

dr inż. Krzysztof Matyjasek,
ELMA energia, Olsztyn

Kompensacja mocy biernej w obecności wyższych harmonicznych. Automatycznie regulowane baterie kondensatorów SN w Hucie Miedzi Głogów

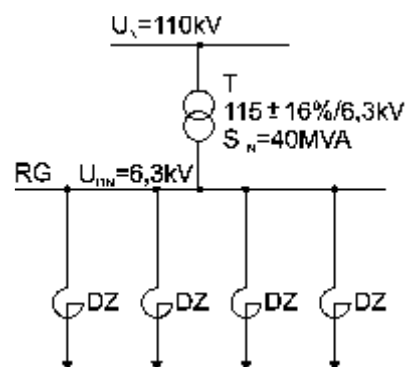
W szczególnych przypadkach przemysłowych sieci zasilająco-rozdzielczych średnich napięć 6kV, wówczas gdy:

- moce zwarciove systemu są bardzo duże,
- zastosowane transformatory obniżające napięcie do 6,3kV o napięciu zwarcia rzędu 10,12% nie gwarantują obniżenia mocy zwarciovej do poziomu umożliwiającego dobór standardowej aparatury rozdzielczej na poziomie 6kV,
- moc zwarciova na poziomie 6kV wzrasta w znaczący sposób wskutek oddziaływania bardzo dużych napędów asynchronicznych,
- wykorzystano inne sposoby ograniczania prądów zwarciowych (rozłączanie równoległych \square ródół, sekcjonowanie szyn),
- niezbędne jest zagwarantowanie maksymalnej niezawodności układu zasilającego, w tym ograniczenie prądów zwarciowych w polach liniowych i ich oddziaływana na automatykę zabezpieczeniową w polu transformatora zasilającego oraz zagwarantowania odpowiedniego napięcia na szynach zbiorczych w przypadku zwarc w obwodach pól rozdzielczych,

uzasadnione i konieczne jest stosowanie dławików zwarciowych DZ w poszczególnych polach odpywowych takiego układu rozdzielczego.

Ze względu na fakt, iż reaktancje pojemnościowe i indukcyjne (sieć, dławiki DZ, włączone w obwód zasilania baterie kondensatorów) charakteryzują się specyficznym oddziaływaniem, problem kompensacji mocy biernej w takich przypadkach znacznie się komplikuje, tym bardziej, jeżeli w sieci rozdzielczej pracują odbiorniki generujące wyższe harmoniczne prądów i napięć. W tym ostatnim przypadku parametry elementów indukcyjno - pojemnościowych mogą tworzyć obwody rezonansów szeregowych i równoległych, uniemożliwiające prawidłową pracę zainstalowanej baterii kondensatorów. W sytuacjach, gdy kompensacja mocy biernej wymaga regulacji automatycznej, prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk rezonansowych zbliża się do jedności.

Prezentowane w niniejszym opracowaniu analizy i obliczenia przeprowadzono dla konkretnego zakładu przemysłowego, którego uproszczony schemat (jedna sekcja) oraz podstawowe parametry przedstawiono na rys. 1.



Rys 1. Uproszczony schemat układu zasilająco-rozdzielczego rozpatrywanego zakładu przemysłowego.

Parametry zwarciove na poziomie 6,3kV są następujące:

- moc zwarciova z uwzględnieniem napędów asynchronicznych: $S_z=464,7\text{MVA}$
- prąd zwarciovy początkowy: $I_k''=44,7\text{kA}$
- prąd zwarciovy udarowy: $i_p = 124,6\text{kA}$

W polu transformatorowym po stronie 6,3kV zarejestrowano piątą harmoniczną prądu o wartości skutecznej $I_5=48\text{A}$ (wartość ta była praktycznie stała w trakcie wielogodzinnych pomiarów). Harmonicznych innych rzędów przyrząd pomiarowy nie zarejestrował. Z pomiarów bilansowych określono zapotrzebowanie na moc bierną pojemnościową na poziomie 4,4 - 4,5MVar przy zalecanym stopniu regulacji 0,4 - 0,5MVar.

Wymagania postawione przez zleceniodawcę były następujące:

- ze względu na parametry zwarciove i konieczność zagwarantowania dużej niezawodności zasilania, w polu liniowym zasilającym baterię kondensatorów musi być zainstalowany dławik zwarciovy o reaktancji $X_{Dz}=0,358\Omega$,
- udział procentowy poszczególnych harmoniczych w napięciu zasilającym nie przekroczy 1%.

Do analizy zjawisk rezonansowych oraz wpływu wyższych harmoniczych na parametry prądowe i napięciowe w poszczególnych punktach sieci rozdzielczej z układem kompensacyjnym, wykorzystano własne, oryginalne oprogramowanie komputerowe. Programy uwzględniają parametry rezystancyjne analizowanych obwodów.

Rozpatrzono trzy przypadki.

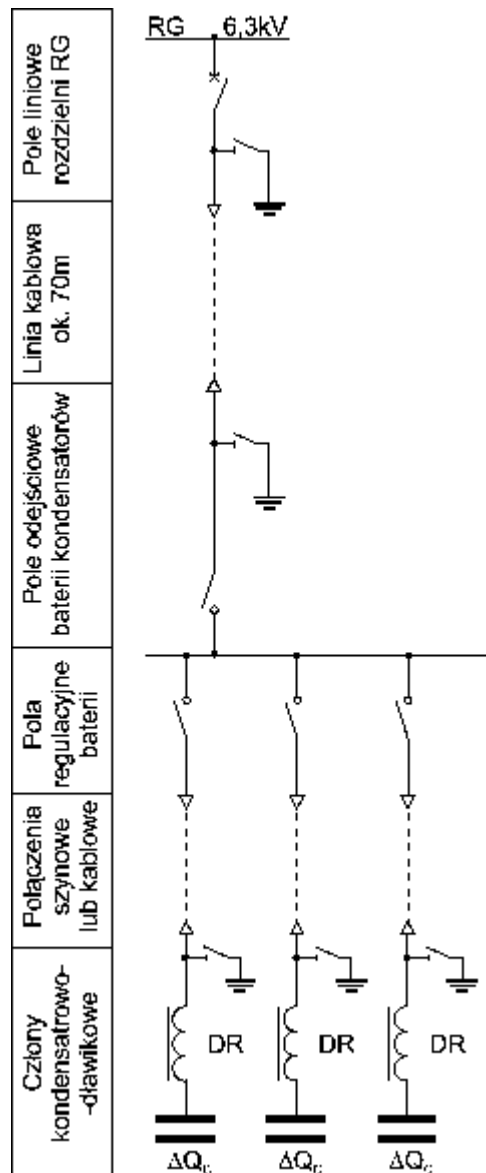
Przypadek	Pole liniowe zasilające baterię kondensatorów	Bateria kondensatorów
A	Bez dławika zwarciowego	Bez dławików rezonansowych
B	Z dławikiem zwarciowym DZ	Bez dławików rezonansowych
C	Z dławikiem zwarciowym DZ	Z dławikami rezonansowymi DR

Merytoryczno-techniczne uzasadnienie przypadku C, który przewiduje zainstalowanie zarówno dławika zwarciowego, jak i dławików rezonansowych w członach regulacyjnych baterii wymaga dodatkowych wyjaśnień.

Analizując schematy zastępcze dla obliczeń zwarciowych, można dojść do przekonania, że dławiki rezonansowe DR, ze względu na duże wartości reaktancji, mogą bardzo skutecznie pełnić funkcję dławików zwarciowych DZ i z dławika zwarciowego w polu liniowym można zrezygnować.

Problem ten nie jest tak oczywisty jeżeli uwzględni się przestrzenne rozmieszczenie poszczególnych elementów układu zasilająco-rozdzielczego oraz baterii kondensatorów. Należy pamiętać, że dławik rezonansowy DR skutecznie ogranicza prądy zwarć występujących w torach prądowych między zaciskami baterii i zaciskami dławika DR. W rozpatrywanym przypadku człony baterii kondensatorów z dławikami DR, ze względu na ograniczone gabaryty pomieszczeń rozdzielni, instalowane są na konstrukcjach stalowych oddalonych od pól regulacyjnych. Pola regulacyjne baterii uzupełnia pole odpywowe połączone linią kablową z polem liniowym rozdzielni głównej. Tym samym znaczna część instalacji związanej z zasilaniem i rozdziałem energii nie jest przygotowana do ograniczania prądów zwarciowych, a zwarcie w tej części instalacji pociąga praktycznie identyczne skutki jak zwarcie na szynach rozdzielni głównej RG.

Uproszczony schemat jednokreskowy instalacji kompensacyjnej tylko z dławikami rezonansowymi przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat jednokreskowy zasilania baterii kondensatorów z dławikami rezonansowymi DR w układzie bez dławika zwarciovego w polu liniowym rozdzielni głównej RG.

Z uwagi na wymagania w zakresie pewności zasilania, życzenie zleceniodawcy było w pełni uzasadnione.

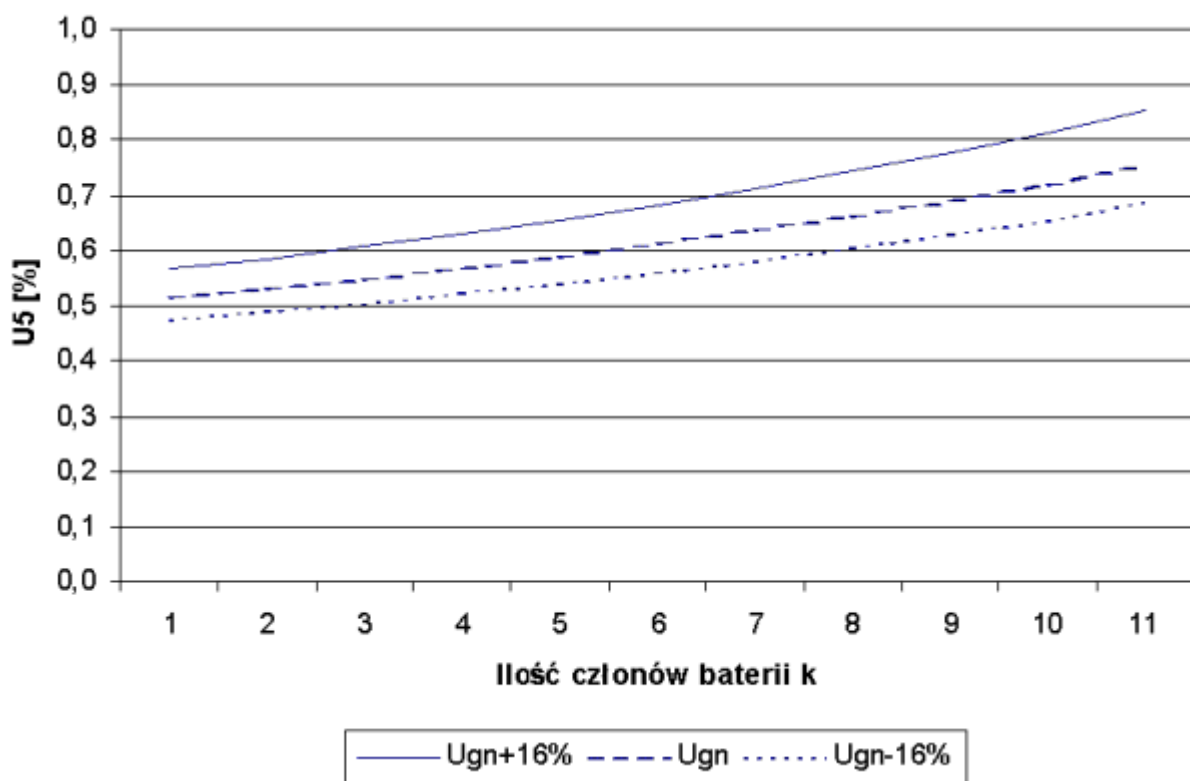
PRZYPADK A.

Ze względu na założenia wstępne, jest to przypadek czysto teoretyczny, jednak warty rozpatrzenia ze względu na wskazanie wpływu parametrów zwarciovych na konfigurację układu kompensacyjnego.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w rozpatrywanym układzie zasilająco-rozdzielczym możemy bez problemów włączyć baterię kondensatorów o mocy 4,4MVar/6,3kV ze stopniem regulacji 0,4MVar.

Pojemności baterii nie tworzą z indukcyjnościami układu zasilająco-rozdzielczego obwodów rezonansowych.

Na rys. 3. przedstawiono zawartość procentową 5-tej harmonicznej w napięciu zasilającym w zależności od ilości załączanych członów kondensatorowych o mocy 400kVar każdy. W analizie rozpatrzono trzy charakterystyczne położenia odczepów regulacyjnych strony napięcia górnego transformatora zasilającego (-16%, 0, +16%).



Rys. 3. Zawartość procentowa 5-tej harmonicznej w napięciu zasilającym w zależności od ilości załączonych członów baterii kondensatorów, PRZYPADEK A.

Piąta harmoniczna napięcia nie przekracza 0,85% i jest niższa od wymaganej wartości progowej 1%. Należy podkreślić fakt, że dla innej sekcji układu zasilającego rozpatrywany zakład przemysłowy (nie uwzględnionej w rozważaniach) piąta harmoniczna napięcia przekracza założoną wartość dopuszczalną.

PRZYPADEK B.

W tym przypadku baterię z wariantu A ($11 \times 0,4 \text{MVar} = 4,4 \text{MVar}/6,3 \text{kV}$) zasilono z pola liniowego wyposażonego w dławik zwarciovowy o reaktancji $X_{DR} = 0,358 \Omega$.

Bateria kondensatorów wraz z szeregowo włączonym dławikiem zwarciovym tworzy układ rezonansowy o rzędzie częstotliwości własnej określonej zależnością:

$$n_{rk} = \sqrt{\frac{X_C}{k \times X_{DZ}}}$$

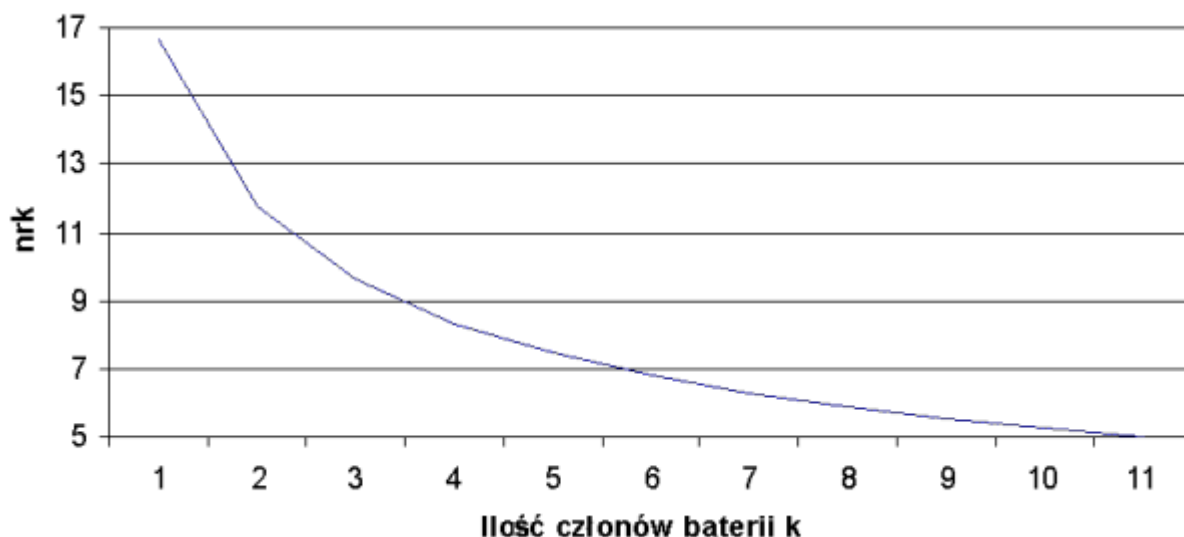
gdzie:

X_C - reaktancja jednego członu baterii

X_{DZ} - reaktancja dławika zwarciovego

k - ilość załączonych członów

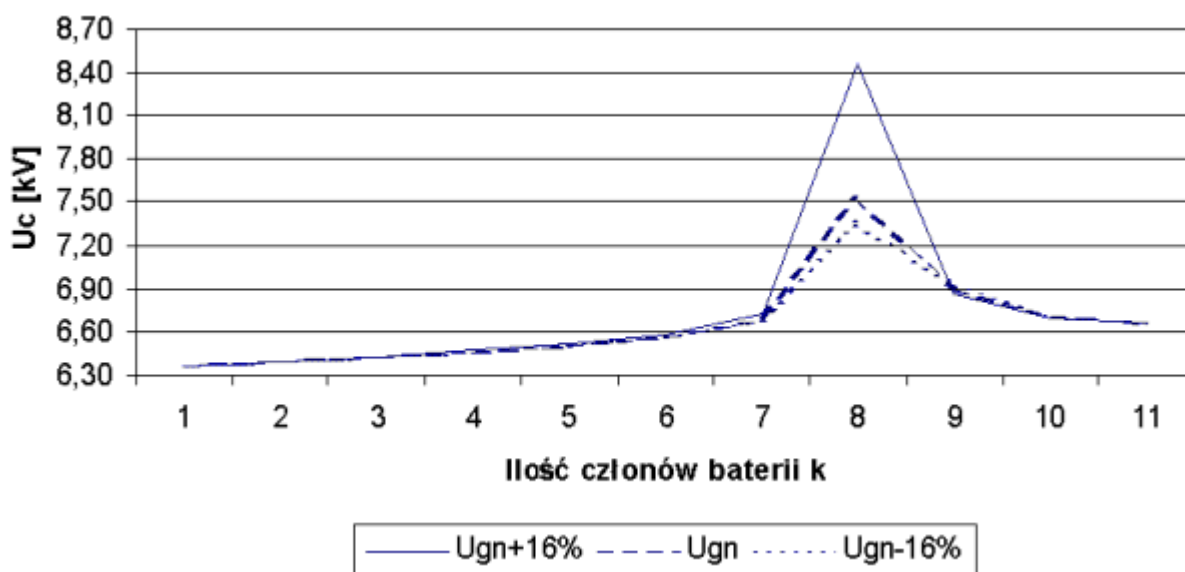
Wartość rzędu częstotliwości rezonansowej własnej układu kompensacyjnego zasilanego przez dławik zwarciovowy zależy od ilości załączonych członów k baterii. Powyższą zależność przedstawiono na rys. 4.



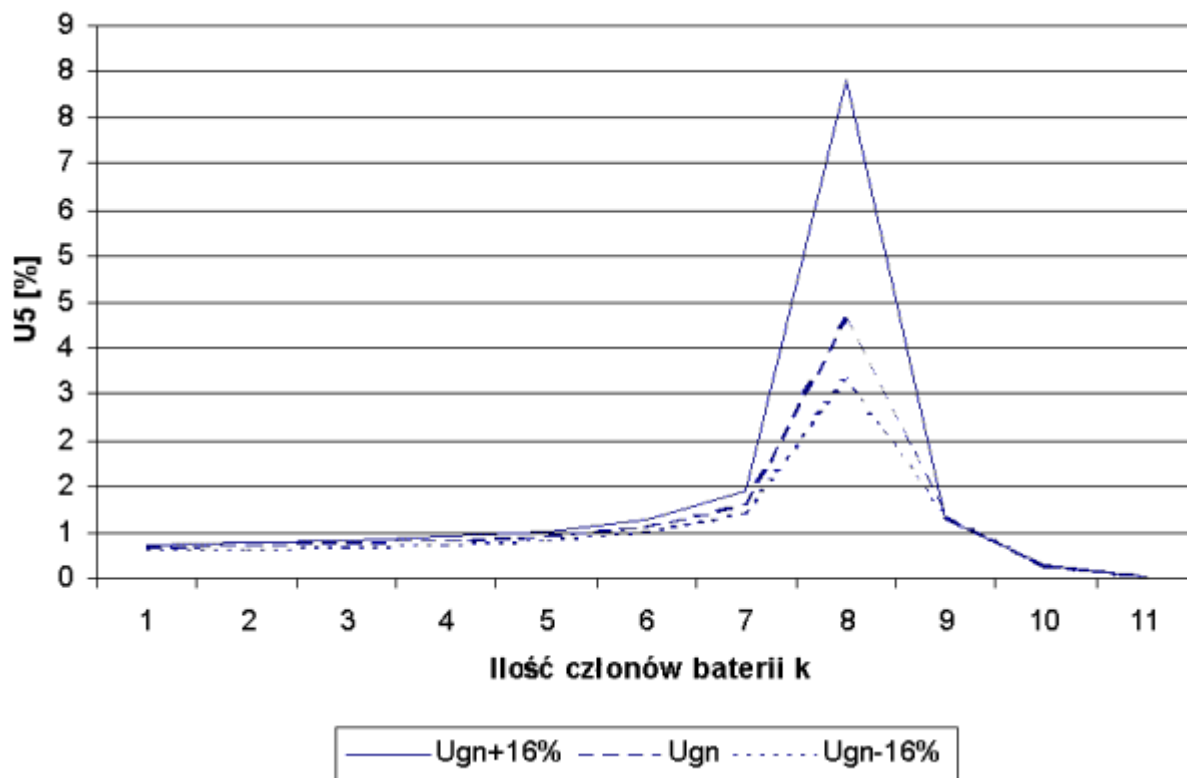
Rys. 4. Zależność rzędu częstotliwości rezonansowej własnej n_{rk} obwodu bateria kondensatorów - dławik zwarciowy w zależności od ilości załączonych członów k .

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla mocy baterii ok. 3300kVar występują zjawiska rezonansowe powodujące niedopuszczalny wzrost napięcia na kondensatorach oraz wystąpienie w napięciu zasilającym 5-tej harmonicznej na poziomie do 7,83%.

Zależność napięcia na zaciskach kondensatorów w funkcji załączonej ilości członów kondensatorowych przedstawiono na rys. 5, a procentową zawartość 5-tej harmonicznej napięcia na rys. 6.



Rys. 5. Zależność napięcia U_c na szynach baterii kondensatorów w funkcji ilości załączonych członów k .



Rys. 6. Zależność procentowej zawartości 5-tej harmonicznej w napięciu zasilającym od ilości załączonych członów kondensatorowych.

Wzrost napięcia na zaciskach kondensatorów ponad wartość dopuszczalną (w/g IEC60871 $\max U_C = 1,1 U_C$ 12h dziennie) oraz wysoki poziom 5-tej harmonicznej w napięciu zasilającym dyskwalifikują rozwiązanie, określone jako przypadek B.

PRZYPADEK C.

W tym wariantie przewidziano zarówno dławik zwarciový DZ w polu liniowym zasilającym baterię, jak również dławiki rezonansowe DR w poszczególnych członach regulacyjnych.

Rozwiązanie takie, jak można przypuszczać, już w założeniach spełnia wymagania założeń wstępnych, zarówno z punktu widzenia warunków zwarciových, jak również z punktu widzenia zakładanego poziomu wyższych harmonicznych napięć. Jednocześnie przypadek ten stanowi bardzo interesujące rozwiązanie techniczne, wymagając szczególnych zasad doboru urządzeń kompensacyjnych.

Warto podkreślić takie fakty, jak:

- indukcyjność dławików rezonansowych DR musi uwzględniać szeregowo włączoną indukcyjność dławika zwarciového DZ,
- układ rezonansowy tworzy dławik zwarciový DZ oraz k dławików rezonansowych DR, a więc rząd częstotliwości rezonansowej własnej układu kompensacyjnego zależy od ilości załączonych członów,
- z ilością załączonych członów zmienia się moc rzeczywista bierna pojemnościowa pojedynczego członu,
- włączenie dużych indukcyjności szeregowo z baterią kondensatorów oraz obecność piątej harmonicznej prądu wymaga zastosowania kondensatorów o napięciu znamionowym wyższym od napięcia znamionowego sieci,
- rzeczywista moc bierna pojemnościowa członów baterii DQ_{Cr} kondensatorów jest niższa od mocy znamionowej DQ_{CN} .

Szczególnie starannie należy przeprowadzić analizy mające na celu określenie mocy członu baterii DQ_{Cr} (stopnia regulacji) oraz rzędu częstotliwości rezonansowej własnej n_{r1} pojedynczego członu (obwodu złożonego z pojemności członu baterii oraz sumarycznej indukcyjności dławików rezonansowego i zwarciovego).

Z jednej strony wartość parametru n_{r1} winna mieć jak najwyższą wartość, zbliżoną do rzędu najniższej harmonicznej występującej w sieci, gdyż w miarę wzrostu ilości k załączonych członów wypadkowa wartość rzędu częstotliwości rezonansowej własnej n_{rk} maleje, czemu towarzyszy wzrost napięcia na zaciskach kondensatorów.

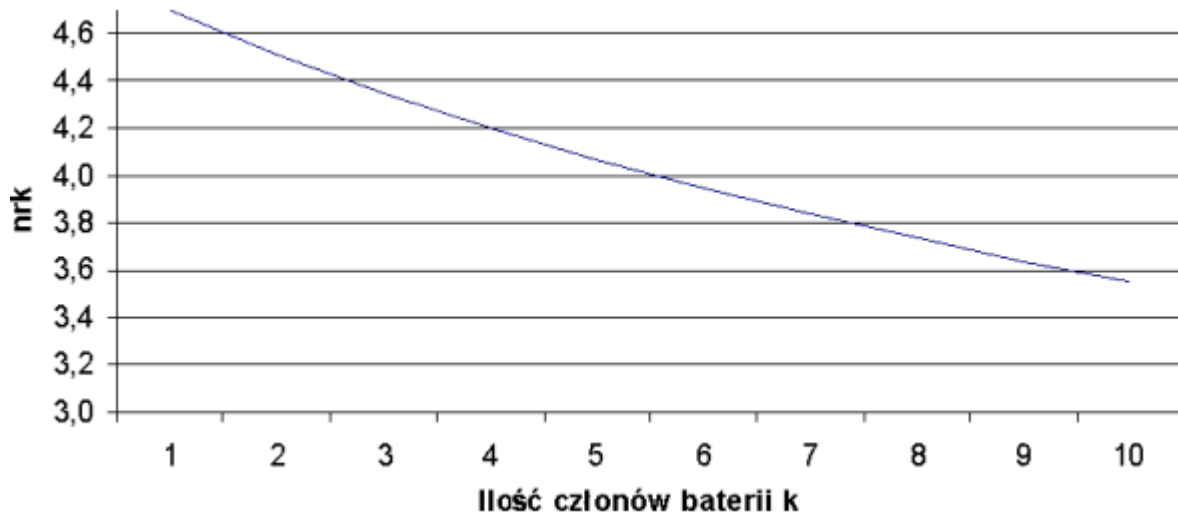
Z drugiej strony należy uwzględnić:

- ujemne tolerancje pojemności i indukcyjności,
- obciążalność prądową kondensatorów tak, by przy załączonym pojedynczym członie nie została przekroczona wartość 130% prądu znamionowego baterii.

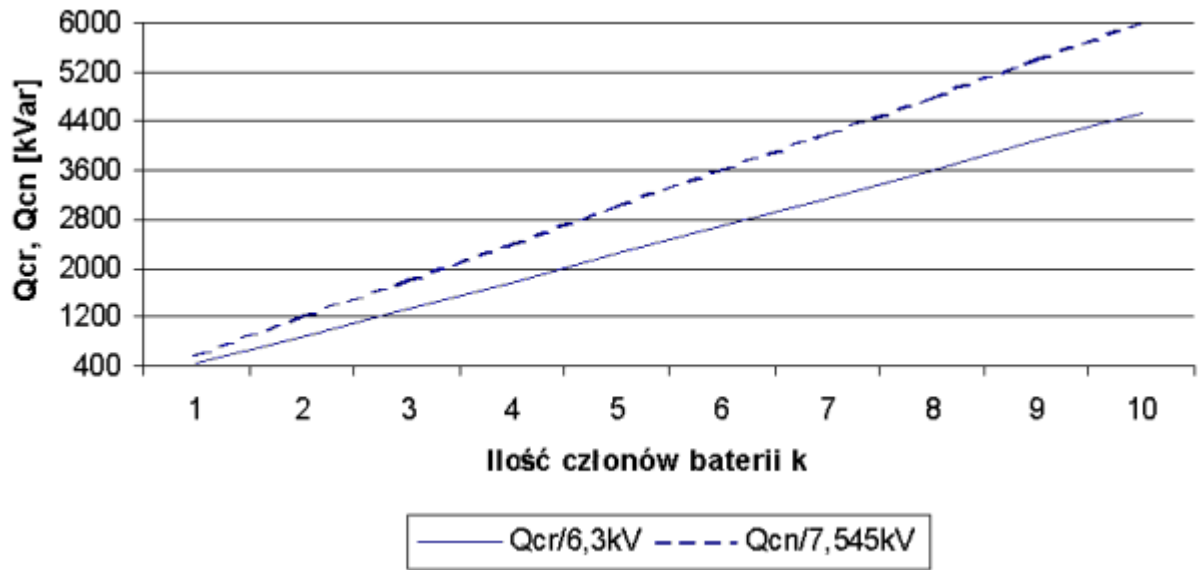
Na rysunkach od 7 do 12 przedstawiono zależności wybranych parametrów układu kompensacyjnego oraz jego wpływ na parametry sieci w funkcji ilości załączonych członów baterii k .

Podstawowe dane baterii kondensatorów:

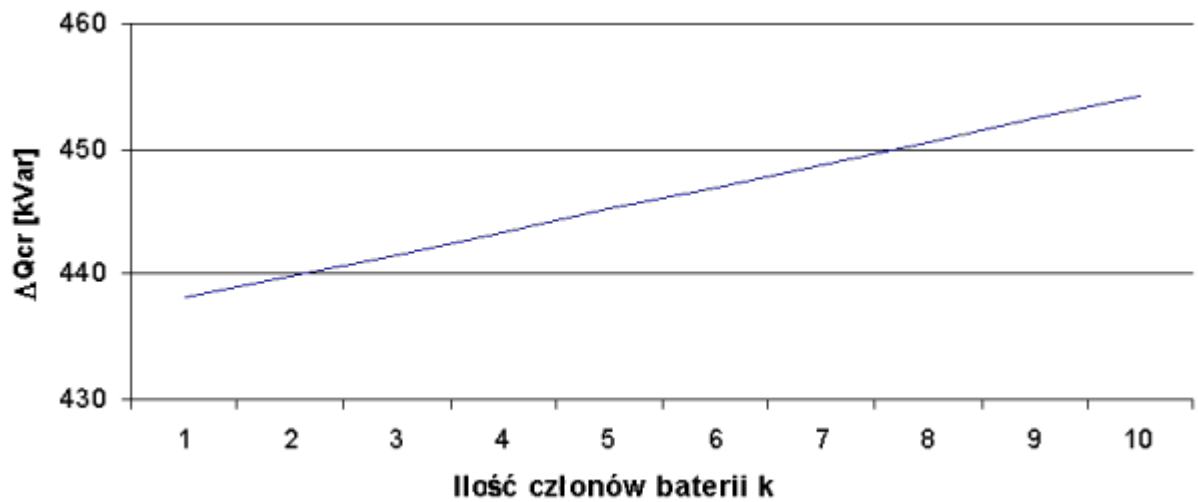
Napięcie znamionowe:	$U_N = 6,3kV$
Moc znamionowa rzeczywista:	$Q_{Cr} = 4,5MVar$
Moc zainstalowanych kondensatorów:	$Q_{CN} = 6,0MVar$
Napięcie znamionowe baterii kondensatorów:	$U_{CN} = 7,545kV$
Stopień regulacji:	$DQ_{Cr} = 450kVar$
Ilość stopni regulacji:	$k = 10$
Dławik zwarciovym w polu liniowym:	$X_{DZ} = 0,358W$
Rząd częstotliwości rezonansowej własnej jednego członu:	$n_{r1} = 4,7$
Reaktancja dławików rezonansowych poszczególnych członów:	$X_{DR} = 3,937W$



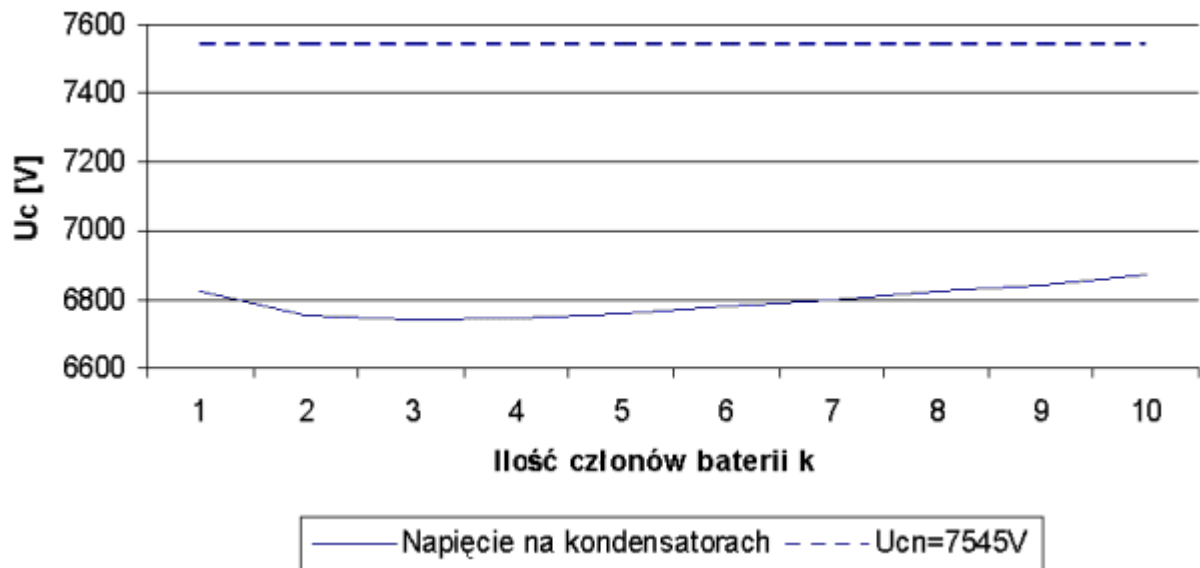
Rys. 7. Zależność rzędu częstotliwości rezonansowej własnej n_{rk} układu kompensacyjnego od ilości załączonych członów k .



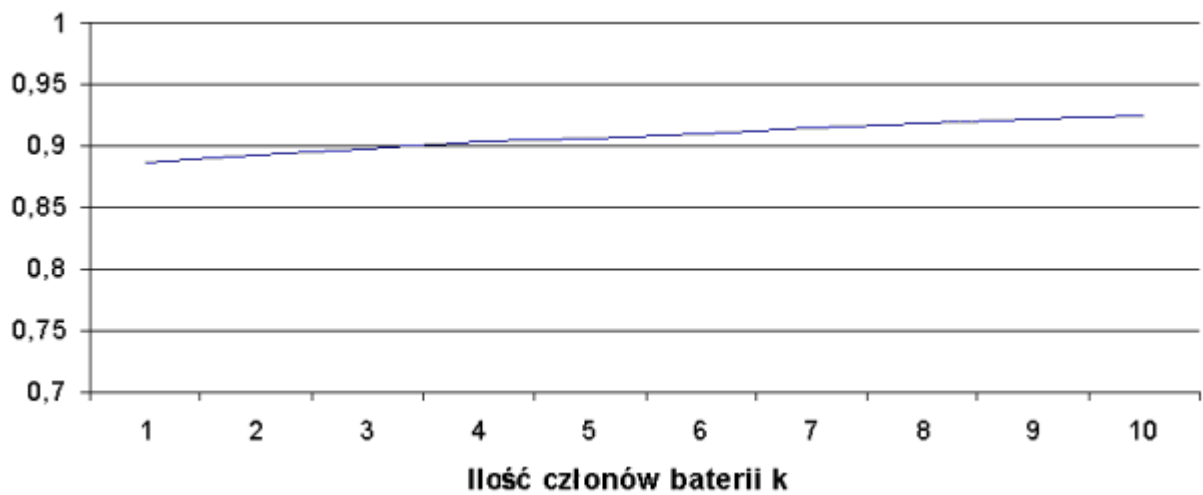
Rys. 8. Moce zainstalowane Q_{CN} i rzeczywiste Q_{Cr} w funkcji ilości k załączonych członów baterii



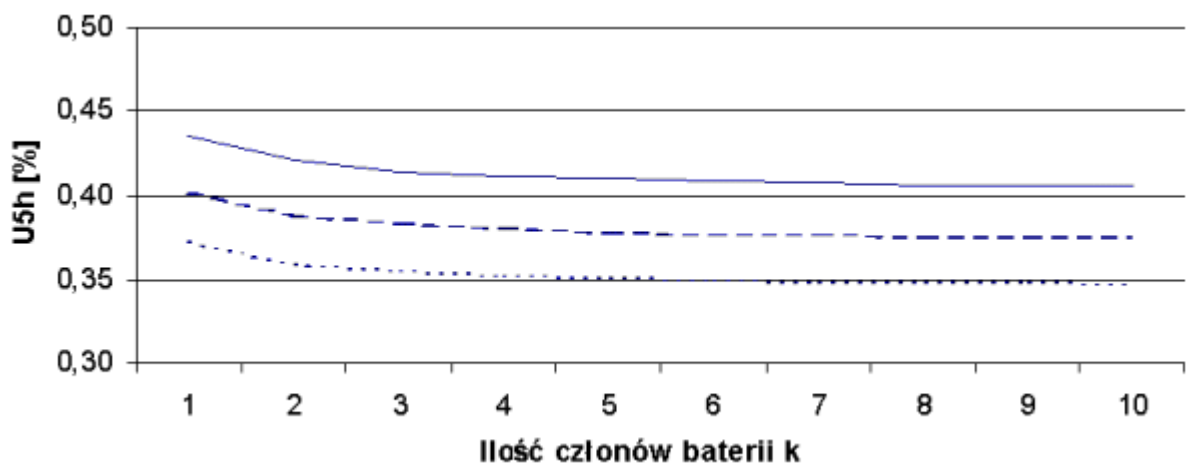
Rys. 9. Rzeczywista moc ΔQ_{Cr} członu baterii w zależności od ilości k załączonych członów



Rys. 10. Zależność napięcia U_C na zaciskach baterii kondensatorów w funkcji k załączonych członów



Rys. 11. Stosunek prądu obciążenia (z uwzględnieniem wyższych harmonicznych) do prądu znamionowego członu baterii w funkcji ilości załączonych członów k



Rys. 12. Procentowa zawartość 5-tej harmonicznej w napięciu zasilającym w funkcji ilości k załączonych członów układu kompensacyjnego

PODSUMOWANIE

W przypadkach uzasadnionych parametrami zwarciovymi układu zasilająco-rozdzielczego, może zaistnieć konieczność zainstalowania dławika zwarciovego w polu liniowym zasilającym baterię kondensatorów z dławikami rezonansowymi. Zmienna, wraz z ilością załączonych stopni regulacji, indukcyjność (szeregowe połączenie indukcyjności dławika zwarciovego z kilkoma równolegle skojarzonymi indukcyjnościami dławików rezonansowych czynnych stopni regulacji) układu kompensacyjnego wpływa istotnie na parametry eksploatacyjne baterii regulowanej automatycznie.

Dobór baterii kondensatorów oraz urządzeń z nią związanych musi w tym przypadku poprzedzać odpowiednia analiza parametrów układu kompensacyjnego.