczały 0,4V. W prawidłowo zaprojektowanym systemie różnice napięć odniesienia wynikające ze spadków napięcia na liniach odniesienia nie przekraczają kilkudziesięciu miliwoltów.

W rzeczywistości w każdym systemie cyfrowym występują stany dynamiczne, które powodują chwilowe zmiany poboru prądu. Zmiany te są źródłem zakłóceń dynamicznych, związanych z chwilowymi zwiększonymi spadkami napięcia na rezystancjach i indukcyjnościach przewodów zasilania. Generowane w ten sposób zakłócenia dynamiczne dodają się do statycznych różnic napięć odniesienia. W rezultacie na liniach zasilania mogą powstać impulsy zakłócające o wartościach przekraczających dopuszczalny margines odporności na zakłócenia. W celu uniknięcia zakłóceń dynamicznych, w liniach zasilania stosuje się sieci kondensatorów o małej indukcyjności, skutecznie zmniejszających impedancje linii. Na podstawie powyższych rozważań można podać zbiór zaleceń, ułatwiających konstruowanie urządzeń odpornych na zakłócenia wewnętrzne.



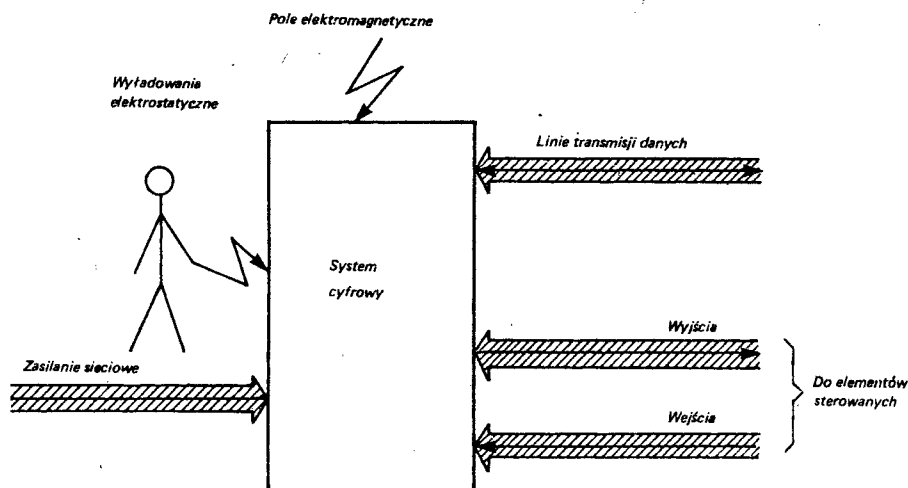
Rys.2. Przykłady różnych połączeń zasilania w systemach zawierających wiele zespołów

1. Jeżeli w urządzeniu istnieją obwody silnoprądowe i słaboprądowe, to w wypadku konieczności zasilania ich ze wspólnego źródła, zasilanie należy doprowadzić od strony obwodów silnoprądowych. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie oddzielnych zasilaczy dla obwodów słabo- i silnoprądowych, a najlepszym — zastosowanie oddzielnych zasilaczy i oddzielenia galwanicznego obwodów.
2. W celu uniknięcia sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych pomiędzy obwodami silno- i słaboprądowymi, połączenia przewodowe i ścieżki powinny być prowadzone w możliwie dużej odległości od siebie. Lepszym rozwiązaniem jest ekranowanie przewodów jednych lub drugich obwodów. Połączenia przewodowe powinny być jak najkrótsze.
3. Zasilanie zespołów urządzenia powinno być rozprowadzone w taki sposób, aby zapewnić najmniejsze różnice napięć odniesienia zespołów, tzn.

- przewody (ścieżki) zasilania powinny mieć małą rezystancję,
 - dystrybucja zasilania powinna być prowadzona jak na rys. 2b,
 - połączenia zasilania powinny być jak najkrótsze.
4. Poszczególne zespoły urządzenia, a także układy mieszczące się w zespołach, powinny mieć obwo-
dy zasilania odsprężone dla przebiegów dynamicznych kondensatorami o małej indukcyjności (ce-
ramicznymi w wypadku pojemności rzędu nanofaradów i tantalowymi w wypadku pojemności rzę-
du mikrofaradów). Kondensatory o dużej pojemności należy umieszczać na wejściach zespołów, na-
tomiaś sieć kondensatorów o małej pojemności na obwodach wewnętrznych zespołów. Również
na wszystkich obwodach zespołów o zwiększonym poborze prądu w stanach dynamicznych, należy
stosować kondensatory o dużych pojemnościach, umieszczone możliwie blisko tych obwodów. Przy
prawidłowym odsprężeniu zespołów mogą one być traktowane jako obciążenie statyczne i wów-
czas zmniejszenie marginesu odporności na zakłócenia wynika tylko z niewielkich różnic napięć od-
niesienia w stanie ustalonym.
5. Należy stosować zasilacze o jak najniższych impedancjach wewnętrznych.

3. Ochrona urządzeń przed zakłóceniami zewnętrznymi

Drugi przedstawiania się zakłóceń zewnętrznych do urządzenia przedstawione są schematycznie na
rys.3.



Rys.3. Drogi przedostawania się zakłóceń zewnętrznych do systemu cyfrowego

Zasilanie sieciowe jest źródłem najsilniejszych zakłóceń oddziałujących na urządzenie. W napięciu sie-
ciowym występują silne impulsy o pasmie do setek MHz. Impulsy te są także promieniowane w przes-
trzeź, tworząc pole elektromagnetyczne oddziałujące na urządzenie.

Linie transmisji danych do innych urządzeń cyfrowych. Na linie te oddziałuje pole elektromagnetycz-
ne, indukując w nich impulsy zakłócające transmisję.

Wejścia i wyjścia do elementów sterowanych przez urządzenie. Impulsy zakłócające indukowane w po-
łączeniach przewodowych oddziałują na urządzenie poprzez wejścia i wyjścia.

Obudowa urządzenia. Poprzez obudowę mogą przedostawać się do urządzenia zakłócenia typu elektromagnetycznego oraz zakłócenia wywołane rozładowaniami elektrostatycznymi.

5.1. Zakłócenia sieciowe

Zakłócenia sieciowe przedostają się do układów urządzenia poprzez przewody zasilania sieciowego, zasilacze i obwody zasilania układów. Zadaniem konstruktora jest niedopuszczenie do przedostania się tych zakłóceń do układów urządzenia oraz takie konstruowanie układów, aby były one odporne na zakłócenia.

Stawianie przeszkód na drodze zakłóceń sieciowych do układów urządzenia powinno się rozpocząć od wejścia tych zakłóceń — czyli miejsca doprowadzenia napięcia sieciowego do urządzenia. Konstruktor ma do dyspozycji następujące elementy przeciwzakłóceńowe:

- filtry sieciowe, zapewniające tłumienie zakłóceń impulsowych o kilkadziesiąt decybeli w pasmie do kilkadziesiąciu megaherców
- ograniczniki amplitudy, działające na zasadzie diod Zenera (transient voltage suppressors). Ograniczniki te mają bardzo małą stałą czasową — czas odpowiedzi jest rzędu nanosekund, dzięki czemu nadają się doskonale do tłumienia impulsów o bardzo krótkich czasach narastania. Moc niepowtarzalnych impulsów tłumionych przez ograniczniki może być rzędu kilkadziesiątu kilowatów,
- warystory, działające podobnie jak ograniczniki Zenera. Moc strat warystorów jest podobna jak ograniczników Zenera, jednakże czas odpowiedzi jest dłuższy — rzędu dziesiątek nanosekund,
- transformatory izolacyjne o przekładni 1:1 i bardzo małej pojemności pomiędzy uzwojeniem pierwotnym, a wtórnym, rzędu femtofaradów (10^{-3} pF). Transformatory takie zapewniają tłumienie impulsów zakłócających rzędu 100 dB w pasmie do setek kiloherców. Ze względu na wyższą cenę w stosunku do innych elementów zabezpieczających, transformatory takie stosowane są zwykle w dużych urządzeniach (komputery).

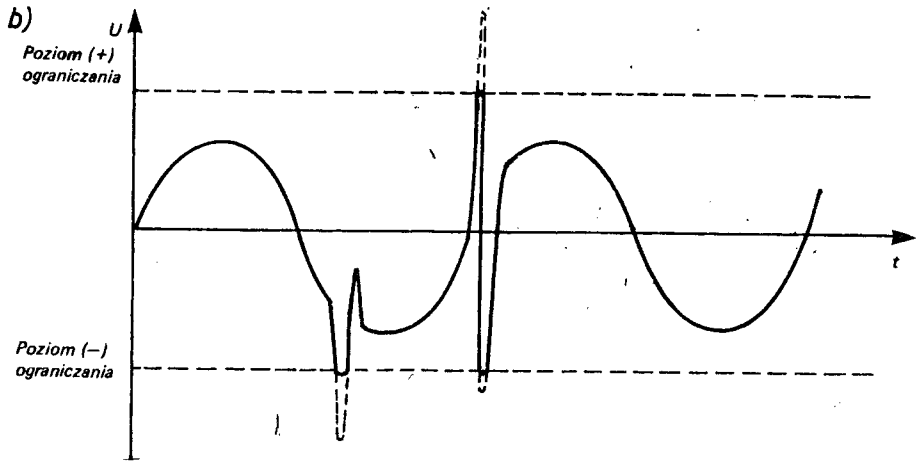
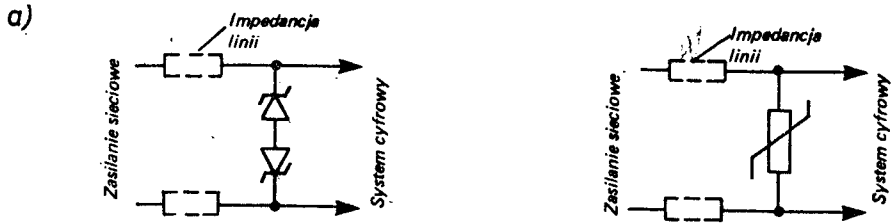
Filtry sieciowe są powszechnie stosowanym środkiem ochrony urządzeń przed przedostawaniem się zakłóceń. Działanie filtrów powoduje tłumienie amplitudy, a tym samym zmniejsza stromość narastania i opadania impulsów zakłócających. Aby filtry działały skutecznie ich wspólny punkt musi być dołączony do przewodu zera ochronnego sieci.

Sposób włączenia i działanie ograniczników Zenera i warystorów przedstawiony jest na rys.4. Linia ciągła na rys.4b pokazuje przebieg napięcia uzyskany w wyniku zastosowania obwodów pokazanych na rys.4a, natomiast linia przerywana — przebieg napięcia sieciowego z impulsami zakłócającymi, które przedostałyby się do urządzenia bez stosowania tych obwodów. Działanie ograniczników jest możliwe dzięki impedancji linii sieciowej (przewodów doprowadzających napięcie sieciowe do urządzenia). Oczywiście napięcie zwierane przez ograniczniki musi być wyższe od amplitudy napięcia sieciowego, aby nie dopuścić do zbyt dużych strat mocy w ogranicznikach w wyniku zwierania przez nie napięcia sieciowego.

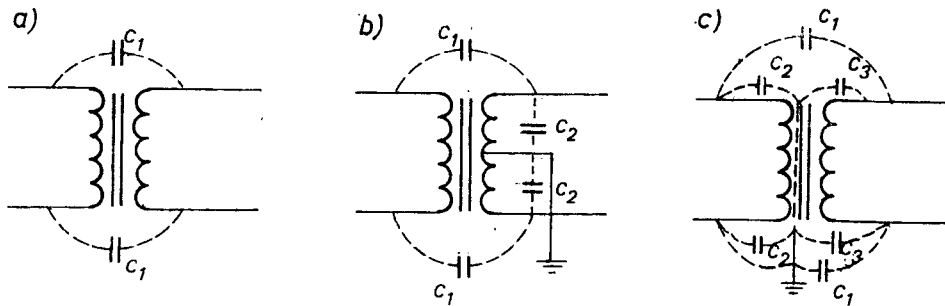
Stosowane są takie zabezpieczenia w postaci kaskadowego połączenia filtrów i ograniczników, które dodatkowo zabezpieczają urządzenie przed impulsami wynikającymi z oscylacji filtru na częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości granicznej filtru (ringing). Ogranicznik powinien być w tym przypadku włączony pomiędzy wyjściem filtru, a wejściem urządzenia. Oczywiście zabezpieczenie w postaci połączenia kaskadowego jest skuteczniejsze niż zabezpieczenie wyłącznie w postaci filtru lub ogranicznika.

Mimo środków zapobiegawczych stosowanych na wejściu napięcia sieciowego do urządzenia, ograniczone i odfiltrowane impulsy zakłócające — choć już nie tak groźne — przedostają się do zasilacza urządzenia. Zasilacz, traktowany jako *czarna skrzynka*, zapewnia różne tłumienie impulsów zakłócających w zależności od konstrukcji, jednakże dane na ten temat nie zawsze podawane są w katalogach

producentów. Jeżeli zasilacz ma być konstruowany specjalnie do projektowanego urządzenia, to środki ochrony przed zakłóceniami należy stosować jak najbliżej wejścia napięcia sieciowego. W wypadku zasilaczy zawierających transformator tłumienie zakłóceń można znacznie poprawić, stosując prawidłowe rozwiązania konstrukcyjne transformatora.



Rys.4. Układy ograniczające z ogranicznikami Zenera i warystarami (a); ograniczanie zakłóceń przez te układy (b) -

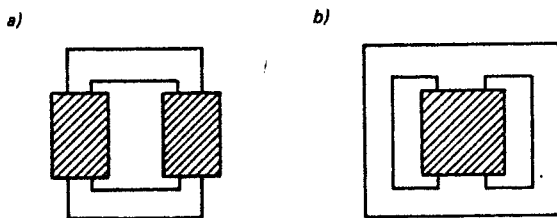


Rys.5. Sprzężenia pojemnościowe pomiędzy pierwotnym i wtórnym uzwojeniem transformatora

Na rysunku 5 przedstawiono sposób przenikania impulsów zakłócających przez pojemności pasożytnicze transformatorów o różnej konstrukcji. Rysunek 5a przedstawia transformator bez żadnych środków zabezpieczających przed przenikaniem zakłóceń; impulsy zakłócające przenoszą się przez pojemności pasożytnicze C_1 do uzwojenia wtórnego. W transformatorze z rys. 5b środek uzwojenia wtórnego jest połączony z masą urządzenia; impulsy zakłócające są częściowo zwierane do masy przez pojemności pasożytnicze C_2 . Tłumienie zakłóceń przez taki transformator jest lepsze, gdy jest on symetryczny elektrycznie i geometrycznie, tj. gdy obie połowy uzwojenia wtórnego są jednakowe (nawijane bifilarnie).

Na rysunku 5c przedstawiono transformator z ekranem, zapewniający najlepsze tłumienie zakłóceń, gdyż pojemność C_2 pomiędzy uzwojeniem pierwotnym, a ekranem powoduje zwieranie impulsów zakłócających do masy. Impulsy, które przedostaną się do uzwojenia wtórnego są także zwierane do masy przez pojemności C_3 pomiędzy uzwojeniem wtórnym a ekranem. Oczywiście, aby ekran działał skutecznie masa urządzenia powinna być połączona z przewodem zera ochronnego sieci.

Warto także zwrócić uwagę, że transformatory o uzwojeniu pierwotnym i wtórnym w postaci oddzielnych cewek (rys. 6a) mają znacznie mniejsze pojemności międzyuzwojeniowe niż transformatory o wspólnej cewce (rys. 6b), jednakże ze względu na większe wymiary są rzadziej stosowane. Najlepsze rezultaty uzyskuje się w transformatorach o specjalnej konstrukcji, stosując wielokrotne ekrany elektrostatyczne (pojemności rzędu femtofaradów).



Rys. 6. Dwa typy transformatorów: oddzielna cewka uzwojenia pierwotnego i wtórnego (a), wspólna cewka (b)

W zasilaczach impulsowych, coraz częściej stosowanych ze względu na wysoką sprawność i małe gabaryty, problemem jest zabezpieczenie zasilacza przed emitowaniem zakłóceń do sieci i do obciążenia. Zasilacz impulsowy o prawidłowych rozwiązaniach zapewniających tłumienie zakłóceń emitowanych odznacza się również istotnymi właściwościami tłumienia zakłóceń przychodzących od strony sieci, gdyż filtry wejściowe i wyjściowe pełnią podwójną rolę, tłumiąc zarówno zakłócenia emitowane, jak też przychodzące od strony sieci.

Zastosowane rozwiązania układowe i typy układów mogą odznaczać się różną podatnością na wpływ zakłóceń. Ponieważ najłatwiej przedostają się do urządzenia bardzo szybkie zakłócenia (o czasach narastania i opadania rzędu nanosekund), więc im wolniejsze typy układów — tym mniejsza podatność na wpływ takich zakłóceń. Na przykład układy C-MOS odznaczają się większą odpornością na szybkie zakłócenia niż obwody TTL. Ponadto linie sygnałowe wewnątrz urządzenia odznaczają się tym wyższą odpornością, im silniejsze sygnały są nimi przesyłane. Należy zatem dążyć do możliwie dużego obciążenia prądowego bramek nadawczych i odbiorczych takich linii.

W samych układach elektronicznych, w celu polepszenia filtracji zasilania, należy stosować rozłożoną sieć kondensatorów bezindukcyjnych (ceramicznych).

Ogólne zasady ochrony urządzeń przed zakłóceniami od strony sieci zasilającej przedstawiają się następująco:

1. Na wejściu sieci do urządzenia należy bezwzględnie stosować odpowiednie filtry (lub lepiej — filtry i ograniczniki amplitudy impulsów), możliwie blisko wejścia. W celu ułatwienia tego zadania produkowane są specjalne gniazda sieciowe do montażu na urządzeniu, zawierające wewnątrz odpowiedni filtr.
2. Obudowa urządzenia (masa) musi być połączona z przewodem zera ochronnego sieci. Obowiązuje tutaj zasada jednopunktowego uziemiania, tj. w urządzeniu powinien być wybrany punkt, do którego dołączony jest przewód zera ochronnego sieci, masa filtru sieciowego, masa układu elektronicznego, masy zespołów wchodzących w skład urządzenia, ekrany. Połączenia z tym punktem powinny być dokonywane przy użyciu przewodów o małej impedancji, najlepiej linek lub taśm.
3. Przewody sieciowe wewnątrz urządzenia powinny być jak najkrótsze, prowadzić je należy z dala od linii sygnałowych, a najlepiej — ekranować, łącząc ekran do masy urządzenia.
4. Linie sygnałowe wewnątrz urządzenia powinny być jak najkrótsze i silnie obciążone prądem.
5. Układy powinny być odsprężone od strony zasilania za pomocą sieci kondensatorów bezindukcyjnych.

5.2. Zakłócenia od strony linii transmisyjnych

Zakłócenia te pochodzą od pola elektromagnetycznego, wyładowań elektrostatycznych i niejednakowych napięć. odniesienia urządzeń połączonych linia.

Najlepszym rozwiązaniem jest stosowanie linii światłowodowych (fiber optic), które praktycznie eliminują wszystkie możliwe przyczyny zakłóceń w linii. Jednakże jeszcze obecnie ceny takich linii są dość wysokie, co nie pozwala na ich powszechne stosowanie.

Konwencjonalne linie transmisyjne mogą być budowane z:

- kabli ekranowanych, zawierających przewody zwykłe lub pary skręcane. Takie linie nadają się do wolnej transmisji szeregowej ze względu na niskie pasmo przepustowe (do kilkudziesięciu kiloherców). Stosowane zwykle są do transmisji w standardzie RS-232-C (do kilkudziesięciu metrów) lub pętli prądowej 0 — 20 mA (do ok. 1,5 kilometra),
- kabli koncentrycznych, stosowanych do szybkiej transmisji szeregowej (pasmo do kilku MHz) na odległość do kilkudziesięciu metrów. Ekran kabla i dopasowanie falowe po stronie nadajnika i odbiornika stanowią dość skuteczne zabezpieczenie przed zakłóceniami,
- kabli płaskich (również często budowanych z par skręconych) używanych zwykle do bezpośredniego przyłączenia różnego typu terminali do systemów mikrokomputerowych. Z uwagi na bardzo małą odporność na zakłócenia, kable takie są stosowane w bardzo krótkich połączeniach (rzędu 1 m).

Wybór typu linii transmisyjnej zależy od wymagań odnośnie szybkości i odległości transmisji. Konstruując interfejs po stronie nadajnika i odbiornika należy kierować się następującymi zasadami:

1. Należy stosować filtry po stronie odbiornika, ograniczające pasmo odbieranych częstotliwości w zakresie powyżej częstotliwości transmisji.
2. Odporność na zakłócenia jest tym wyższa, im silniejszy jest sygnał przesyłany linią transmisyjną. Oznacza to, że należy dążyć do przesyłania sygnałów o możliwie dużym napięciu, a obciążenie prądowe linii po stronie odbiornika również powinno być duże. Przesyłanie silnych sygnałów zapewnia wyższy stosunek sygnału do zakłóceń.
3. Przy wszystkich rodzajach linii transmisyjnych powinna być przestrzegana zasada dopasowania falowego, tzn. impedancja odbiornika widziana od strony linii powinna być równa jej impedancji falowej. Dopasowanie falowe jest realizowane przez dobór odpowiedniego dzielnika rezystorowego (pull-up, pull-down). W linii dopasowanej praktycznie nie występują odbicia, co zapewnia mniejszą wrażliwość na zakłócenia.

4. Przy łączeniu linią urządzeń oddalonych (zasilanych z oddalonych gniazd sieciowych) mogą występować różnice napięć odniesienia, dochodzące do kilkudziesięciu woltów. W takich przypadkach należy bezwzględnie stosować izolację galwaniczną.
5. W każdym wypadku pożądane jest prowadzenie linii z dala od źródeł silnych zakłóceń elektromagnetycznych i przewodów sieciowych (separacja odległościowa).

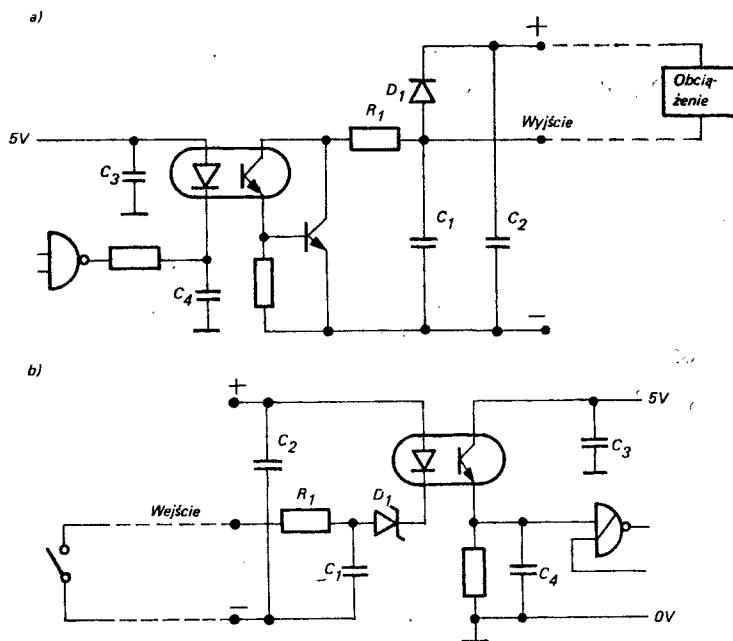
5.3. Zakłócenia od strony wejść i wyjść (połączeń obiektowych)

W przeciwieństwie do linii transmisyjnych – rodzaj elementów sterowanych z wyjść i dołączanych do wejść urządzenia, a także rodzaj kabli i długość połączeń zależą od konkretnego zastosowania urządzenia i zwykle nie mogą być z góry przez konstruktora określone. Dlatego też jedyną możliwością zabezpieczenia się przed zakłóceniami dochodzącymi do urządzenia od strony wejść i wyjść obiektowych jest konstruowanie takich interfejsów wejść i wyjść, które nie pozwalają na przeniknięcie zakłóceń do układów cyfrowych urządzenia.

W interfejsach wejść/wyjść mogą być stosowane następujące środki:

- podniesienie poziomu napięcia sygnału wejściowego i wyjściowego
- izolacja galwaniczna układu cyfrowego od stopni wejściowych i wyjściowych
- filtry w stopniach wejściowych i wyjściowych.

Przykłady poprawnie skonstruowanych, z punktu widzenia odporności na zakłócenia, stopni wejściowych i wyjściowych przedstawia rys.7. W obu wypadkach zastosowano proste filtry w postaci kondensatorów bezindukcyjnych, zwierających zakłócenia do linii zasilania, oraz izolację galwaniczną w postaci transoptorów.



Rys.7. Przykłady obwodów interfejsu: interfejs wyjściowy (a), wejściowy (b)

W stopniu wyjściowym (rys. 7a) głównym elementem filtrującym jest kondensator C_1 , zwierający linię sygnału wyjściowego z szyną (-) zasilania stopnia wyjściowego. Rezystor R_1 o niewielkiej wartości zabezpiecza tranzystor końcowy przed nadmiernym prądem w momencie włączania stopnia, a dioda D_1 zapewnia rozładowanie energii indukcyjnej linii i obciążenia w trakcie wyłączenia stopnia. Kondensator C_2 blokuje drogę zakłóceń do zasilacza stopnia wyjściowego. Ponieważ transoptor, ze względu na pojemność wejście/wyjście rzędu pikofaradów, przenosi szybkie impulsy, więc zastosowano kondensatory C_3, C_4 , filtrujące zakłócenia po stronie układu cyfrowego.

W stopniu wejściowym (rys. 7b) filtr wejściowy składa się z elementów R_1, C_1 . Kondensator C_2 blokuje drogę zakłóceń do zasilacza stopnia wejściowego, zaś po stronie układu cyfrowego zakłócenia są filtrowane przez kondensatory C_3, C_4 . Dioda Zenera D_1 pełni rolę elementu przesuwającego poziom przełączania stopnia (threshold level). W celu uzyskania symetrycznego marginesu zakłóceń w stosunku do napięć (+) i (-), napięcie Zenera D_1 powinno wynosić nieco mniej niż połowę napięcia zasilania stopnia (np. 10 – 11V w wypadku napięcia zasilania 24V). Z uwagi na ograniczenie stromości narastania/opadania sygnału przez elementy filtrujące, po stronie cyfrowej zastosowano bramkę Schmitta jako detektor poziomu.

Elementy zewnętrzne sterowane przez urządzenie powinny być zabezpieczone przed generowaniem zakłóceń do linii sterujących. Należy tu stosować następujące środki:

1. Elementy indukcyjne sterowane prądem stałym (przełączniki, silniki, styczniki, zawory elektromagnetyczne itp), powinny być zbocznikowane diodą pozwalającą na rozładowanie energii indukcyjnej w momencie wyłączenia elementu. Należy stosować diody szybkie, o prądzie równym co najmniej prądowi pobieranemu przez element i napięciu co najmniej dwukrotnie wyższym od napięcia pracy elementu. Dioda powinna być umieszczona możliwie blisko elementu magazynującego energię.
2. Elementy indukcyjne sterowane prądem zmiennym ze stopni wyjściowych zmiennoprądowych, powinny być zbocznikowane szeregowym układem RC (typowe wartości – $R \approx 100\Omega$, C od 0,1 do 1 μF). Lepszym zabezpieczeniem są ograniczniki napięcia lub warystory, identyczne jak stosowane w filtrowaniu napięcia sieciowego.
3. Przewody łączone z wejściami i wyjściami powinny być prowadzone z dala od przewodów sieciowych i źródeł silnych zakłóceń. Grupy przewodów łączonych z wejściami i wyjściami powinny być prowadzone oddzielnymi kablami, najlepiej ekranowanymi. Ekran należy łączyć z masą urządzenia zgodnie z zasadą jednopunktowego uziemiania.

3.4. Programowe i czasowe zabezpieczenia przed zakłóceniami zewnętrznymi

Niezależnie od ochrony sprzętowej opisanej wyżej, możliwe jest zabezpieczanie czasowe i programowe przed zakłóceniami wchodzącymi do urządzenia poprzez linie transmisyjne i obiektowe.

Zabezpieczenie czasowe polega na wpisywaniu do rejestrów systemu informacji wejściowej nie w sposób ciągły, ale podczas trwania krótkich impulsów zegarowych. W wypadku zapisu ciągłego (np. przy zastosowaniu przerzutników statycznych R-S) zakłócenie zmienia stan rejestru, co przy późniejszym wykorzystaniu danych zawartych w rejestrze daje błędne wyniki obliczeń lub błędne sygnały sterujące. Natomiast w trakcie zapisu informacji pod wpływem krótkich impulsów zegarowych możliwość zapisania fałszywej informacji istnieje tylko wtedy, gdy zakłócenie pojawi się jednocześnie z impulsem zegarowym.

W celu zmniejszenia prawdopodobieństwa błędnego zapisu, impulsy zegarowe powinny być jak najkrótsze i występować jak najrzadziej. Zależnie od konkretnych potrzeb, zapis może odbywać się asynchronicznie (każdorazowo, kiedy zachodzi potrzeba wpisania informacji) lub synchronicznie, z określoną częstotliwością zegarową. Pierwszy sposób jest szeroko stosowany w systemach mikroprocesorowych, gdzie wpisanie informacji do rejestrów mikroprocesora następuje pod wpływem rozkazu READ

wydawanego przez mikroprocesor zgodnie z programem. Drugi sposób może być stosowany w prostych urządzeniach nie zawierających mikroprocesora.

Zabezpieczenia programowe polegają na kilkakrotnym odczycaniu przez system stanu wejść i sprawdzeniu, czy odczytany stan jest za każdym razem ten sam. Potwierdzenie np. trzykrotne występowania tego samego stanu wejścia stanowi dla systemu dowód, że stan wejścia nie został zmieniony przez zakłócenie. Czas trwania serii odczytów powinien być dłuższy od spodziewanego czasu trwania zakłócenia i krótszy od czasu trwania sygnału użytecznego.

Inną odmianą zabezpieczeń programowych, stosowanych przy transmisji danych, są zabezpieczenia w postaci algorytmów detekcji i korekcji błędów. Metody te są opisane w specjalistycznych opracowaniach.

4. Poziomy zakłócenia i metody sprawdzania odporności urządzeń na zakłócenia

Jak dotąd, nie ustanowiono norm lub zaleceń międzynarodowych, standaryzujących odporność urządzeń elektronicznych na zakłócenia elektromagnetyczne. W nielicznych publikacjach na temat poziomów zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych podawane są znacznie różniące się dane. Wynika to m.in. z niedoskonałej jeszcze aparatury do rejestracji bardzo szybkich impulsów. Pewne dane na temat pożądanej odporności urządzeń na zakłócenia podają producenci generatorów zakłóceń i elementów ochrony przed zakłóceniami. Na przykład szwajcarska firma Schaffner podaje, że pasmo zakłóceń w sieci elektroenergetycznej, spowodowanych pracą różnych urządzeń dołączonych do sieci, może rozciągać się powyżej 100 MHz. Firma podaje także następującą klasyfikację poziomów (amplitud) impulsów zakłócających:

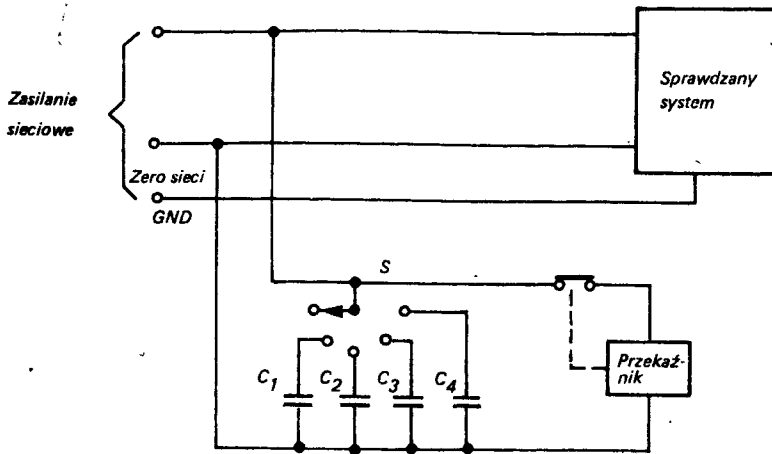
- niski — amplituda około 500V; zakłócenia występujące w sposób ciągły w normalnej sieci (np. w mieszkaniu, w biurze),
- średni — amplituda około 1000V; zakłócenia występujące w sieci w pobliżu wyłączników odbiorników energetycznych, szczególnie większej mocy,
- wysoki — amplituda około 1500V; zakłócenia występujące sporadycznie w warunkach przemysłowych.

Miarodajne wyniki badań odporności urządzeń na zakłócenia można uzyskać tylko stosując specjalizowane symulatory zakłóceń, generujące impulsy o określonym kształcie, amplitudzie i fazie w odniesieniu do napięcia sieciowego. Jednakże aparatura taka jest droga i z tego względu nie zawsze może być dostępna.

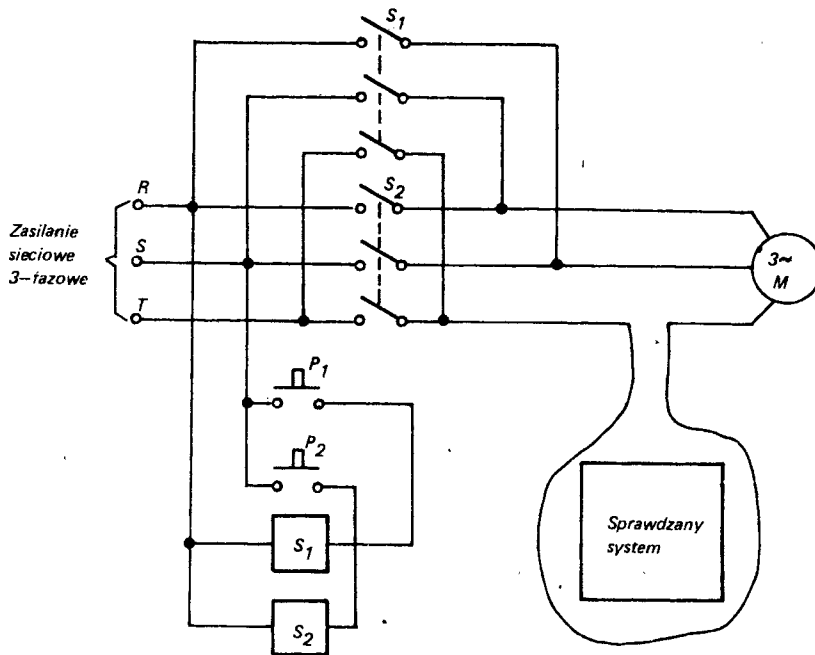
Odporność urządzenia na zakłócenia można orientacyjnie sprawdzić używając prostych generatorów zakłóceń, zbudowanych ze zwykłych odbiorników energii. Generatory takie mogą być przydatne do zlokalizowania obwodów urządzenia najbardziej podatnych na zakłócenia; nie można jednak posługiwać się nimi jako źródłami zakłóceń wzorcowych i wnioskować o poziomie odporności urządzenia na zakłócenia.

Przykład prostego generatora zakłóceń sieciowych przedstawia rys. 8. W układzie zastosowano przełącznik (lub stycznik) połączony w ten sposób, że cewka jest na przemian włączana i wyłączana. W celu regulacji poziomu zakłóceń zastosowano zespół kondensatorów o różnej pojemności, przełączanych przełącznikiem S. W zależności od pojemności włączonego kondensatora, zmienia się poziom generowanych zakłóceń.

Generator silnych pól zakłócających może być zbudowany z silnika trójfazowego (rys. 9). Moc silnika nie przekracza 1 kW, a układ sterowania zbudowany z dwóch styczników S_1 , S_2 i przycisków P_1 , P_2 zapewnia nawrotną pracę silnika. Przy każdym nawrocie silnika, do sieci generowane są silne impulsy zakłócające, jak również silne pole elektromagnetyczne. Używając dodatkowo przełączników czasowych można zbudować układ zapewniający samoczynne nawroty silnika w określonym odstępie czasu.



Rys. 8. Prosty generator zakłóceń sieciowych

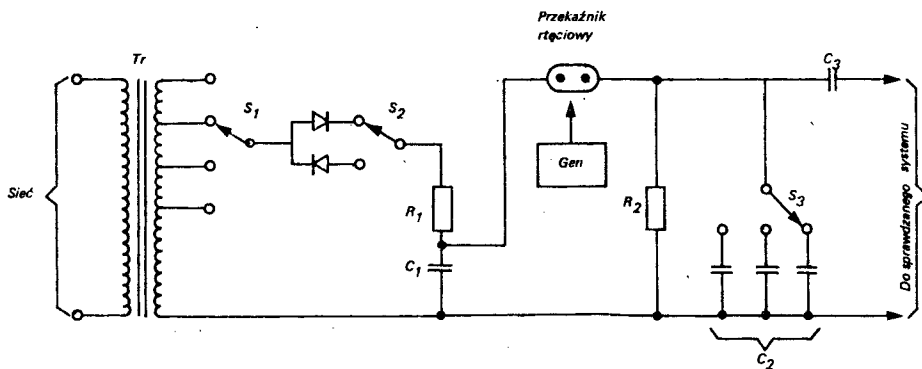


Rys. 9. Prosty generator zakłóceń w postaci pola elektromagnetycznego

Odporność urządzenia na zakłócenia od strony pola elektromagnetycznego można sprawdzać poprzez sprzężenie indukcyjne jednego z przewodów fazowych silnika z urządzeniem np. poprzez owinięcie

urządzenia kilkoma zwojami przewodu. Sprawdzając odporność od strony linii transmisyjnych lub obiektowych, sprzężenia dokonuje się poprzez równoległe prowadzenie blisko siebie pewnego odcinka przewodu fazowego silnika i linii. Poziom zakłóceń można regulować zmieniając liczbę zwojów bądź odległość między przewodem silnika, a urządzeniem lub linią.

Stosunkowo prosty, a zarazem dość miarodajny generator zakłóceń można zbudować z kondensatora rozładowywanego przez przełącznik rtęciowy, który umożliwi łącznie obwodu rozładowania bez drgań zestyków (rys. 10). Kondensator C_1 jest ładowany z sieci poprzez transformator T_r . Przełącznik S_1 umożliwia dobór napięcia na kondensatorze (amplitudy impulsów), natomiast przełącznik S_2 — wybór polaryzacji impulsów. Kondensator jest rozładowywany impulsowo do sieci zasilającej badane urządzenie, do linii wejść/wyjść lub innych punktów urządzenia. Częstotliwość wyładowań jest określona przez generator sterujący przełącznikiem. Przełącznik S_3 umożliwia wybór stromości narastania impulsów (widma zakłóceń). Zaletą tego rozwiązania jest możliwość określenia amplitudy i stromości narastania impulsów zakłócających. Można także stosować synchronizację napięciem sieciowym generatora sterującego przełącznikiem i regulację fazy impulsów zakłócających w stosunku do napięcia sieciowego. Wykorzystując generatory zakłóceń można sprawdzać i poprawiać poziom odporności urządzenia na zakłócenia.



Rys. 10. Źródło impulsów zakłócających z regulacją amplitudy, polaryzacji i widma zakłóceń

Sprawdzając poziom odporności urządzenia (które powinno w trakcie sprawdzania pracować w sposób ciągły, realizując wybrany program testowy) na zakłócenia należy:

- zwiększać poziom zakłóceń aż do wystąpienia błędów w pracy urządzenia (błędne wyniki obliczeń, błędne sterowania wyjść obiektowych, błędy transmisji),
- przeprowadzić analizę określającą, które z elementów urządzenia zostały zakłócone i jaką drogą zakłócenia przedostały się do nich,
- wprowadzić dodatkowe środki zabezpieczające na drodze zakłóceń (kondensatory odspzęgające zasilanie, filtry, ekranowanie itp),
- powtórnie sprawdzić działanie urządzenia przy tym samym co poprzednio poziomie zakłóceń; jeżeli błędy nie wystąpią, świadczy to o skuteczności zastosowanych środków; jeżeli błędy będą dalej występowały, należy przeprowadzić ich ponowną analizę i zastosować inne środki zabezpieczające aż do uzyskania pozytywnych rezultatów, .
- zwiększyć poziom zakłóceń do ponownego wystąpienia błędów w pracy urządzenia i ponownie przeprowadzić całą procedurę.

Postępując w ten sposób, można uzyskać optymalną (ograniczoną nakładami finansowymi na środki ochronne) odporność urządzenia na zakłócenia.
Autor składa podziękowania mgr inż. Cz. Godziszowi za pomoc i konsultacje przy opracowywaniu artykułu.

Literatura

- [1] Godzisz Cz. i inni: Electromagnetic Compatibility of Computer Systems and Power Line. (in Polish), II Conference „Application of Computers in Industry” Szczecin, Poland, September 1981.
- [2] Mc Dermott J.: EMI shielding and protective components. EDN, September 5, 1979.
- [3] Mc Dermott J.: Hardware and interconnect devices. EDN, December 5, 1979.
- [4] System 74. Use of TTL. Texas Instruments Issue, 1973.