

Florian KRASUCKI
Zbigniew KOWALSKI

WPŁYW NIEJEDNOCZESNOŚCI OTWIERANIA ŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH
I PARAMETRÓW NISKONAPIĘCIOWEJ SIECI KOPALNIANEJ
O IZOLOWANYM PUNKCIE ZEROWYM NA PRZEPIĘCIA ŁĄCZENIOWE

Streszczenie. W pracy omówiono wpływ wybranych parametrów sieci oraz parametrów i stanów łączeniowych styczników próżniowych na generowane przebiegi przy wyłączaniu prądów indukcyjnych. Analizowano schematy zastępcze sieci w kolejnych stanach wyłączenia prądów w torze trójfazowym wyprowadzając związki zachodzące między parametrami sieci i prądami ucięcia, wynikające z zależności energetycznych, charakteryzujące maksymalne wartości przebiegów łączeniowych i pulsacji. Zwrócono uwagę na dużą częstość generowanych przebiegów przy wyłączaniu, zwłaszcza małych odbiorników indukcyjnych oraz możliwość naturalnego ich tłumienia przewodami łączeniowymi lub zabezpieczeniami warystorowymi. Określono zalecane minimalne wartości mocy znamionowej silników klatkowych, których stosowanie nie powoduje nadmiernych przebiegów łączeniowych w kopalnianych sieciach 500 i 1000 V. Wykazano możliwość ograniczania przebiegów w wyniku zastosowania proponowanych zabezpieczeń przebiegowych.

1. WSTĘP

Łączniki próżniowe charakteryzują się większą skłonnością do powodowania przebiegów w porównaniu z dotychczas powszechnie stosowanymi w sieciach niskonapięciowych łącznikami powietrznymi magnetowdmuchowymi. Przebiegi łączeniowe w trójfazowych sieciach górniczych z łącznikami próżniowymi występują przede wszystkim przy wyłączaniu silników indukcyjnych i transformatorów "małej" mocy [5]. Wynikają one z energii zawartej w polu magnetycznym, w indukcyjnościach rozproszenia przy ucięciu prądu i jej zamiany na energię pola elektrycznego - energię pojemnościową [10]. Przebiegi te mogą osiągać wielokrotnie wyższe wartości niż wartości szczytowe napięć probierczych izolacji, zwłaszcza silników elektrycznych [5, 6]. Ogólnie zależą one od prądu ucięcia i impedancji wyłączanego obwodu [8, 9], a na wartość i częstość generowanych przebiegów istotny wpływ mają [1, 2, 6]:

- czas niejednoczesności otwierania biegunów łącznika próżniowego,
- minimalny prąd stabilnego palenia się łuku, charakterystyczny dla określonych typów łączników próżniowych,
- wartość prądu ucięcia,

- kąt fazowy wyłączenia prądu sinusoidalnego przed jego naturalnym przejściem przez zero (faza prądu w chwili jego ucięcia),
- stan (parametry) obwodu zmieniającego się w wyniku niejednoczesnego wyłączenia prądów poszczególnych faz w torze trójfazowym,
- moc znamionowa i stany pracy wyłączanego odbiornika indukcyjnego,
- parametry obwodów źródła zasilania i odbiorników widziane od strony zacisków łącznika próżniowego (w kolejnych stanach wyłączenia).

Normalizując czas niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego oraz określając minimalne moce sterowanych odbiorników indukcyjnych (silników) i parametry obwodów można wpływać na minimalizację wartości przepięć łączeniowych, ograniczenie zakresu i częstości ich występowania.

2. NIEJEDNOCZESNOŚĆ OTWIERANIA ŁĄCZNIKA PRÓŻNIOWEGO I MINIMALNE ZALECANE MOCE ZNAMIONOWE SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

W dokumentach normalizacyjnych podawane są największe czasy niejednoczesności zamykania łącznika próżniowego, natomiast niejednoczesność otwierania nie jest normalizowana.

W sieci trójfazowej o izolowanym punkcie zerowym czas niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego t_0 ma zasadniczy wpływ na czas łukowy wyłączeniowy t_2 , energię łuku i trwałość aparatu łączeniowego. Łącznik próżniowy wyłącza prąd łuku przy pierwszym przejściu przez zero, z tym że wyłączenie najczęściej wyprzedza naturalne przejście przez zero (wynikające z przebiegu sinusoidalnego) i związane jest z ucięciem prądu [10]. Z analizy przebiegów prądów w sieci trójfazowej o izolowanym punkcie zerowym z trójbiegunowym łącznikiem próżniowym (rys. 1-2), wynika istotna dla trwałości łącznika zależność czasu łukowego wyłączeniowego t_2 od czasu niejednoczesności otwierania łącznika t_0 : gdy t_0 zbliżony jest do zera, t_2 jest nie większy od $8\frac{1}{3}$ ms oraz nie mniejszy niż 5 ms (tabela 1). W takich warunkach łącznik próżniowy może osiągnąć największą trwałość łączeniową.

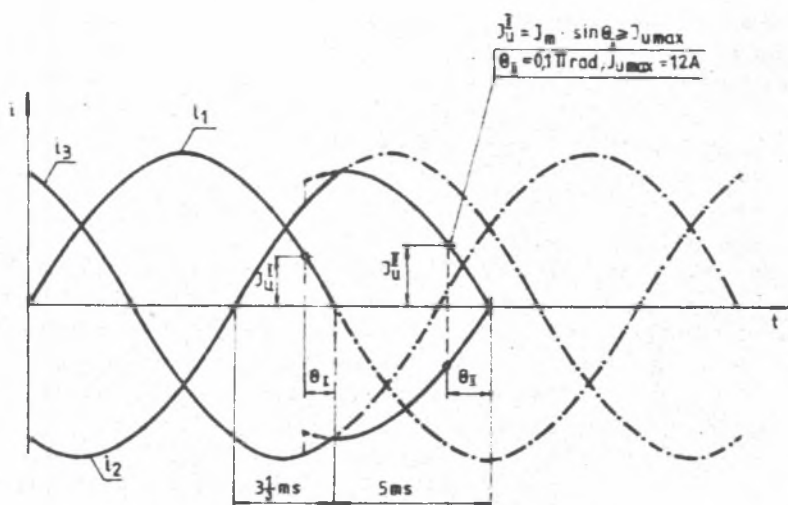
W sieci trójfazowej o izolowanym punkcie zerowym czas niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego wpływa także na wartości prądów ucięcia i generowanych przepięć. Wartość prądu ucięcia zależy od kąta fazowego wyłączenia prądu sinusoidalnego przed jego naturalnym przejściem przez zero (rys. 1).

Stwierdzono np., że prąd ucięcia, zależny od kąta fazowego θ wyłączenia prądu przed jego naturalnym przejściem przez zero w danym biegunie, osiąga wartość maksymalną dla kąt θ zawartego w przedziale 1,74-2,95 rad, a minimalna dla kąta θ w przedziale 0-0,31 rad [7]. Wartość prądu ucięcia zależy również od amplitudy wyłączanego prądu [10].

Tabela 1

Wpływ niejednoczesności otwierania t_0 łącznika próżniowego na zakres możliwych zmian czasów łukowych t_2

t_0 ms	$t_0=0$	$0 < t_0 \leq 1,5 \frac{1}{6}$	$1,5 \frac{1}{6} < t_0 \leq 3 \frac{1}{3}$	$3 \frac{1}{3} < t_0 < 5$	$5 < t_0 \leq 15$
t_2 ms	maks. $8 \frac{1}{3}$	10	$11 \frac{2}{3}$	$13 \frac{1}{3}$	15



Rys. 1. Prądy ucięcia (I_U^I, I_U^{II}) łącznika próżniowego w charakterystycznych stanach wyłączenia (I, II - rys. 3) i fazy wyłączenia prądów sinusoidalnych θ_I, θ_{II} przed ich naturalnym przejściem przez zero w sieci trójfazowej

Fig. 1. Cutting off currents of vacuum breaker in characteristic switching off states I_U^I, I_U^{II} and the states of switching off the sinusoidal currents θ_I, θ_{II} before its passing through zero in 3-phase network

W przypadku gdy czas niejednoczesności otwierania jest równy lub bliski zeru, wyłączenie w pierwszym biegunie łącznika nastąpi dla kąta fazowego θ_I mniejszego od $\frac{1}{3}$ rad; wówczas możemy się spodziewać względnie małych wartości prądów ucięcia i odpowiednio mniejszych wartości przepięć łączeniowych w całej sieci.

Przy przerywaniu prądu w jednym (jako pierwszym) biegunie łącznika próżniowego przepięcia łączeniowe występują zarówno od strony odbiornika, jak i od strony źródła zasilania. Wynika to stąd, że pozostałe dwa biegu-

ny łączą nadal, galwanicznie lub poprzez rezystancję łuku i pojemności fazowe obwodu trójfazowego, odbiornik ze źródłem zasilania. Wyłączenie prądu w torach fazowych drugim i trzecim może nastąpić na części narastającej sinusoidy przy kącie fazowym θ_{II} (poprzedzającym przejście sinusoidy prądu przez zero) równym około $\frac{\pi}{2}$ rad. Wartości prądów ucięcia są wówczas duże. Mają one znaczenie dla wartości generowanych przebiegów łączeniowych, przy czym przebiegi te występują w urządzeniach od strony wyłączanego obwodu (odbiornika).

W przypadku gdy czas niejednoczesności otwierania łącznika jest większy od zera, istnieje duże prawdopodobieństwo generowania przebiegów o znacznych wartościach po wyłączeniu prądu w pierwszym biegunie łącznika i następnym, w całej sieci również od strony źródła zasilania. Wówczas urządzenia sieci będą narażone na przebiegi z większą częstotliwością.

Ustalenie dopuszczalnych czasów niejednoczesności otwierania łączników próżniowych może mieć podwójny aspekt techniczny: zmniejszenie wartości generowanych przebiegów, na które narażone są wszystkie elementy sieci oraz zwiększenie trwałości łączeniowej aparatury.

Brak wymagania odnośnie do dopuszczalnych czasów niejednoczesności otwierania łącznika stwarza eksploatacyjne utrudnienia. W przypadku gdy jeden z zestyków trójbiegunowego łącznika pozostaje w stanie zamkniętym, przy odpowiednich parametrach sieci (pojemności źródła zasilania i odbiornika widzianych od strony zacisków łącznika), napięcia odłączonych faz (żył przewodów zasilających) względem ziemi mogą wzrosnąć do międzyprzewodowych - przy potencjale toru nie odłączonego od źródła zasilania równym zero (względem ziemi). Warunki takie są niekorzystne, istnieją trwale po wyłączeniu prądów obciążenia w przypadku szczytowania zestyków i przejściowo przy dłuższych czasach niejednoczesności otwierania łącznika.

W sieciach z aparaturą próżniową wystąpi możliwość eskalacji zwiększonych przebiegów łączeniowych do obwodów urządzeń elektrycznych od strony źródła zasilania, przy podwyższonym napięciu względem ziemi.

Mając na uwadze konieczność zapewnienia dużej trwałości łączeniowej (krótkiego czasu łukowego wyłączeniowego) należy dążyć do minimalizowania czasu niejednoczesności otwierania łączników próżniowych.

W pracy [2] podjęto próbę zdefiniowania charakterystycznych wielkości prądów ucięcia i warunków ich badań. Wartości tych prądów (zakres zmian I , wartości średnie \bar{I} i odchylenia standardowe σ) oraz parametry obwodu probierczego podane w tabeli 2 dla styczników typu SV mogą być z wystarczającą dokładnością zastosowane do praktycznej oceny zjawiska zachodzącego w okolicach przejścia prądu przez zero.

Największą wartość prądu ucięcia stanowi prąd górny maksymalny I_{umax} . Wartość ta asymptotycznie zdąża do minimalnego prądu stabilnego palenia się łuku I_{min} .

Największe wartości prądu ucięcia górnego maksymalnego dla styczników typu SV są w przybliżeniu równe i dla analizy niskonapięciowej sieci

Tabela 2

Prądy ucięcia i stabilnego palenia się łuku styczników próżniowych typu SV [2]

Lp.	Typ stycznika	Prąd stabilnego palenia się łuku		Prąd ucięcia górny		Prąd ucięcia dolny		Parametry obwodu probierczego		
		\bar{I}_{min}	I_{min}	\bar{I}_{Umax}	I_{Umax}	\bar{I}_{Umin}	I_{Umin}	C_{gr}	R_{gr}	I_{max}
-	-	A		A		A		F	Ω	A
1	SV-5	12,1	15,1	5,7	11,6	1,6	0,99	2	1	30
2	SV-7	11,8	13,8	5,6	11,9	1,7	1,09	2	2	30

kopalnianej można założyć $I_{Umax} = 12A$. Stwierdzenie powyższe można odnieść także do innych wielkości charakterystycznych podanych w tabeli 2. Założmy, że czas niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego odpowiada kątowi fazowemu wyłączenia prądu sinusoidalnego przed jego naturalnym przejściem przez zero przy kącie $\theta_{II} = 0,1\pi$ rad (licząc od chwili otwarcia zestyku pierwszego bieguna łącznika przy przejściu prądu przez zero) oraz że wartość prądu ucięcia górnego maksymalnego $I_{Umax} = 12 A$ styczników próżniowych [2] odpowiada chwilowej wartości prądu sinusoidalnego przed przejściem przez zero przy kącie fazowym $\theta_{II} = 0,1\pi$ rad (rys. 1). Otrzymamy wtedy ($t_0 \leq 4$ ms) najkorzystniejsze warunki wyłączenia prądów przez łącznik próżniowy - najniższe wartości prądów ucięcia [7] i wyeliminowanie oddziaływania zwiększonych przepięć łączeniowych w obwodzie jednofazowym odbiornika trójfazowego na obwody źródła zasilania. Czas łukowy wyłączeniowy zawiera się w granicach 5 ms-11 $\frac{2}{3}$ ms.

Na podstawie podanych założeń można wyznaczyć przybliżone wartości mocy znamionowej silników sterowanych łącznikami próżniowymi w obwodach, w których częstość i wartości przepięć będą znacznie ograniczone.

Korzystamy z zależności:

$$P_n = \sqrt{3} U_n \frac{I_r}{k} \eta_n \cos\varphi_n, \quad (1)$$

gdzie:

- P_n - znamionowa moc silnika trójfazowego,
- U_n - napięcie znamionowe,
- I_r - prąd silnika zahamowanego (prąd rozruchowy $I_r = \sqrt{\frac{2}{3}} I_m$),
- I_m - prąd silnika zahamowanego w zrównoważonym układzie jednofazowym (wartość maksymalna),
- k - krotność prądu znamionowego przy rozruchu silnika ($k = \frac{I_r}{I_n}$),
- $\cos\varphi_n$ - znamionowy współczynnik mocy,
- η_n - znamionowa sprawność silnika.

Przyjmując zgodnie z rys. 1, że dla kąta fazowego wyłączenia prądu poprzedzającego przejście prądu silnika zahamowanego przez zero $\theta_{II} = 0,1\pi$ rad wartość chwilowe prądu jest większa lub równa wartości prądu ucięcia górnego maksymalnego $I_{Umax} = 12 A$ (powyżej tej wartości, zbliżonej do minimalnego prądu stabilnego polecania się łuku styczników próżniowych SV-5 i SV-7, nie wystąpi wymuszone wyłączenie prądu), wyrażenie na minimalną moc znamionową silnika sterowanego łącznikiem próżniowym będzie miało postać:

$$P \geq \frac{\sqrt{2}}{k} U_n \frac{I_{Umax}}{\sin \theta_{II}} \cos\varphi_n \eta_n. \quad (2)$$

gdzie: $\theta_{II} = 0,176 \text{ rad}$, kąt fazowy wyłączenia (faza ucięcia prądu) poprzedzający przejście prądu silnika zahamowanego przez zero w układzie jednofazowym, przy którym wartość chwilowa prądu sinusoidalnego jest równa lub większa od $I_{Umax} = 12 \text{ A}$ ($I_m \sin \theta_{II} \geq I_{Umax}$).

Zakładając krotność prądu znamionowego przy rozruchu silnika $k = 6$, współczynnik mocy $\cos \varphi_n = 0,85$ oraz sprawność $\eta_n = 0,95$, otrzymujemy orientacyjne minimalne moce silników, których obwody przy współpracy z łącznikami próżniowymi spełnią podane kryteria optymalizacji:

- 3,68 kW (4,0 kW) przy napięciu znamionowym 500 V,
- 7,37 kW (7,5 kW) przy napięciu znamionowym 1000 V.

3. ANALIZA PRZEPIĘĆ W CHARAKTERYSTYCZNYCH STANACH WYŁĄCZANIA PRĄDÓW ŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI W SIECIACH TRÓJFAZOWYCH O IZOLOWANYM PUNKCIE ZEROWYM

W sieci trójfazowej o izolowanym punkcie zerowym zjawiska przepięciowe zależą w głównej mierze od: czasu niejednoczesności otwierania łącznika, pojemności doziemnej od strony źródła zasilania i odbiornika, impedancji źródła zasilania i odbiornika widzianej od strony łącznika, układu połączeń oraz prądu ucięcia. W chwili ucięcia prądu energia zgromadzona w indukcyjnościach przeładunku się do pojemności obwodu powodując przepięcie.

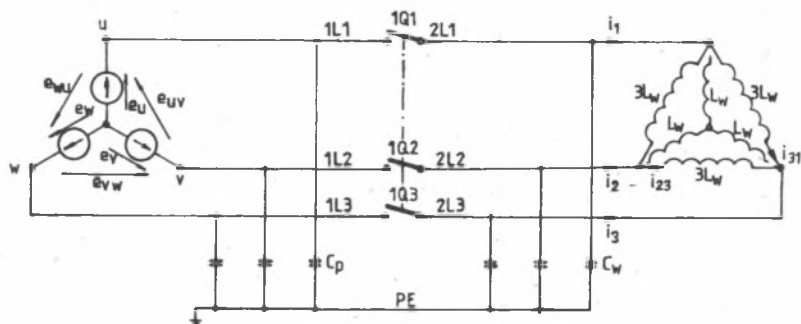
Energia zgromadzona w obwodzie przed i zaraz po wyłączeniu składa się z energii rozładowywanych pojemności fazowych i energii pola magnetycznego. Zakładając, że indukcyjność rozproszenia od strony źródła zasilania jest do pominięcia z uwagi na bardzo małe wartości w stosunku do indukcyjności rozproszenia odbiornika (silnika) [4, 6], można wyznaczyć parametry charakterystyczne obwodu w poszczególnych stanach wyłączenia ze schematu ideowego na rys. 2 oraz związków energetycznych i schematów zastępczych na rys. 3.

Przy założeniu, że całkowita energia zgromadzona w indukcyjności obwodu w chwili ucięcia prądu zostanie przekształcona w energię pojemnościową, można ze związków energetycznych określić maksymalną wartość przepięcia. Założenie to jest słuszne dla połowy okresu napięcia, gdy stosunek, strat energii na rezystancji do energii zgromadzonej w pojemności spełnia warunek [4] :

$$\frac{2Q}{CU_f^2} = \frac{1}{1 + \frac{1}{RC}} \quad 0, \quad (3)$$

gdzie:

- U_f - napięcie fazowe,
- Q - straty energii wydzielone na fazowej rezystancji obwodu,
- T - czas narastania przepięcia,
- C - pojemność doziemna fazy (fazowa),
- R - rezystancja fazowa obwodu.



$$e_{UV} = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{6} - \theta)$$

$$e_{VW} = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} - \theta)$$

$$e_{WU} = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - \frac{7}{6}\pi - \theta)$$

$$i_{12} = \frac{\sqrt{3} E_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{6} - \theta)}{3\omega L_W}$$

$$i_{23} = \frac{\sqrt{3} E_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} - \theta)}{3\omega L_W}$$

$$i_{31} = \frac{\sqrt{3} E_m \cos(\omega t - \frac{7}{6}\pi - \theta)}{3\omega L_W}$$

$$e_U = E_m \cos(\omega t - \theta)$$

$$e_V = E_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \theta)$$

$$e_W = E_m \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi - \theta)$$

$$i_1 = \frac{E_m}{\omega L_W} \sin(\omega t - \theta)$$

$$i_2 = \frac{E_m}{\omega L_W} \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \theta)$$

$$i_3 = \frac{E_m}{\omega L_W} \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi - \theta)$$

Rys. 2. Schemat ideowy sieci trójfazowej o izolowanym punkcie zerowym z trójbiegunowym łącznikiem próżniowym 1Q

C_p i C_w - pojemności fazowe, L_w - fazowe indukcyjności rozproszczenia odbiornika, θ - kąt fazowy ucięcia prądu

Fig. 2. Schematic diagram of 3-phase network with isolated neutral point and three-way vacuum breaker 1Q, where

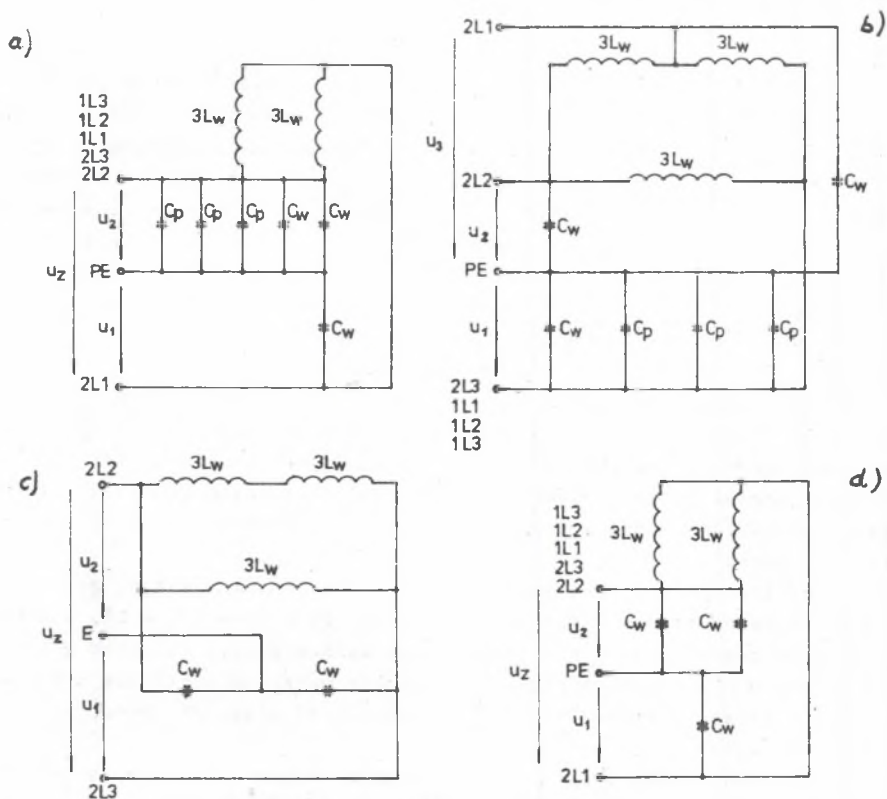
C_p , C_w - phase capacitance, L_w - receiver phase leakage inductance, θ - phase angle of cutting off current

W analizie maksymalnych przebiegów międzyprzewodowych u_2 i fazowych u_1, u_2, u_3 w poszczególnych stanach wyłączania (wielokrotnie wyższych od napięć znamionowych sieci) pominięto zmiany energii spowodowane nierównoważeniem obwodu po wyłączeniu pierwszej fazy i energię w pojemnościach obwodu w chwili ucięcia prądu. Przedstawiony na rys. 2 schemat ideowy sieci trójfazowej o izolowanym punkcie zerowym zawiera: pojemności fazowe C_p widziane od strony łącznika próżniowego 1Q w kierunku źródła zasilania, pojemności fazowe C_w widziane od strony łącznika próżniowego 1Q w kierunku odbiornika o indukcyjności fazowej L_w , trójfazowe źródło zasilania z fazowymi i międzyprzewodowymi $e_u, e_v, e_w, e_{uv}, e_{vw}, e_{wu}$ o pulsacji ω oraz odpowiadającymi im prądami, przy czym kąt θ jest kątem fazowym wyłączenia prądu sinusoidalnego przed jego naturalnym przejściem przez zero (fazą ucięcia prądu). W zależności od czasu niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego 1Q, z punktu widzenia poziomu generowanych przebiegów można wyróżnić trzy stany wyłączania wynikające z wyłączenia prądu obciążenia w fazie (w biegunie) pierwszej, drugiej lub trzeciej i trzeciej.

Szczególnym przypadkiem jest sieć, w której można założyć, że pojemności fazowe od strony źródła zasilania są równe zero ($C_p = 0$). Wówczas wyłączenie prądów w obwodzie trójfazowym prowadzi się do dwóch stanów wynikających z wyłączenia prądu w fazie pierwszej, a następnie w fazie drugiej i trzeciej równocześnie (niezależnie od czasu niejednoczesności otwierania łącznika).

Względniając podane na wstępie założenia można analizować schematy zastępcze sieci, w przypadku gdy $C_p > 0$ i $C_w > 0$, dla trzech stanów wynikających z wyłączenia prądu: w fazie pierwszej (rys. 3a), w fazie drugiej po wyłączeniu w fazie pierwszej (rys. 3b), w fazie drugiej i trzeciej (rys. 3c) po wyłączeniu w fazie pierwszej oraz dla przypadku szczególnego, gdy $C_p = 0$ - dla stanu wynikającego z wyłączenia prądu w fazie pierwszej (rys. 3d) i stanu wynikającego z wyłączenia prądu w fazie drugiej i trzeciej po przerwaniu obwodu w torze fazowym pierwszym (rys. 3c). Różnice energii zgmagazynowanej w polu magnetycznym obwodu przed wyłączeniem i zaraz po wyłączeniu prądu w pierwszej fazie, a następnie w fazie drugiej i trzeciej ładują pojemności w poszczególnych stanach wyłączenia do maksymalnej wartości napięcia międzyprzewodowego u_2 oraz do maksymalnych wartości napięć fazowych u_1, u_2, u_3 w poszczególnych fazach (względem ziemi).

W pierwszym stanie wyłączenia prądu (wyłączenie w pierwszej fazie) oraz w drugim stanie wyłączenia prądu (wyłączenie w drugiej fazie) są generowane przebiegi względem ziemi w całej sieci, przy czym w pozostałych fazach napięcia względem ziemi mają ten sam zwrot i kierunek. W związku z tym między tymi fazami nie występuje różnice potencjałów generowanego przebiegiem (z wyjątkiem różnic potencjałów wynikających z e_{em} źródła zasilania o częstotliwości podstawowej ω).



Rys. 3. Schematy zastępcze sieci o izolowanym punkcie zerowym do analizy maksymalnych wartości przepięć łączeniowych wynikających z energii pola magnetycznego przy wyłączeniu prądów trójfazowych łącznikami próżniowymi:

a - stan I, wynikający z wyłączenia prądu w jednej fazie, b - stan II, wynikający z wyłączenia prądu w drugiej fazie, po wyłączeniu w fazie pierwszej, c - stan III, wynikający z równoczesnego wyłączenia prądów w fazie drugiej i trzeciej, po wyłączeniu w fazie pierwszej, d - stan I, wynikający z wyłączenia prądu w pierwszej fazie, przy fazowych pojemnościach $C_p = 0$, $C_w = 0$ (jako przypadek szczególny); C_p , C_w - pojemności fazowe, L_w - fazowa indukcyjność rozproszenia odbiornika, u_z - przepięcie międzyprzewodowe, u_1 , u_2 , u_3 - przepięcia fazowe, 1L1, 1L2, 1L3 - przewody fazowe od strony źródła zasilania, 2L1, 2L2, 2L3 - przewody fazowe od strony odbiornika, PE - przewód ochronny uziemiający

Fig. 3. The substitute diagrams of network with isolated neutral point for analysis of maximum values of switching overvoltages, resulting from the magnetic field energy during switching off 3-phase currents by means of vacuum breakers

a - state I resulting from switching off the current in the first phase, b - state II resulting from switching off the currents in the second phase, c - state III resulting from concurrent switching off the currents in second and third phase, d - the state I resulting from switching off the current in the first phase, for phase capacitance $C_p = 0$ and $C_w = 0$ (special case), where, C_p , C_w - phase capacitance, L_w - receiver phase leakage inductance, u_z E line over voltage, u_1 , u_2 , u_3 - phase over voltage, 1L1, 1L2, 1L3 - phase leads from the side of supply source, 2L1, 2L2, 2L3 - phase leads from the side of receiver, PE - earth lead

Ponadto między wyłączeniem prądu w pierwszej fazie a wyłączeniem w fazie drugiej lub drugiej i trzeciej występują znaczne różnice w wartościach prądów ucięcia i wartościach napięć łączeniowych. Wartość prądu ucięcia zależy od kąta fazowego wyłączenia θ [7], poprzedzającego naturalne przejście sinusoidy prądu przez zero (fazy ucięcia prądu). W przypadku gdy czas niejednoczesności otwierania łącznika jest zbliżony do zera, wartość prądu ucięcia $I_u^{(I)}$ dla wyłączenia w pierwszej fazie jest mniejsza (pierwszy stan wyłączenia) niż w przypadku wyłączenia prądu w fazie drugiej i trzeciej $I_u^{(II)}$ (drugi, trzeci stan wyłączenia). Wynika stąd celowość ograniczenia czasu niejednoczesności otwierania łącznika do wartości, przy której wyłączenie prądu obciążenia występowaloby równocześnie w fazach drugiej i trzeciej (stan III). Zwiększone wartości napięć będą wówczas występować w obwodzie odbiornika i nie będą oddziaływały na izolację w obwodach od strony źródła zasilania. Można ogólnie stwierdzić (tabela 3 i 4), że niezależnie od wartości fazowych pojemności od strony źródła zasilania C_p i odbioru C_w przepięcia międzyprzewodowe od strony odbiornika mogą osiągnąć wartości dwukrotnie większe niż napięcia fazowe przy wyłączaniu prądów w fazie drugiej i trzeciej, natomiast wartości napięć fazowych odbiornika są porównywalne (różnice wynikają wyłącznie z różnic trójfazowego źródła zasilania).

W pierwszym stanie wyłączenia (wyłączenie prądu w pierwszej fazie) napięcia międzyprzewodowe mogą osiągać wartości 1,5-krotnie większe niż napięcie przewodów względem ziemi odbiornika fazy wyłączanej oraz 3-krotnie większe niż pozostałych faz odbiornika i źródła zasilania. Natomiast napięcie fazy wyłączanej jest dwukrotnie większe niż napięcie faz pozostałych od strony odbiornika i źródła zasilania. Obecność fazowych pojemności C_p od strony źródła zasilania zmniejsza napięcia międzyprzewodowe i fazowe tych przebiegów (odpowiednio do pojemności C_w i C_p - wg podanych zależności) w stosunku do sieci bez pojemności ($C_p=0$). Wynikają stąd wnioski co do zakresu i zasad ochrony izolacji głównej, poprzecznej silników i transformatorów w sieciach z łącznikami próżniowymi.

Generowane napięcia w poszczególnych fazach części sieci widzianej od strony zacisków łącznika próżniowego w kierunku źródła zasilania we wszystkich stanach wyłączenia prądów silnika indukcyjnego są w fazie. Izolacja tej części sieci może być skutecznie chroniona trójfazowym zabezpieczeniem napięciowym skojarzonym w gwiazdę. Izolację części sieci widzianej od strony zacisków łącznika próżniowego w kierunku odbiornika (silnika indukcyjnego) można zabezpieczyć przed generowanymi napięciami łączeniowymi - trójfazowym zabezpieczeniem w odpowiednim układzie połączeń, np. za pomocą rezystorów nieliniowych połączonych w układzie trójkąta. Zabezpieczenie trójfazowe instalowane od strony zacisków silni-

Tabela 3

Zestawienie zależności umożliwiających ocenę wpływu charakterystycznych stanów wyłączenia na przepięcia łączeniowe - w przypadku gdy $C_p > 0$, $C_w > 0$ (rys. 3)

Stan wyłączenia	Przepięcia międzyprzewodowe u_2	Przepięcia fazowe u_1	Przepięcia fazowe u_2	Pulecja przepięcia fazowego $\omega_1 = \omega_2$	Schemat zastępczy wg rys.
I	$\sqrt{\frac{3}{2} \frac{L_w}{C_w} \frac{3C_p + 3C_w}{3C_p + 2C_w} I(I)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w} \frac{3C_p + 2C_w}{2C_p + 2C_w} I(I)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w} \frac{C_w^2}{(3C_p + 2C_w)(2C_p + 2C_w)} I(I)}$	$\sqrt{\frac{1}{\frac{L_w}{C_w} \frac{2C_p + 2C_w}{3C_p + 2C_w}}}$	3a
II	$u_{1-2} + u_{2-1} + u_{3-1}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w} \frac{C_w^2}{(C_w + C_p)(C_w + 3C_p)} I(II)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w} \left[1 + \frac{C_p}{C_w} \sqrt{\frac{C_w^2}{(C_w + C_p)(C_w + 3C_p)}} \right] I(II)}$	$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3$	3b ^{x)}
III	$2 \sqrt{\frac{L_w}{C_w} I(II)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w} I(II)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w} I(II)}$	$\sqrt{\frac{1}{\frac{L_w}{C_w}}}$	3c

x) - napięcia fazowe $u_3 = \sqrt{\frac{L_w}{C_w} \left[1 - \frac{C_p + 2C_p}{C_w} \sqrt{\frac{C_w^2}{(C_w + C_p)(C_w + 3C_p)}} \right] I(II)}$ dla $\omega_2 > \omega_1$

Tabela 4

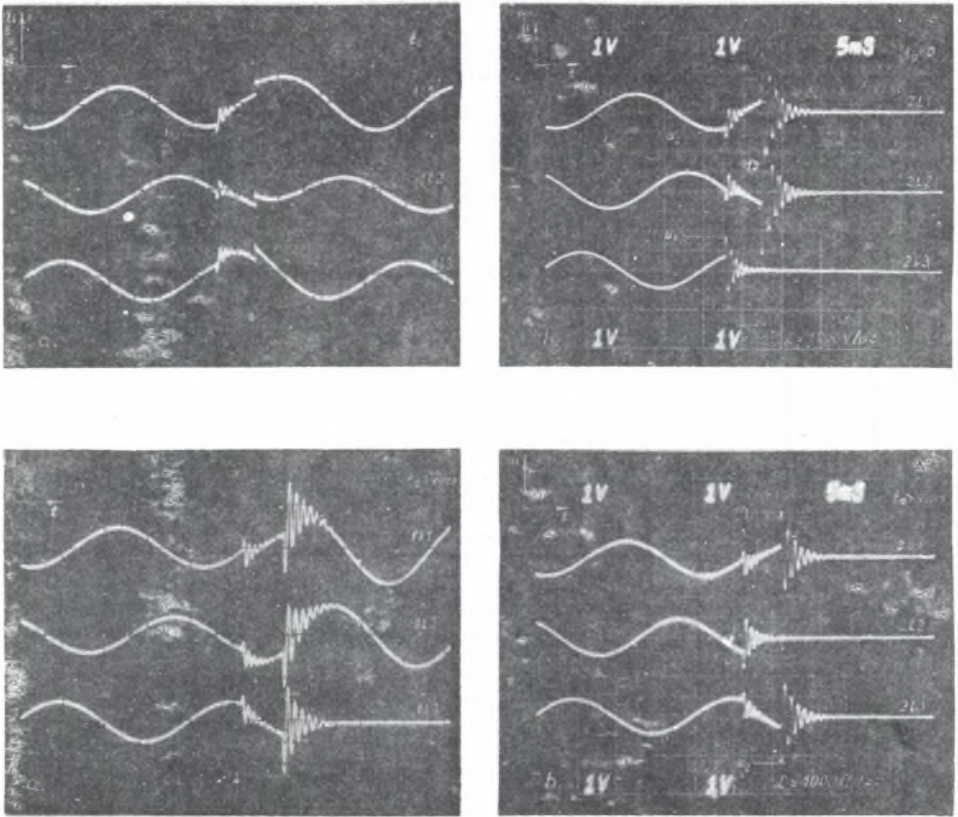
Zestawienie zależności do oceny wpływu charakterystycznych stanów wyłączania na przepięcia łączeniowe w przypadku, gdy $C_p = 0$, $C_w > 0$

Stan wyłączenia	Przepięcie międzyprzewodowe u_z	Przepięcie fazowe u_1	Przepięcie fazowe u_2	Pulsacja przepięcia fazowego $\omega_1 = \omega_2$	Schemat zastępczy wg rys.
I	$\sqrt[3]{\frac{L_w}{C_w}} I_U^{(I)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w}} I_U^{(I)}$	$\sqrt[2]{\frac{L_w}{C_w}} I_U^{(I)}$	$\sqrt{\frac{1}{L_w C_w}}$	3d
II-III	$2\sqrt{\frac{L_w}{C_w}} I_U^{(II)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w}} I_U^{(II)}$	$\sqrt{\frac{L_w}{C_w}} I_U^{(II)}$	$\sqrt{\frac{1}{L_w C_w}}$	3c

ków indukcyjnych stanowi wystarczającą ochronę izolacji całej (połączonej galwanicznie) sieci niskonapięciowej od przepięć łączeniowych generowanych łącznikami próżniowymi.

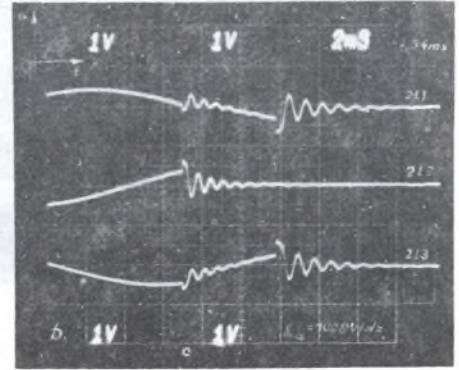
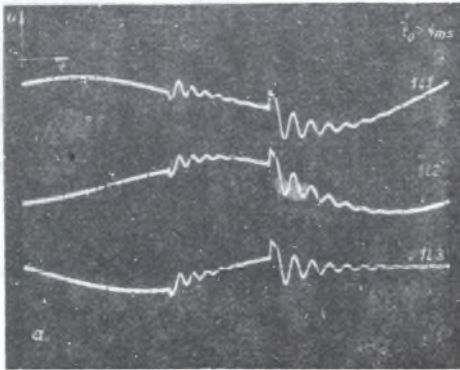
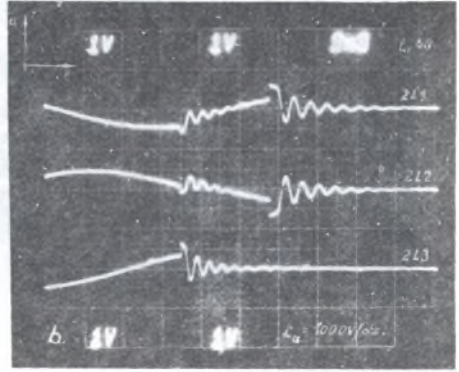
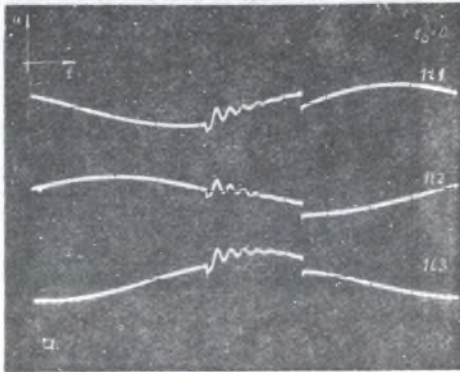
Wnioski dotyczące spodziewanych przepięć łączeniowych, wynikające z analizy związków energetycznych w sieci przy łączeniu prądu obciążenia (silnika) łącznikami próżniowymi (w poszczególnych fazach i stanach wyłączania) przedstawiono w tabelach 3 i 4. W tabelach podano zależności dla największej wartości przepięć międzyprzewodowych u_z i fazowych u_1 , u_2 , u_3 (rys. 3) od prądów ucięcia $I_U^{(I)}$, $I_U^{(II)}$ oraz parametrów obwodu L_w , C_p , C_w przy założeniu, że pojemności $C_p \neq 0$ (tabela 3) lub $C_p = 0$ (tabela 4). Badania laboratoryjne i eksploatacyjne potwierdzają zbieżność wniosków analiz teoretycznych i wyników eksperymentalnych. Przykładowe oscylogramy przedstawione na rys. 4 przedstawiają przebiegi przepięć fazowych w sieci 500 V ($C_p = 1,69$ nF, $C_w = 0,33$ μ F) na zaciskach stycznika (SV-5) - od strony źródła zasilania (a) i silnika indukcyjnego (b) - dla niejednoczesności otwierania $t_o \approx 0$ i $t_o > 4$ ms.

Oscylogramy na rys. 5 przedstawiają przebiegi przepięć fazowych dla układu jak na rys. 4 lecz z trójfazowym zabezpieczeniem przepięciowym warystorowym (OPL-1) w układzie trójkąta na zaciskach silnika indukcyjnego. Widać, że wartości napięć fazowych są ograniczone - mniejsze od wartości napięć międzyprzewodowych. Stosowanie zabezpieczeń przepięciowych opartych na rezystorach nieliniowych (warystorach) instalowanych między przewodami na zaciskach silnika indukcyjnego ("źródła przepięciowego") jest rozwiązaniem dającym najmniejsze wartości przepięć, porównywalne z przepięciami generowanymi przez łączniki powietrzne magnetowydmuchowe.



Rys. 4. Oscylogramy przebiegów napięć fazowych, na zaciskach łącznika próżniowego 1Q (SV-5), w sieci o napięciu znamionowym 500 V przy wyłączeniu prądów silnika zahamowanego ($C_p = 1,69$ nF, $C_w = 0,33$ μ F; $t_o \approx 0$, $t_o > 4$ ms)
 a) od strony stacji transformatorowej (400 kVA), b) od strony silnika indukcyjnego (2,2 kW)

Fig. 4. The oscillograms of phase overvoltages, taken on the terminals of vacuum breaker 1Q (SV-5) in the network of 500 V and during the switching off the currents of braked motor ($C_p = 1,69$ nF, $C_w = 0,33$ μ F; $t_o \approx 0$, $t_o > 4$ ms)
 a) from the side of transformer station (400 kVA), b) from the side of induction motor (2,2 kW)

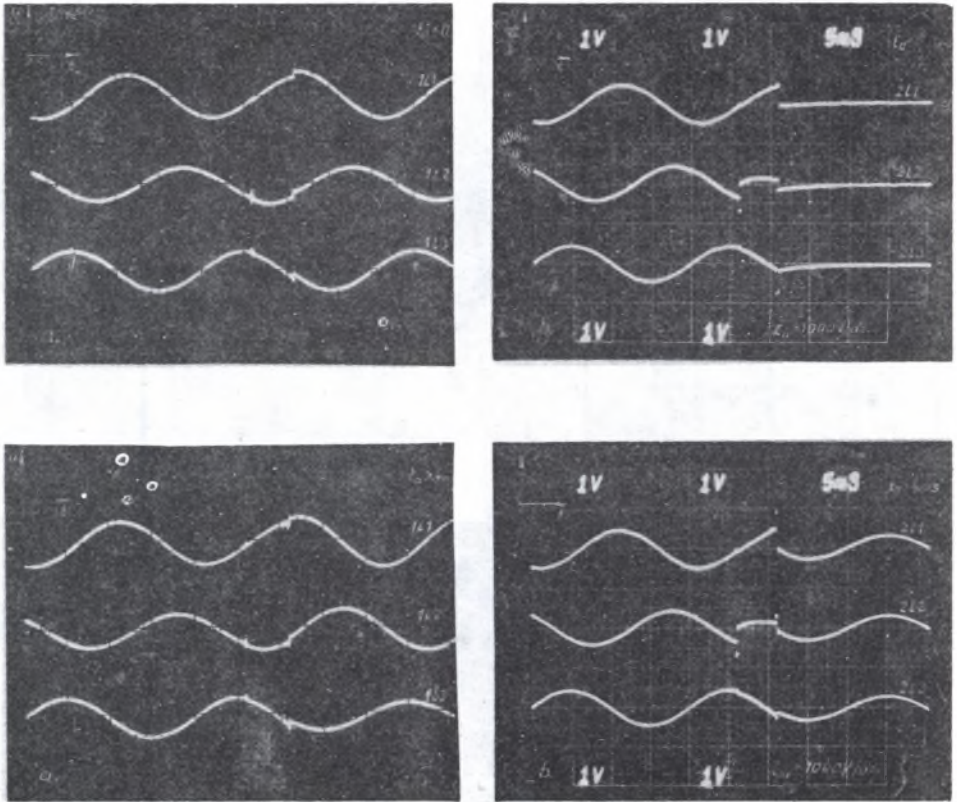


Rys. 5. Oscylogramy przepięć fazowych, na zaciskach łącznika próżniowego 1Q (SV-5), ograniczonych zabezpieczeniem przepięciowym typu OPL-1, przy wyłączeniu prądów silnika zahamowanego w sieci o napięciu znamionowym 500 V ($C_p = 1,69$ nF, $C_w = 0,33$ μ F; $t_0 \approx 0$, $t_0 > 4$ ms)

a) od strony stacji transformatorowej (400 kVA), b) od strony silnika indukcyjnego (2,2 kW)

Fig. 5. The oscillograms of phase overvoltages, taken on the terminals of vacuum breaker 1Q (SV-5), protected with the device OPL-1 type, during switching off the current of braked motor in the network of 500 V rated voltage ($C_p = 1,69$ nF, $C_w = 0,33$ μ F; $t_0 \approx 0$, $t_0 > 4$ ms)

a) from the side of transformer station (400 kVA), b) from the side of induction motor (2,2 kW)



Rys. 6. Oscylogramy przebiegów napięć fazowych na zaciskach łącznika próżniowego 1Q (SV-5), ograniczonych zabezpieczeniem przepięciowym typu OPL-1 przy wyłączeniu prądów silnika zahamowanego w sieci o napięciu znamionowym 500 V; ($C_p = 1,0$ nF, $C_w = 0,69$ nF - pojemność własna silnika; $t_o \approx 0$, $t_o > 4$ ms)

a) od strony stacji transformatorowej (400 kVA), b) od strony silnika indukcyjnego (2,2 kW)

Fig. 6. The oscillograms of phase overvoltages, taken on the terminals of vacuum breaker 1Q (SV-5), protected with the device of OPL-1 type, during switching off the currents of braked motor in the network of 500 V rated voltage ($C_p = 1,0$ nF, $C_w = 0,69$ nF - the motor inherent capacitance; $t_o \approx 0$, $t_o > 4$ ms)

a) from the side of transformer station (400 kVA), b) from the side of induction motor (2,2 kW)

Na rys. 6 przedstawiono oscylogramy przepięć fazowych jak na rys. 5 dla przypadku, gdy pojemność przewodów zasilających odbiornik można pominąć.

Krotności przepięć ograniczonych (rys. 5 i 6) są porównywalne. Przepięcia rejestrowano za pomocą szerokopasmowych rezystancyjno-pojemnościowych dzielników napięć o pojemności wejściowej 3 pF i trójkanałowych oscyloskopów Tektronix 7623 A.

4. CZĘSTOŚĆ GENEROWANIA PRZEPIEĆ

Z ogólnej liczby łączy obwodów indukcyjnych łącznikami próżniowymi zaledwie w kilku procentach nie są generowane przepięcia. Stwarza to istotne zagrożenia, zwłaszcza dla izolacji zwojowej silników elektrycznych i zespołów transformatorowych "małej mocy", mniej wytrzymałej od izolacji głównej, a narażonej na dwukrotnie większe przepięcia międzyprzewodowe [6].

Z uwagi na znaczne szybkości narastania uderu napięcia w początkowej fazie pierwsze cewki (zwoje) uzwojenia silnika znajdują się pod działaniem różnicy potencjałów wynikających z dodatniej i ujemnej amplitudy fali przepięciowej [8] i podlegają szczególnie niekorzystnym naprężeniom elektrycznym.

W zależności od stanu pracy silnika w czasie wyłączenia prądu otrzymujemy różne rozkłady empiryczne przepięć.

W tabeli 5 zestawiono przykładowo wyniki badań statystycznych (rozkład empiryczny) przepięć w obwodzie silnika indukcyjnego BMSKe-34a (kołowrotu) o mocy 3 kW, przy napięciu 500 V, sterowanego łącznikiem stycznikowym OWS-0108 (1Q - rys. 7), ze stycznikiem próżniowym SV-5, uzyskane w normalnych warunkach 3-miesięcznej eksploatacji, w układzie elektrycznym przedstawionym na rys. 7. Przepięcia rejestrowano za pomocą liczników z dzielnikami pojemnościowymi o pojemności wejściowej 1 nF. Pojemność fazowa sieci z silnikiem indukcyjnym widziana od strony zacisków stycznika próżniowego wynosiła 10 nF.

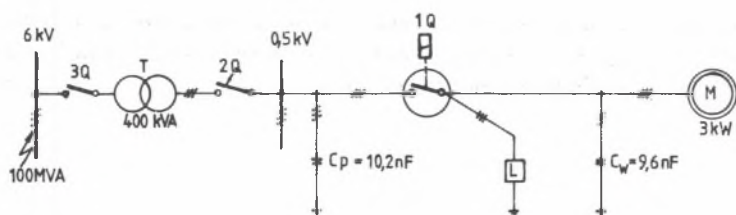
Z zestawionych tabelarycznie wyników widać, że w 95% ogólnej liczby łączy są generowane w tym obwodzie przepięcia, przy czym z największą częstością występują przepięcia względem ziemi o wartościach szczytowych do 1000 V (0,241) i od 1501 do 2000 V (0,191). Przepięcia łączeniowe o wartościach szczytowych niższych od wartości napięć probierczych, 2121 V - dla $U_n = 500$ V i 3182 V - dla $U_n = 1000$ V [5], nie stanowią zagrożenia dla izolacji głównej, ale mogą stanowić zagrożenia dla izolacji zwojowej silników ze względu na wyższe wartości szczytowe przepięć międzyprzewodowych oraz dużą stromość ich narastania.

Izolacja zwojowa jest poddawana działaniom przepięć występujących między przewodami, których wartości szczytowe mogą być dwukrotnie wyższe od przepięć fazowych. Dlatego nawet przy stosunkowo niskich wartościach

Tabela 5

Wyniki statystycznej analizy badanych przepięć

Lp.	Przedział napięć fazowych	Liczebność	Čzęstość	Liczebność skumulowana	Čzęstość skumulowana
1	500 V i mniej	174	0,046	174	0,046
2	501 V - 1000 V	915	0,241	1089	0,287
3	1001 V - 1500 V	475	0,125	1564	0,412
4	1501 V - 2000 V	725	0,191	2289	0,603
5	2001 V - 2500 V	598	0,158	2887	0,761
6	2501 V - 3000 V	394	0,104	3281	0,865
7	3001 V - 3500 V	264	0,070	3545	0,934
8	3501 V - 4000 V	176	0,046	3721	0,981
9	4001 V i więcej	74	0,019	3795	1,000



Rys. 7. Schemat ideowy układu badawczego

T - stacja transformatorowa, 1Q - łącznik stycznikowy, 2Q - wyłącznik zabezpieczeniowy, 3Q - odłącznik, M - silnik indukcyjny, L - licznik przepięć z dzielnikiem pojemnościowym o pojemności wejściowej 1 nF

Rys. 7. The schematic diagram of testing circuit

T - transformer station, 1Q - vacuum breaker, 2Q - safety switch, 3Q - isolating switch, M - induction motor, L - overvoltage counter with capacitive divider of 1 nF input capacitance

przepięć duża częstość ich generowania może znacznie wpływać na obniżenie wytrzymałości elektrycznej izolacji maszyn i urządzeń.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

- Przepięcia powodowane wyłączaniem odbiorników indukcyjnych trójfazowymi łącznikami próżniowymi w sieciach o izolowanym punkcie zerowym osiągają różne wartości przy przerywaniu prądów w kolejnych torach fazowych i występują między przewodami fazowymi oraz między przewodami fazowymi a ziemią.

Maksymalne wartości przepięć międzyprzewodowych są dwukrotnie większe od wartości przepięć fazowych. Przepięcia zależą przede wszystkim od wartości prądów ucięcia, impedancji obwodu oraz niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego.

- Czas niejednoczesności otwierania łącznika próżniowego ma duży wpływ na prądy ucięcia, wartość generowanych przepięć i trwałość łącznika. Jednoczesność otwierania ($t_0 = 0$) stwarza najkorzystniejsze warunki dla wyłączania prądów trójfazowych. W tym przypadku prądy ucięcia i czas łukowy wyłączeniowy osiągają najniższe wartości, a łączniki próżniowe mają największą trwałość.

- Konieczność zmniejszenia przepięć łączeniowych występujących przy wyłączaniu prądów silników indukcyjnych zahamowanych wymaga, aby wartości mocy znamionowej silników sterowanych łącznikami próżniowymi nie były mniejsze od 4 kW przy napięciu 500 V i 7,5 kW przy napięciu 1000 V, a wartości niejednoczesności otwierania łączników nie były większe od 4 ms.

- Trójfazowe zabezpieczenia przepięciowe warystorowe w obwodach z łącznikami próżniowymi ograniczają przepięcia do wartości porównywalnych z łącznikami powietrznymi magnetywduchowymi.

LITERATURA

- [1] Froncek F., Markiewicz H.: Analiza zjawisk powstających przy wyłączeniu obwodów indukcyjnych prądu przemiennego łącznikami próżniowymi. Raport nr 507 Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, 1978.
- [2] Froncek F., Wróblewski Z.: Charakterystyczne wartości prądu ucięcia łączników próżniowych oraz metoda ich wyznaczania. Arch. Elektrotechniki 1983, Z. 1/2.
- [3] Gebauer E.: Verhalten des Lichtbogens und des Elektroden Abbrandes in einem Druckbereich von 10^{-6} Torr bis Atmosphärendruck (760 Torr). VES Elektro-Apparate-Werke, Berlin-Treptow, DDR, International Symposium, Łódź 1970.
- [4] Kałantarow P.Ł., Nejman Ł.R.: Teoria cepiej pieremiennogo toka. GEI, Moskwa - Leningrad 1954.
- [5] Kowalecki Z., Krasucki F.: Ochrona przepięciowa sieci niskonapięciowej z łącznikami próżniowymi. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 1988, nr 12 (230).
- [6] Krasucki F., Kowalecki Z.: Kryteria ochrony przepięciowej przy stosowaniu łączników próżniowych w sieciach niskonapięciowych. Zeszyty Naukowe Polit. Śl., s. Górnictwo, z. 156, Gliwice 1987.
- [7] Królikowski Cz., Babij J., Batura R.: Syntetyczne wyniki badań zjawisk zachodzących podczas wyłączenia obwodów pojemnościowych łącznikiem próżniowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, s. Elektryka, z. 29, Poznań 1985.
- [8] Legute N.M., Brooks W.C.: Use of vacuum contactors in average current motor starters. I.S. Technology Vol. 37, 1970, nr 4.
- [9] Nishiwaki S., Yanabu S.: Overvoltage due current chopping in non-grounder neutral three-phase system. Materiały konferencyjne - Elektryczny łuk łączeniowy, II Międzynarodowe Sympozjum SEP - Politechnika Łódzka 1977.
- [10] Rahowski W.I.: Fiziczeskije osnovy komutacii elektriczeskowo toka w wakuumie. Izdatielstwo Nauka, Moskwa 1970.
- [11] Szabo-Bakos R.: Stromnulldurchgangserscheinungen in Hochspannungsschaltern. Materiały Konferencyjne - Elektryczny łuk łączeniowy, III Międzynarodowe Sympozjum SEP - Politechnika Łódzka, 1977.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОВРЕМЕННОСТИ РАЗМЫКАНИЯ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ
И ПАРАМЕТРОВ ШАХТНОЙ СЕТИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИЗОЛИРОВАННОЙ
НЕЙТРАЛЬЮ НА КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В работе рассматривается влияние отдельных параметров сети, а также параметров и коммутационных состояний вакуумных контакторов на генерируемые перенапряжения при отключении индуктивного тока.

Проведен анализ эквивалентных схем сети в отдельных состояниях отключения трехфазных токов и определены соотношения между параметрами сети и токами отсечки, вытекающие из энергетических зависимостей, характеризующие максимальные значения коммутационных перенапряжений и пульсации. Обращается внимание на достаточно большую частоту генерированных перенапряжений при отключениях, особенно малых индукционных потребителей и возможность естественного их демпфирования соединительными проводами или варисторной защитой.

Определены минимальные рекомендуемые значения номинальной мощности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, применение которых исключает чрезмерные коммутационные перенапряжения в шахтных сетях 500 и 1000 В. Подтверждается возможность ограничения перенапряжений в результате применения предлагаемых видов защиты от перенапряжений.

THE INFLUENCE OF NON-CONCURRENCE OF VACUUM BREAKER SWITCHING OFF STATES AND THE PARAMETERS OF LOW-VOLTAGE COAL-MINE NETWORK WITH ISOLATED NEUTRAL POINT ON SWITCHING OVERVOLTAGES

S u m m a r y

There was presented in that paper the influence of choosen network parameters and switching states of vacuum breakers on the overvoltages generated during switching off the inductive currents.

There were analysed the substitute network diagrams in particular states of switching off the 3-phase currents, working out the relations between network parameters and cutting off currents, resulting from energetic relations and characterizing the switching overvoltage value and pulsation. It was called the attention to high frequency of generated overvoltages, especially during switching off little inductive receivers and the possibility of its natural dumping by means of connecting leads or varistor protecting devices. There were established the recommended minimum rating values of squirrel-cage motors, which introduction eliminates excessive switching overvoltages in 500 V and 1000 V coal-mine networks.

It was presented the possibility of diminishing the overvoltage due to application of proposed overvoltage protections.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Henryk Markiewicz