

Witalij Skoropacki

WYBÓR SPOSOBU ZDALNEGO ZASILANIA URZĄDZEŃ TELEMETRYCZNYCH I TELEKOMUNIKACYJNYCH FUNKCJONUJĄCYCH W STREFACH ZAGROŻONYCH WYBUCHEM

Streszczenie

Urządzenia telemetryczne i telekomunikacyjne mogą być zasilane prądem stałym następującymi sposobami:

- przy równoległym podłączeniu odbiorników energii elektrycznej do obwodu,
- zdalnego zasilania (tzw. konfiguracja „drabinkowa”),
- przy szeregowym połączeniu odbiorników energii elektrycznej do obwodu,
- zdalnego zasilania,
- z wykorzystaniem kaskadowo połączonych konwerterów napięcia,
- z wykorzystaniem odrębnych kanałów energii elektrycznej.

Porównania sposobów przesyłania energii elektrycznej dokonano na podstawie porównania sumarycznej wartości użytecznej mocy P_U dostarczonej do odbiorników energii elektrycznej i współczynnika sprawności η .

Wartość mocy elektrycznej, którą można przesyłać na odległość do kopalnianych urządzeń telekomunikacyjnych, jest ograniczona wymaganiami iskrobezpieczeństwa oraz warunkami prowadzenia robót pod napięciem, przy czym czynnikiem dominującym w takim przypadku jest wartość mocy użytecznej dostarczonej do tych urządzeń. Największą wartość mocy użytecznej dostarczonej do odbiorników energii elektrycznej z wykorzystaniem toru naturalnego lub pochodnego kabla telekomunikacyjnego osiąga się, stosując przelotowe konwertery napięcia zasilania. Przy stosowaniu przelotowych konwerterów napięcia, w porównaniu z wariantami zasilania bez konwerterów (układ drabinkowy i szeregowy), można osiągnąć kilkakrotnie większą wartość mocy elektrycznej dostarczonej na odległość l , przy porównywalnych wartościach prądu na wejściu obwodu zdalnego zasilania.

Stosowanie odrębnych kanałów przesyłania energii do poszczególnych odbiorników zdalnego zasilania pozwala na dostarczenie nieco większej mocy użytecznej w porównaniu ze sposobem konwencjonalnym. Jednak realizacja techniczna odrębnych kanałów zarówno o podziale częstotliwościowym, jak i czasowym jest bardziej skomplikowana i związana z istotnymi problemami zapewnienia iskrobezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej.

Najbardziej korzystny pod względem realizacji technicznej, jest sposób zdalnego zasilania z stosowaniem przelotowych konwerterów napięcia. Pozwala on w dogodniejszy sposób zapewnić iskrobezpieczeństwo obwodu zdalnego zasilania drogą podziału tego obwodu na iskrobezpieczne energetycznie izolowane między sobą odcinki, wykorzystanie jednakowych przelotowych konwerterów napięcia, funkcjonujących w trybie dopasowania impedancji wejściowych, zapewnić kompatybilność elektromagnetyczną w jednym wieloparowym kablu telekomunikacyjnym.

Selection of the method of remote power supply of telemetric and telecommunication equipment operating in the explosion – hazard zones

Abstract

The telemetric and telecommunication equipment can be DC – supplied with the use of following methods:

- at parallel connection of the receivers of electrical energy to the circuit of remote power supply, (the so called "ladder - type" configuration").

- at series connection of the receivers of electrical energy to the circuit of remote power supply.
- with the use of cascade – connected voltage converters,
- with the use of separate electrical energy channels.

The comparison of the method for transmitting electrical energy was made on the basis of comparing the total value of effective power P_o delivered to the electrical energy receivers and the efficiency coefficient.

The value of electrical power to be remotely delivered to mine telecommunication equipment is limited by the requirements of intrinsic safety and conditions of conducting the work in the live wire condition, with the dominating factor being, in this case, the value of effective power delivered to this equipment. The highest value of effective power delivered to the receivers of electrical energy with the use of either a natural or phantom line of a telecommunication cable is obtained using the through - converters of the supply voltage. In the case of using the through-voltage converters, as compared to the power supply version without these converters (ladder - type and series versions), one can obtain a several times greater value of electrical power supplied to a distance L keeping the comparable values of current at the input of the remote power supply system.

The use of separate channels to transmit energy to individual receivers of remote power supply makes it possible to deliver a little higher value of effective power, as compared to the conventional method. On the other hand, the technical realisation of separate channels, both with the frequency and time division, is more complicated and connected with important problems of ensuring the intrinsic safety and electromagnetic compatibility.

The most advantageous, in terms of technical realisation, is the method of remote power supplying with the use of through voltage converters.

It enables to ensure more conveniently the intrinsic safety of the remote power supply circuit into intrinsically – safe, energetically isolated, sections, and the use of identical through-voltage converters operating in the mode of matching the input impedances, to ensure the electromagnetic compatibility in a single multi- pair telecommunication cable.

1. UWAGI WSTĘPNE

Urządzenia telemetryczne i telekomunikacyjne mogą być zasilane prądem stałym następującymi sposobami [1]:

- przy równoległym połączeniu odbiorników energii elektrycznej do obwodu zdalnego zasilania (tzw. konfiguracja „drabinkowa”),
- przy szeregowym połączeniu odbiorników energii elektrycznej do obwodu zdalnego zasilania,
- z wykorzystaniem kaskadowo połączonych konwerterów napięcia,
- z wykorzystaniem odrębnych kanałów przesyłania energii elektrycznej.

Porównania sposobów przesyłania energii elektrycznej dokonano na podstawie sumarycznej wartości użytecznej mocy P_U dostarczonej do odbiorników energii elektrycznej i współczynnika sprawności η .

$$\eta = \frac{P_U}{P_{ZZ}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

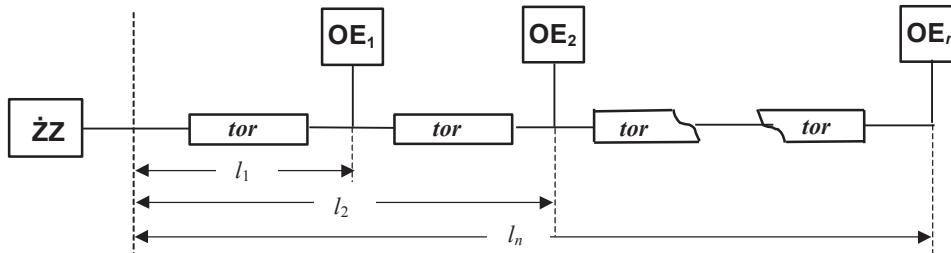
P_U – moc użyteczna pobierana przez wszystkie odbiorniki energii elektrycznej,

P_{ZZ} – moc elektryczna pobierana ze źródła zasilania.

2. ANALIZA SPOSOBÓW ZDALNEGO ZASILANIA

Zagadnienie, które zostało przeanalizowane zdefiniowano następująco:

- n odbiorników energii elektrycznej OE_1, OE_2, \dots, OE_n (rys. 1) jest rozlokowanych odpowiednio w odległościach l_i ($i = 1, 2, \dots, n$) od stacji centralnej,



Rys. 1. Zasada organizacji zdalnego zasilania: $\dot{Z}\dot{Z}$ – źródło zasilania (stacja centralna), OE_1, OE_2, OE_n – odbiorniki energii elektrycznej (urządzenia peryferyjne)

Fig. 1. Principle of remote power supply organisation: $\dot{Z}\dot{Z}$ – power supply source (central station), OE_1, OE_2, OE_3 - receivers of electrical energy (peripheral units)

- moc elektryczna pobierana przez każdy odbiornik jest równa P_{OE_i} przy napięciu U_{OE_i} ,
- należy dostarczyć wymaganą moc elektryczną P_{OE_i} do każdego z odbiorników OE_i przez wspólny tor przewodowy naturalny lub pochodny, przy minimalnym napięciu na wyjściu źródła zdalnego zasilania z uwzględnieniem warunków iskrobezpieczeństwa.

Analizę porównawczą przeprowadzono na podstawie schematów zastępczych tych sposobów przedstawionych na rysunku 2.

Należy przypomnieć, że zgodnie z [2] maksymalna dopuszczalna wartość napięcia prądu stałego na wejściu toru macierzystego lub pochodnego, który jest wykorzystywany do przesyłania energii elektrycznej na odległość, jest ograniczona ze względów porażeniowych ($U_{WE} = U_{dop} = 60V$ DC).

Bilans mocy obwodu zdalnego zasilania można zapisać w postaci

$$P_{ZZ} = P_U + P_{ST} \quad (2)$$

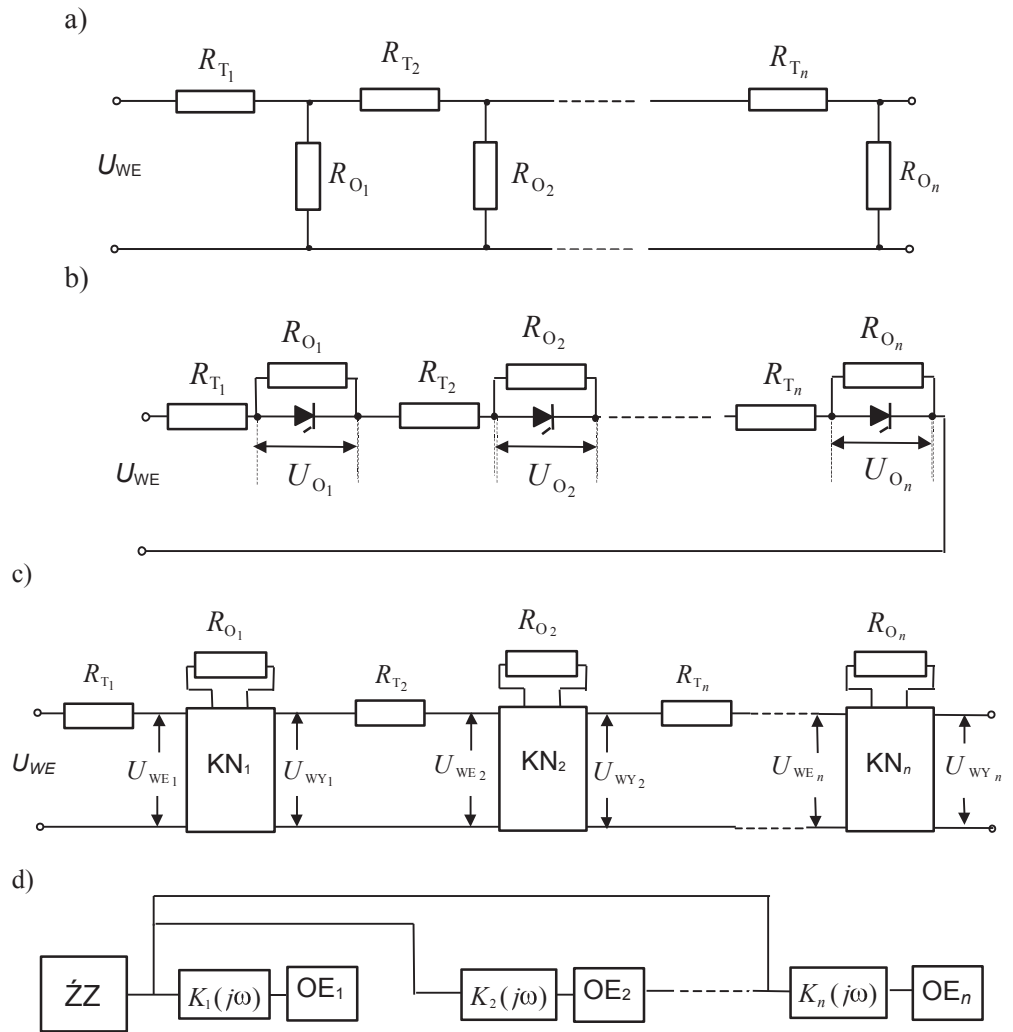
gdzie:

P_{ZZ} – moc pobieraną od źródła zdalnego zasilania,

P_{ST} – moc tracona w torze przewodowym oraz w urządzeniach stacyjnych (transformatory, filtry, rozgałęźniki itd.).

We wzorze (2)

$$P_U = \sum_{i=1}^n P_{O_i}, \quad P_{ST} = \sum_{i=1}^n P_{T_i} + \sum_{i=1}^m P_{S_i} \quad (3)$$



Rys.2. Zastępcze schematy elektryczne podstawowych sposobów zdalnego zasilania: $\dot{Z}Z$ – źródło zasilania, OE – odbiorniki, KN – konwerter napięcia

Fig. 2. Substitute electrical diagrams of principal methods of remote power supply: ZZ – power supply source, OE – receivers, KN – voltage converter

gdzie:

P_{O_i} – moc pobierana przez i -ty odbiornik energii elektrycznej,

P_{T_i} – moc tracona w i -tym odcinku toru transmisyjnego (pochodnego lub macierzystego),

P_{S_i} – moc tracona w i -tym urządzeniu stacyjnym.

Ponieważ, przy przesyłaniu energii elektrycznej na odległość, dominująca część mocy jest tracona na rezystancji toru transmisyjnego, straty energii w urządzeniach stacyjnych można pominać.

W celu uproszczenia analizy założono, że $R_{T_1} = R_{T_2} = \dots = R_{T_n} = R_T$, rezystancja wewnętrzna źródła zdalnego zasilania $R_i \approx 0$, a liczba odbiorników energii elektrycznej $n = 4$.

Schemat elektryczny przedstawiony na rysunku 2a można przedstawić w postaci kaskadowego połączenia czwórników typu odwróconego „Γ”, przy czym w stanie dopasowania impedancji wejściowych

$$R_{O_1} = R_T; R_{O_2} = R_T \left(1 + \frac{1}{2} \right); R_{O_3} = R_T \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \right); R_{O_4} = R_T \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \right) \quad (4)$$

Wyniki obliczeń wartości mocy użytecznej dostarczonej do poszczególnych odbiorników energii elektrycznej oraz sprawności przesyłania energii elektrycznej w obwodzie zdalnego zasilania o konfiguracji drabinkowej dla różnej liczby i ($i = 1, 2, 3, 4$) i różnych wartości rezystancji wejściowej R_{O_i} odbiorników energii elektrycznej, w przypadku wykorzystania toru pochodnego ($R_j = 35 \Omega$) oraz toru macierzystego ($R_j = 70 \Omega$) górniczego kabla telekomunikacyjnego, przedstawiono w tablicach 1 i 2 (wartości zaznaczone żółtym kolorem odpowiadają trybowi dopasowania impedancji wejściowych). Wyniki te pozwalają stwierdzić, że w układzie drabinkowym nie istnieje ścisła korelacja między wartością sumarycznej mocy użytecznej P_U a sprawnością energetyczną η . Taka korelacja jest zachowana tylko w układzie z jednym odbiornikiem energii elektrycznej, kiedy w trybie dopasowania impedancji jednocześnie uzyskuje się maksymalną wartość P_U i η . W pozostałych przypadkach wartości maksymalne P_U są uzyskiwane przy określonych kombinacjach między wartościami impedancji wejściowych poszczególnych odbiorników energii elektrycznej, przy czym wartości te są uzyskiwane dla dużych rozrzutów wartości odbieranych mocy przez poszczególne odbiorniki.

W przypadku szeregowego włączenia odbiorników energii elektrycznej w obwód zdalnego zasilania (rys. 2b), prąd wejściowy w obwodzie zdalnego zasilania jest równy

$$I_{WE_T} = \frac{U_{WE} - \sum_{i=1}^n U_{Z_i}}{R_j l} \quad (5)$$

gdzie:

- n – liczba odbiorników energii elektrycznej,
- l – długość obwodu zdalnego zasilania,
- U_Z – napięcie stabilizacji diody Zenera.

Przy jednakowych odbiornikach energii elektrycznej oraz przy ich równomiernym rozmieszczeniu $U_{Z_1} = U_{Z_2} = \dots = U_{Z_n} = U_Z$, $R_{O_1} = R_{O_2} = \dots = R_{O_i} = R_O$.

Równanie napięć w obwodzie zdalnego zasilania można zapisać w sposób następujący

$$U_{WE} = \sum_{i=1}^n U_{T_i} + nU_Z \quad (6)$$

gdzie U_{T_i} – jest spadkiem napięcia na i -tym odcinku toru przewodowego.

Moc pobierana przez i -ty odbiornik energii elektrycznej jest równa $P_O = U_Z^2 / R_O$, $P_U = nP_O$, moc pobierana od źródła zdalnego zasilania $P_{ZZ} = I_{WE_T} \cdot U_{WE}$ a $\eta = P_U / P_{ZZ}$.

Wyniki obliczeń wartości mocy użytecznej dostarczonej do poszczególnych odbiorników energii elektrycznej oraz sprawności przesyłania energii elektrycznej przy szeregowym włączeniu tych odbiorników w obwód zdalnego zasilania dla różnej liczby i ($i = 1, 2, 3, 4$) i różnych wartości rezystancji wejściowej R_{O_i} odbiorników, w przypadku wykorzystania toru pochodnego ($R_j = 35 \Omega$) oraz toru macierzystego ($R_j = 70 \Omega$) górniczego kabla telekomunikacyjnego, przedstawiono w tablicach 3 i 4 (wartości zaznaczone żółtym kolorem są maksymalne).

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tablicach 3 i 4 można stwierdzić, że przy stosowaniu sposobu zdalnego zasilania prądem stałym z szeregowym włączeniem odbiorników energii elektrycznej można osiągnąć większą sprawność przesyłania energii, w porównaniu z układem o drabinkowej konfiguracji obwodu zdalnego zasilania. Jednakże stosunkowo wysoka sprawność może być osiągnięta przy stosowaniu odbiorników o małej mocy poboru energii elektrycznej. Sumaryczna użyteczna moc dostarczona do odbiorników energii elektrycznej przy jednakowej wartości prądu wejściowego jest mniejsza.

Bilans mocy elektrycznej w obwodzie zdalnego zasilania jednego odbiornika energii elektrycznej z wykorzystaniem n konwerterów napięcia (rys. 2c) można zapisać w postaci

$$P_{ZZ} = \sum_{i=1}^n P_{T_i} + \sum_{i=1}^n P_{K_i} + P_O \quad (7)$$

gdzie:

P_{ZZ} – moc pobierana ze źródła zdalnego zasilania,

P_{T_i} – moc tracona w i -tym odcinku obwodu zdalnego zasilania,

P_{K_i} – moc tracona w i -tym konwerterze napięcia,

P_O – moc użyteczna pobierana przez odbiornik energii elektrycznej.

Moc tracona w i -tym odcinku obwodu zdalnego zasilania jest równa

Tablica 1. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do poszczególnych odbiorników przez tor pochodny przy drabinkowej konfiguracji układu zdalnego zasilania

$U_{WE} = 60 \text{ V}; R_j = 35 \Omega$				I_{WE_T}	P_{ZZ}	P_{O_1}	P_{O_2}	P_{O_3}	P_{O_4}	P_U	η		
				[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]		
$n = 1,$ $l = 10 \text{ km}$	R_{O_1}, Ω	100	100	0,133	8,0	1,78	-	-	-	1,78	22,2		
		175	175	0,114	6,86	2,29	-	-	-	2,29	33,3		
		350	350	0,086	5,14	2,57	-	-	-	2,57	50,0		
		500	500	0,071	4,23	2,49	-	-	-	2,49	56,2		
		700	700	0,057	3,43	2,29	-	-	-	2,29	66,6		
		900	900	0,048	2,88	2,07	-	-	-	2,07	72,0		
$n = 2,$ $l = 5 \text{ km}$	R_{O_1}, R_{O_2}, Ω	100	100	0,242	14,50	3,14	0,41	-	-	2,55	24,5		
		175	175	0,200	12,0	3,57	0,86	-	-	4,43	36,9		
		200	300	0,190	11,40	3,58	0,95	-	-	4,53	39,7		
		300	200	0,176	10,54	2,85	1,22	-	-	4,07	38,6		
		200	400	0,186	11,13	3,79	0,92	-	-	4,70	42,3		
		300	400	0,161	9,67	3,37	1,22	-	-	4,59	47,4		
		400	400	0,146	8,76	2,97	1,43	-	-	4,40	50,2		
		400	300	1,153	9,18	2,76	1,47	-	-	4,23	46,0		
		400	500	0,141	8,45	3,13	1,37	-	-	4,50	53,2		
		500	300	0,143	8,60	2,44	1,62	-	-	4,06	47,2		
		500	400	0,136	8,14	2,63	1,59	-	-	4,22	51,9		
		800	500	0,110	6,65	2,06	1,81	-	-	3,86	58,1		
600	500	0,122	7,31	2,49	1,64	-	-	4,14	56,6				
$n = 3,$ $l = 3,33 \text{ km}$	$R_{O_1}, R_{O_2}, R_{O_3}, \Omega$	100	100	0,333	19,97	4,65	0,64	0,14	-	5,43	27,2		
		116,5	174,7	203,8	0,310	18,57	4,91	0,79	0,28	-	5,98	32,2	
		500	400	300	0,193	11,60	2,84	1,44	1,00	-	5,29	45,6	
		600	400	200	0,192	11,54	2,38	1,30	1,05	-	4,73	40,9	
		200	400	600	0,244	14,66	5,05	1,20	0,56	-	6,81	46,5	
		400	500	600	0,189	11,32	3,65	1,50	0,88	-	6,04	53,3	
		500	500	600	0,176	10,60	3,15	1,62	0,95	-	5,72	54,1	
		700	700	700	0,148	8,90	2,62	1,54	1,13	-	5,30	59,5	
		900	700	600	0,142	8,49	2,12	1,54	1,27	-	4,93	58,1	
		1000	700	600	0,138	8,28	1,94	1,56	1,29	-	4,81	58,1	
		600	700	1000	0,150	8,97	3,04	1,62	0,91	-	5,57	62,1	
		1100	800	600	0,132	7,90	1,82	1,47	1,38	-	4,67	59,2	
		1100	900	600	0,129	7,73	1,85	1,36	1,43	-	4,65	60,1	
		1200	1000	600	0,124	7,43	1,74	1,28	1,50	-	4,52	60,8	
		1300	1100	700	0,116	6,94	1,67	1,27	1,47	-	4,42	63,6	
		1600	1500	1000	0,095	5,73	1,50	1,15	1,38	-	4,03	70,4	
		2100	1800	1200	0,082	4,91	1,217	1,07	1,33	-	3,62	73,8	
		$n = 4,$ $l = 2,5 \text{ km}$	$R_{O_1}, R_{O_2}, R_{O_3}, R_{O_4}, \Omega$	87,5	131,2	153,1	164,1	0,415	24,91	6,41	0,93	0,21	0,09
300	300			300	300	0,277	16,64	4,26	1,60	0,69	0,42	6,96	41,8
400	400			400	400	0,244	14,66	3,73	1,65	0,83	0,56	6,77	46,1
500	500			500	500	0,219	13,17	3,33	1,65	0,98	0,66	6,56	49,8
600	600			500	500	0,205	12,30	2,95	1,52	1,08	0,78	6,33	51,4
700	700			500	500	0,194	11,65	2,64	1,41	1,15	0,83	6,04	51,8
700	700			400	400	0,201	12,08	2,57	1,29	1,25	0,84	5,95	49,3
700	700			500	100	0,218	13,06	2,39	1,04	0,52	0,74	4,70	35,9
900	800			400	100	0,209	12,52	1,93	0,95	0,80	0,90	4,58	36,6
900	800			500	200	0,196	11,75	2,04	1,13	1,06	1,28	5,50	46,8
1000	800			400	200	0,196	11,74	1,84	1,09	0,74	0,72	4,39	37,4
900	800			700	600	0,172	10,31	2,25	1,47	0,83	0,74	5,29	51,3
1000	800			500	100	0,203	12,9	1,78	0,99	0,56	0,84	4,20	34,4
1000	600			100	50	0,233	13,99	1,57	0,86	0,81	0,21	3,45	24,7
1200	1000			400	100	0,197	11,83	1,52	0,82	0,72	0,82	3,88	32,8
1400	1200			400	100	0,191	11,47	1,34	0,71	0,75	0,86	3,66	31,9
1650	800			400	150	0,188	11,26	1,15	1,08	1,09	1,16	4,49	39,8
1700	1000			400	100	0,190	11,38	1,11	0,84	0,71	0,81	3,48	30,6
1800	1500			500	200	0,168	10,09	1,14	0,71	0,98	1,19	4,02	39,8
2000	1200			600	450	0,151	9,09	1,09	1,15	1,23	1,15	4,62	50,8
2100	1200			600	450	0,149	8,94	1,05	1,07	1,25	1,17	4,55	50,8
2100	1300			800	650	0,134	8,06	1,11	1,14	1,23	1,18	4,65	57,5
2100	1400			800	650	0,133	7,97	1,11	1,07	1,24	1,19	4,62	57,9
2100	1450			900	800	0,126	7,55	1,14	1,05	1,24	1,14	4,63	61,25
2300	1700	1300	1200	0,106	6,39	1,12	1,1	1,12	1,05	4,39	68,7		

Tablica 2. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do poszczególnych odbiorników przez tor macierzysty przy drabinkowej konfiguracji układu zdalnego zasilania

$U_{WE} = 60 \text{ V}; R_j = 70 \Omega$			I_{WE_T} [A]	P_{ZZ} [W]	P_{O_1} [W]	P_{O_2} [W]	P_{O_3} [W]	P_{O_4} [W]	P_U [W]	η [%]					
$n = 1,$ $l = 10 \text{ km}$	R_{O_1}, Ω	500	0,050	3,0	1,25	-	-	-	1,25	41,7					
		600	0,046	2,78	1,28	-	-	-	1,28	46,1					
		700	0,043	2,57	1,29	-	-	-	1,29	50,0					
		800	0,040	2,40	1,28	-	-	-	1,28	53,3					
		900	0,038	2,25	1,27	-	-	-	1,27	56,2					
		1000	0,035	2,12	1,25	-	-	-	1,25	58,8					
$n = 2,$ $l = 5 \text{ km}$	R_{O_1}, R_{O_2}, Ω	100	100	0,139	8,34	1,29	0,06	-	-	1,35	16,2				
		200	200	0,121	7,25	1,57	0,21	-	-	1,98	24,5				
		200	300	0,119	7,16	1,66	0,23	-	-	1,90	26,5				
		300	200	0,110	6,62	1,52	0,30	-	-	1,83	27,6				
		200	400	0,118	7,08	1,74	0,25	-	-	1,99	28,0				
		300	400	0,106	6,38	1,73	0,37	-	-	2,10	32,9				
		350	525	0,100	6,00	1,78	0,43	-	-	2,2	36,9				
		400	300	0,100	6,02	1,54	0,44	-	-	1,98	32,9				
		400	500	0,096	5,78	1,72	0,47	-	-	2,19	37,9				
		500	300	0,095	5,69	1,44	0,51	-	-	1,94	34,2				
		1000	200	0,085	5,12	0,91	0,603	-	-	1,52	29,7				
		1400	700	0,063	3,79	1,03	0,91	-	-	1,94	51,1				
		1600	800	0,059	3,52	0,97	0,94	-	-	1,91	54,2				
		$n = 3,$ $l = 3,33 \text{ km}$	$R_{O_1}, R_{O_2}, R_{O_3}, \Omega$	100	100	100	0,194	11,66	2,16	0,133	0,012	-	2,30	19,7	
233	349,5			407,7	0,155	9,28	2,45	0,40	0,14	-	2,99	32,2			
500	400			300	0,127	7,61	1,85	0,57	0,24	-	2,67	35,0			
600	400			200	0,124	7,43	1,64	0,55	0,24	-	2,43	32,7			
200	400			600	0,159	9,57	2,60	0,37	0,13	-	3,10	32,4			
400	500			600	0,129	7,76	2,23	0,58	0,25	-	3,06	39,4			
500	500			600	0,121	7,29	2,01	0,66	0,28	-	2,95	40,4			
700	700			700	0,106	6,36	1,77	0,71	0,40	-	2,88	45,3			
900	700			600	0,100	6,02	1,49	0,74	0,44	-	2,67	44,3			
1000	700			600	0,098	5,87	1,38	0,76	0,46	-	2,63	44,3			
600	700			1000	0,109	6,52	2,00	0,74	0,34	-	3,08	47,2			
1100	800			500	0,096	5,73	1,29	0,68	0,51	-	2,49	43,4			
1100	900			600	0,093	5,56	1,34	0,69	0,54	-	2,57	46,2			
1200	1000			600	0,09	5,37	1,27	0,67	0,58	-	2,52	46,9			
1300	1100			700	0,085	5,11	1,24	0,68	0,60	-	2,53	49,4			
1600	1500			1000	0,074	4,43	1,14	0,67	0,67	-	2,48	56,1			
2100	1800			1200	0,065	3,89	0,96	0,67	0,70	-	2,33	59,9			
$n = 4,$ $l = 2,5 \text{ km}$	$R_{O_1}, R_{O_2}, R_{O_3}, R_{O_4}, \Omega$			100	100	100	100	0,244	14,67	3,01	0,252	0,022	0,003	3,28	22,4
				175	262,5	306,2	328,1	0,208	12,45	3,20	0,46	0,11	0,043	3,81	30,6
		400	400	400	400	0,162	9,75	2,49	0,72	0,23	0,11	3,56	36,5		
		500	500	500	500	0,149	8,96	2,29	0,77	0,31	0,17	3,54	39,5		
		600	600	500	500	0,140	8,42	2,09	0,75	0,38	0,21	3,43	40,7		
		700	700	500	500	0,133	7,99	1,92	0,72	0,42	0,23	3,29	41,2		
		700	700	400	400	0,135	8,13	1,88	0,67	0,43	0,21	3,19	39,2		
		700	700	700	100	0,137	8,24	1,85	0,62	0,19	0,18	2,84	34,5		
		900	800	200	100	0,134	8,07	1,47	0,50	0,48	0,13	2,59	32,1		
		900	800	500	200	0,128	7,67	1,57	0,64	0,41	0,29	2,92	38,0		
		1000	800	400	200	0,126	7,59	1,43	0,62	0,26	0,151	2,47	32,6		
		900	800	700	600	0,121	7,26	1,67	0,79	0,30	0,21	2,98	41,0		
		1000	800	600	400	0,121	7,27	1,50	0,74	0,39	0,28	2,92	40,1		
		1000	600	100	50	0,138	8,30	1,28	0,53	0,25	0,025	2,09	25,1		
		1200	1000	400	200	0,12	7,21	1,26	0,56	0,38	0,22	2,43	33,6		
		1800	900	300	100	0,118	7,07	0,86	0,56	0,44	0,17	2,04	28,9		
		1650	800	400	150	0,118	7,06	0,94	0,66	0,34	0,19	2,14	30,2		
		1700	1000	400	100	0,116	6,97	0,92	0,55	0,30	0,16	1,94	27,8		
		1800	1500	500	200	0,108	6,47	0,94	0,46	0,42	0,29	2,11	32,6		
		2000	1100	600	450	0,103	6,19	0,88	0,69	0,51	0,35	2,43	39,2		
		2100	1200	600	450	0,102	6,09	0,85	0,65	0,53	0,36	2,39	39,2		
		2100	1300	800	650	0,096	5,74	0,89	0,70	0,44	0,33	3,37	41,2		
		2100	1400	800	650	0,095	5,69	0,89	0,66	0,56	0,43	2,55	44,9		
		2100	1500	900	800	0,091	5,48	0,92	0,67	0,57	0,43	2,59	47,2		
		2300	1700	1300	1200	0,082	4,90	0,91	0,71	0,58	0,48	2,69	54,9		

Tablica 3. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do poszczególnych odbiorników przez tor pochodny przy ich szeregowym włączeniu w obwód zdalnego zasilania

$U_{WE} = 60 \text{ V}; R_j = 35 \Omega; l = 10 \text{ km}$			I_{WE_T} A	P_{ZZ} W	P_{O_1} W	P_{O_2} W	P_{O_3} W	P_{O_4} W	P_U [W]	η [%]
n = 1	R_O, Ω	$U_Z = 12 \text{ V}$	85	0,137	8,23	1,57	-	-	1,57	19,1
			110	0,137	8,23	1,19	-	-	1,19	14,5
			135	0,137	8,23	0,95	-	-	0,95	11,5
		$U_Z = 24 \text{ V}$	220	0,103	6,17	2,38	-	-	2,38	38,6
			300	0,103	6,17	1,69	-	-	1,69	27,3
			380	0,103	6,17	1,28	-	-	1,28	20,8
			335	0,086	5,14	1,48	-	-	1,48	28,9
			400	0,086	5,14	1,21	-	-	1,21	23,5
			465	0,086	5,14	1,01	-	-	1,01	19,6
n = 2	$R_{O_1} = R_{O_2}, \Omega$	$U_Z = 12 \text{ V}$	111	0,103	6,17	1,18	1,18	-	2,36	38,2
			120	0,103	6,17	1,08	1,08	-	2,18	35,1
			138	0,103	6,17	0,93	0,93	-	1,86	30,0
		$U_Z = 24 \text{ V}$	610	0,034	2,06	0,72	0,72	-	1,44	69,9
			640	0,034	2,06	0,67	0,67	-	1,34	65,7
			670	0,034	2,06	0,64	0,64	-	1,28	61,8
n = 3	$R_{O_1} = R_{O_2} = R_{O_3}, \Omega$	$U_Z = 12 \text{ V}$	165	0,069	4,11	0,75	0,75	0,75	2,25	54,7
			200	0,069	4,11	0,60	0,60	0,60	1,80	43,7
			235	0,069	4,11	0,50	0,50	0,50	1,50	36,4
		$U_Z = 15 \text{ V}$	285	0,043	2,57	0,52	0,52	0,52	1,56	60,7
			305	0,043	2,57	0,47	0,47	0,47	1,41	54,8
			325	0,043	2,57	0,42	0,42	0,42	1,26	49,0
n = 4	$R_{O_1} = R_{O_2} = R_{O_3} = R_{O_4}, \Omega$	$U_Z = 10 \text{ V}$	160	0,057	3,43	0,53	0,53	0,53	2,12	61,8
			200	0,057	3,43	0,40	0,40	0,40	1,60	46,6
			240	0,057	3,43	0,32	0,32	0,32	1,28	37,3
		$U_Z = 12 \text{ V}$	310	0,034	2,06	0,35	0,35	0,35	1,40	67,9
			350	0,034	2,06	0,30	0,30	0,30	1,20	58,2
			390	0,034	2,06	0,26	0,26	0,26	1,04	50,4

Tablica 4. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do poszczególnych odbiorników przez tor macierzysty przy ich szeregowym włączeniu w obwód zdalnego zasilania

$U_{WE} = 60V; R_j = 70 \Omega; l = 10 \text{ km}$			I_{WE_T} A	P_{ZZ} W	P_{O_1} W	P_{O_2} W	P_{O_3} W	P_{O_4} W	P_U W	η %	
$n = 1$	R_0, Ω	$U_Z = 12 \text{ V}$	162	0,069	4,11	0,77	-	-	-	0,77	18,7
			198	0,069	4,11	0,61	-	-	-	0,61	14,8
			234	0,069	4,11	0,50	-	-	-	0,50	12,1
		$U_Z = 24 \text{ V}$	425	0,051	3,09	1,13	-	-	-	1,13	36,5
			450	0,051	3,09	1,05	-	-	-	1,05	33,9
			475	0,051	3,09	0,98	-	-	-	0,98	31,7
			620	0,043	2,57	0,70	-	-	-	0,70	27,2
			640	0,043	2,57	0,68	-	-	-	0,68	26,4
			660	0,043	2,57	0,65	-	-	-	0,65	25,2
$n = 2$	$R_{O_1} = R_{O_2}, \Omega$	$U_Z = 12 \text{ V}$	215	0,051	3,09	0,55	0,55	-	-	1,10	35,6
			230	0,051	3,09	0,51	0,51	-	-	1,02	33,0
			245	0,051	3,09	0,47	0,47	-	-	0,94	30,4
		$U_Z = 24 \text{ V}$	1070	0,017	1,03	0,33	0,33	-	-	0,66	64,1
			1090	0,017	1,03	0,32	0,32	-	-	0,64	62,1
			1110	0,017	1,03	0,31	0,31	-	-	0,62	60,2
$n = 3$	$R_{O_1} = R_{O_2} = R_{O_3}, \Omega$	$U_Z = 12 \text{ V}$	304	0,034	2,06	0,36	0,36	0,36	-	1,08	52,4
			320	0,034	2,06	0,34	0,34	0,34	-	1,01	49,0
			336	0,034	2,06	0,32	0,32	0,32	-	0,86	41,7
		$U_Z = 15 \text{ V}$	570	0,021	1,29	0,26	0,26	0,26	-	0,78	60,4
			590	0,021	1,29	0,25	0,25	0,25	-	0,75	58,1
			610	0,021	1,29	0,23	0,23	0,23	-	0,69	53,5
$n = 4$	$R_{O_1} = R_{O_2} = R_{O_3} = R_{O_4}, \Omega$	$U_Z = 10 \text{ V}$	290	0,029	1,71	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00	58,5
			310	0,029	1,71	0,23	0,23	0,23	0,23	0,92	53,8
			330	0,029	1,71	0,21	0,21	0,21	0,21	0,84	49,1
		$U_Z = 12 \text{ V}$	535	0,017	1,03	0,17	0,17	0,17	0,17	0,68	66,0
			550	0,017	1,03	0,16	0,16	0,16	0,16	0,64	62,1
			565	0,017	1,03	0,15	0,15	0,15	0,15	0,60	58,2

$$P_{T_i} = \frac{U_{WE_i}^2 R_j l_i}{(R_j l_i + R_S + R_{K_i})^2} \quad (8)$$

gdzie:

U_{WE_i} – wartość napięcia na wejściu i -tego odcinka obwodu zdalnego zasilania,

R_{K_i} – rezystancja wejściowa i -tego konwertera napięcia,

R_j – rezystancja jednostkowa toru naturalnego lub pochodnego,

l_i – długość odcinka obwodu zdalnego zasilania,

R_S – rezystancja urządzeń stacyjnych (transformatory liniowe, filtry przeciwzakłóceń itp.).

W warunkach rzeczywistych przy zasilaniu prądem stałym $R_j l_i \gg R_S$, zatem w celu uproszczenia analizy, rezystancję R_S można pominąć. W celu zapewnienia optymalnych warunków odbioru energii z linii celowa jest praca w stanie dopasowania rezystancji wejściowych, tj. $R_j l_i = R_{K_i}$. Z uwzględnieniem powyższego można zapisać

$$P_{T_i} = \frac{U_{WE_i}^2}{4R_j l_i} = \frac{U_{WE_i}^2}{4R_{T_i}} \quad (9)$$

Moc P_{K_i} zależy od technologii i sposobu realizacji technicznej konwertera napięcia, tzn. od jego sprawności δ

$$P_{K_i} = P_{T_i} (1 - \delta) \quad (10)$$

Przy stosowaniu konwerterów wartości napięcia jednego typu i przy ich równomiernym rozmieszczeniu $l_i = l/(n+1)$, $U_{WE_i} = U_{WE}$, $R_{T_i} = R_j l/(n+1)$.

W stanie dopasowania prąd wejściowy obwodu zdalnego zasilania jest równy

$$I_{WE_T} = I_{WE_i} = \frac{U_{WE}}{R_{T_i} + R_{K_i}} = \frac{U_{WE}}{R_j \frac{l}{n+1} + R_j \frac{l}{n+1}} = \frac{U_{WE} (n+1)}{2R_j l} \quad (11)$$

gdzie R_{K_i} to impedancja wejściowa pierwszego przelotowego konwertera napięcia.

Moc odbierana od źródła zdalnego zasilania jest równa

$$P_{ZZ} = I_{WE_T} U_{we} = \frac{U_{WE}^2 (n+1)}{2R_j l} \quad (12)$$

Moc pobierana z toru przez pierwszy konwerter napięcia jest równa

$$P_{1K_{WE}} = \frac{U_{WE}^2(n+1)}{4R_j l} \quad (13)$$

Moc na zaciskach wyjściowych pierwszego konwertera napięcia jest równa

$$P_{1K_{WY}} = \frac{U_{WE}^2(n+1)\delta}{4R_j l} \quad (14)$$

Przy tym maksymalna wartość prądu w obwodzie wyjściowym pierwszego konwertera napięcia (na wejściu drugiego odcinka toru) wynosi

$$I_{WE_2} = \frac{P_{1K_{WY}}}{U_{WE}} = \frac{U_{WE}(n+1)\delta}{4R_j l} \quad (15)$$

W celu zapewnienia takiej wartości prądu, przy ograniczonej mocy pierwszego konwertera, impedancja wejściowa odbiornika energii elektrycznej R_O (przy wykorzystaniu jednego przelotowego konwertera napięcia) lub impedancja wejściowa następnego (drugiego) konwertera napięcia R_{K_2} określana jest równaniami

$$I_{WE_2} = \frac{U_{WE}}{R_j \frac{l}{n+1} + R_O} \quad \text{lub} \quad I_{WE_2} = \frac{U_{WE}}{R_j \frac{l}{n+1} + R_{K_2}} \quad (16)$$

lub gdy uwzględni się wzór (15)

$$R_O = R_{K_2} = \frac{R_j l (n+1) \delta}{4(n+1) \delta} \quad (17)$$

Moc pobierana z toru przez odbiornik energii P_O lub drugi konwerter napięcia $P_{2K_{WE}}$ jest równa

$$P_O = I_{WE_2}^2 \cdot R_O \quad \text{lub} \quad P_{2K_{WE}} = I_{WE_2}^2 \cdot R_{K_2} \quad (18)$$

W analogiczny sposób określa się moc pobieraną z toru przez następne konwertery napięcia (przy $n > 1$), a zatem przez odbiornik końcowy.

W tabelicy 5 zostały przedstawione wyniki obliczeń wartości użytecznej mocy elektrycznej P_O dostarczonej do odbiornika ulokowanego na odległości $l = 10$ km i sprawności energetycznej η , przy różnej sprawności konwerterów napięcia δ oraz różnej liczbie tych konwerterów n .

Tablica 5. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do jednego odbiornika przez tor pochodny i macierzysty z wykorzystaniem przelotowych konwerterów napięcia

$U_{WE} = 60V; l = 10 \text{ km}$			I_{WE_T} A	P_{ZZ} W	P_O W	P_U W	η %	
$R_j = 35\Omega$	$n = 1$	δ	0,95	0,171	10,28	3,72	3,72	36,2
			0,90	0,171	10,28	3,59	3,59	34,9
			0,85	0,171	10,28	3,44	3,44	33,5
			0,80	0,171	10,28	3,29	3,29	32,0
	$n = 2$	δ	0,95	0,257	15,43	4,39	4,39	28,4
			0,90	0,257	15,43	4,08	4,08	26,4
			0,85	0,257	15,43	3,76	3,76	24,4
			0,80	0,257	15,43	3,44	3,44	22,3
	$n = 3$	δ	0,95	0,343	20,57	4,81	4,81	23,4
			0,90	0,343	20,57	4,32	4,32	21,0
			0,85	0,343	20,57	3,82	3,82	18,6
			0,80	0,343	20,57	3,35	3,35	16,3
$R_j = 70\Omega$	$n = 1$	δ	0,95	0,086	5,143	1,86	1,86	36,2
			0,90	0,086	5,143	1,79	1,79	34,9
			0,85	0,086	5,143	1,72	1,72	33,5
			0,80	0,086	5,143	1,65	1,65	32,0
	$n = 2$	δ	0,95	0,129	7,714	2,20	2,20	28,5
			0,90	0,129	7,714	2,02	2,02	26,5
			0,85	0,129	7,714	1,88	1,88	24,4
			0,80	0,129	7,714	1,72	1,72	23,3
	$n = 3$	δ	0,95	0,171	10,29	2,41	2,41	23,4
			0,90	0,171	10,29	2,16	2,16	30,0
			0,85	0,171	10,29	1,91	1,91	18,6
			0,80	0,171	10,29	1,76	1,76	16,3

Z powyższego wynika, że sprawność przesyłania energii elektrycznej w obwodzie zdalnego zasilania maleje ze wzrostem liczby stosowanych konwerterów napięcia. Jednak przy zdalnym zasilaniu górniczych urządzeń telekomunikacyjnych, z uwzględnieniem wymagań iskrobezpieczeństwa oraz ograniczeń w stosunku do maksymalnej wartości napięcia zasilania U_{WE} , decydującym wskaźnikiem jest maksymalna wartość mocy dostarczonej do odbiornika. W takim przypadku przy stosowaniu konwerterów napięcia, w porównaniu z wariantami zasilania bez tych konwerterów (układ drabinkowy i szeregowy), można osiągnąć kilkakrotnie wyższą wartość mocy elektrycznej dostarczonej na odległość l przy porównywalnych wartościach prądu na wejściu obwodu zdalnego zasilania.

Należy zauważyć, że systemy automatyki i telekomunikacji górniczej z reguły mają strukturę rozłożoną w terenie. W związku z tym, system zdalnego, iskrobezpiecznego zasilania powinien być dopasowany do tej struktury i zapewniać możliwość odbioru energii elektrycznej w punktach przelotowych. W takim przypadku bilans mocy elektrycznej w obwodzie zdalnego zasilania z n konwerterami napięcia i m lokalnymi odbiornikami energii elektrycznej można zapisać w postaci

$$P_{ZZ} = \sum_{i=1}^{n+1} P_{T_i} + \sum_{i=1}^n P_{K_i} + \sum_{i=1}^m P_{O_i} \quad (19)$$

W celu uproszczenia analizy, można założyć, że lokalne odbiorniki energii elektrycznej są jednego typu i rozmieszczone wspólnie z przelotowymi konwerterami napięcia ($n = m$). W przypadku stosowania typowych konwerterów napięcia, moc pobierana od centralnego źródła określa się za pomocą wzoru (4.12), a moc pobierana przez pierwszy konwerter napięcia określa się wzorem (4.13). Moc oddawana przez i -ty przelotowy konwerter napięcia $P_{K_{wy_i}}$ do następnego odcinka toru jest pomniejszona o wartość mocy wydzielanej do zasilania lokalnego odbiornika energii elektrycznej, tzn.

$$P_{K_{wy_i}} = P_{K_{we_i}} \delta - P_{O_i} \quad (20)$$

Oznaczmy przez θ współczynnik podziału dysponowanej elektrycznej mocy w i -tym przelotowym konwerterze napięcia. Wtedy część mocy wydzielanej dla i -tego lokalnego odbiornika $P_{O_i} = P_{K_{wy_i}} \theta$, a moc doprowadzana do następnego odcinka toru jest równa

$$P_{K_{wy_i}} = P_{K_{we_i}} \delta (1 - \theta) \quad (21)$$

W tablicach 4–6 zostały przedstawione wyniki obliczeń wartości użytecznej mocy dostarczonej do czterech odbiorników energii elektrycznej ulokowanych równomiernie ($l_i = l/4 = 2,5$ km), przy różnej sprawności konwerterów napięcia δ oraz przy różnych współczynnikach podziału mocy θ .

Realizacja sposobu z wykorzystaniem odrębnych kanałów przesyłania iskrobezpiecznej energii elektrycznej może być oparta na podziale częstotliwościowym lub czasowym. Rozpatrzono typowy przypadek, kiedy jednotypowych n odbiorników energii elektrycznej jest ulokowanych równomiernie wzdłuż linii przesyłowej. Każdy z odbiorników pobiera moc P_{O_i} ($i = 1, 2, \dots, n$) i jest zasilany przez odrębny kanał częstotliwościowy (rys. 2c).

Bilans mocy elektrycznej w obwodzie zdalnego zasilania jest równy

$$P_{ZZ} = P_{ZZ_1} + P_{ZZ_2} + \dots + P_{ZZ_n} \quad (22)$$

gdzie P_{ZZ_i} jest mocą elektryczną przesyłaną przez i -ty kanał przesyłania energii elektrycznej.

Przy podziale częstotliwościowym każdy z kanałów przesyłania energii elektrycznej można zastąpić odcinkiem toru o długości l_i , który ma impedancję falową Z_{C_i} i tłumienność jednostkową α_i .

Napięcie i prąd na wyjściu i wejściu i -tego kanału związane są układem równań [3]:

$$U_{we_i} = U_{wy_i} \operatorname{ch} \alpha_i l_i + I_{wy_i} Z_{C_i} \operatorname{sh} \alpha_i l_i \quad (13)$$

Tablica 4.6. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do czterech odbiorników przez tor pochodny i macierzysty z wykorzystaniem przelotowych konwerterów napięcia

$U_{WE} = 60V; l = 10 \text{ km}$ $n = m = 4$			I_{WE_T} A	P_{ZZ} W	P_{O_1} W	P_{O_2} W	P_{O_3} W	P_{O_4} W	P_U W	η %	
$R_j = 70\Omega$	$\theta = 0,75$	δ	0,95	0,171	10,29	3,66	0,82	0,82	0,256	5,56	54,0
			0,90	0,171	10,29	3,47	0,74	0,74	0,218	5,16	50,2
			0,85	0,171	10,29	3,28	0,66	0,66	0,18	4,78	46,5
			0,80	0,171	10,29	3,09	0,59	0,59	0,16	4,43	43,0
	$\theta = 0,50$	δ	0,95	0,171	10,29	2,44	1,02	1,02	0,92	5,41	52,6
			0,90	0,171	10,29	2,31	0,92	0,92	0,79	4,94	48,0
			0,85	0,171	10,29	2,19	0,83	0,83	0,68	4,52	44,0
			0,80	0,171	10,29	2,06	0,74	0,74	0,57	4,11	39,9
	$\theta = 0,25$	δ	0,95	0,171	10,29	1,22	0,72	0,72	1,83	4,49	43,5
			0,90	0,171	10,29	1,16	0,65	0,65	1,59	4,05	39,3
			0,85	0,171	10,29	1,09	0,59	0,59	1,37	3,64	35,3
			0,80	0,171	10,29	1,03	0,53	0,53	1,16	3,25	31,6
$R_j = 35\Omega$	$\theta = 0,75$	δ	0,95	0,343	20,57	7,33	1,64	1,64	0,51	11,12	54,0
			0,90	0,343	20,57	6,94	1,47	1,47	0,44	10,32	50,0
			0,85	0,343	20,57	6,56	1,32	1,32	0,37	9,57	46,5
			0,80	0,343	20,57	6,17	1,17	1,17	0,31	8,82	42,9
	$\theta = 0,50$	δ	0,95	0,343	20,57	4,89	2,04	2,04	1,85	10,82	52,6
			0,90	0,343	20,57	4,63	1,85	1,85	1,59	9,92	48,2
			0,85	0,343	20,57	4,37	1,66	1,66	1,35	9,01	43,8
			0,80	0,343	20,57	4,11	1,48	1,48	1,14	8,21	39,9
	$\theta = 0,25$	δ	0,95	0,343	20,57	2,44	1,43	1,43	3,65	8,95	43,5
			0,90	0,343	20,57	2,31	1,30	1,30	3,17	8,08	39,3
			0,85	0,343	20,57	2,19	1,17	1,17	2,73	7,26	35,3
			0,80	0,343	20,57	2,06	1,05	1,05	2,32	6,48	31,5

$$I_{we_i} = -\frac{1}{Z_{C_i}} U_{wy_i} \text{sh}\alpha_i l_i + I_{wy_i} \text{ch}\alpha_i l_i \quad (24)$$

przy czym tłumienność jednostkowa a_i dla częstotliwości ω_i jest równa

$$\alpha(\omega_i) = \sqrt{0,5 \left[\sqrt{(G_j^2 + \omega_i^2 L_j^2)(G_j^2 + \omega_i^2 C_j^2)} + (G - \omega_i^2 L_j C_j) \right]} \quad (25)$$

a impedancja wejściowa kanału przesyłania Z_{C_i} jest równa

$$Z_{C_i} = \sqrt{\frac{R_j + j\omega_i L_j}{G_i + j\omega_i C_j}} \quad (26)$$

W celu uproszczenia dalszych rozważań w wyrażeniach (25) i (26) można pominąć G_j . W rzeczywistości, rezystancja izolacji wynosi dziesiątki $M\Omega$, co uzasadnia przyjęcie takiego założenia, przy tym $G_j \approx 0$, wtedy tłumienność jednostkowa a_i i moduł impedancji wejściowej toru dla częstotliwości ω_i określa się wzorami

$$\alpha(\omega_i) = \sqrt{0,5 \left[\sqrt{(R_j^2 + \omega_i^2 L_j^2) \omega_i^2 C_j^2} + -\omega_i^2 L_j C_j \right]} \quad (27)$$

$$|Z_{C_i}| = \sqrt{\frac{R_j^2 + \omega_i^2 L_j^2}{\omega_i^2 C_j^2}} \quad (28)$$

Ponieważ $I_{wy_i} = U_{wy_i} / Z_{O_i}$ (Z_{O_i} – impedancja wejściowa i -tego odbiornika energii elektrycznej), to w stanie dopasowania impedancji wejściowych

$$U_{wy_i} = U_{we_i} e^{-a_i l_i} \quad (29)$$

$$I_{wy_i} = I_{we_i} e^{-a_i l_i} \quad (30)$$

Moc użyteczna pobierana przez i -ty odbiornik jest równa

$$P_{O_i} = P_{Z_{Z_i}} e^{-2a_i l_i} \quad (21)$$

Dla zapewnienia minimalnej wartości α_i dla i -tego kanału przesyłania energii elektrycznej prądem przemiennym celowym jest utworzenie takiego kanału w zakresie niskich częstotliwości.

W tabelicy 7 przedstawiono wyniki obliczeń parametrów przesyłania energii elektrycznej za pomocą odrębnych kanałów prądu przemiennego (rys. 2d) przy pobudzeniu każdego kanału siłą elektromotoryczną $e_i(t) = E_{\max} \sin 2\pi f_i t$ ($E_{\max} = 25V$ – wartość bezpieczna pod względem porażeniowym) z wykorzystaniem toru pochodnego ($R_j = 35\Omega$; $C_j = 80 \cdot 10^{-9} F$; $L_j = 0,35 \cdot 10^{-3} H$) i toru macierzystego ($R_j = 70\Omega$; $C_j = 50 \cdot 10^{-9} F$; $L_j = 0,7 \cdot 10^{-3} H$) typowego górniczego kabla telekomunikacyjnego.

W nawiązaniu do aktualnych wymagań w stosunku do ochrony porażeniowej instalacji elektrycznych w obiektach budowlanych [2], według których wartość napięcia bezpiecznego prądu nietętniącego (stałego) wynosi $U_{DC_{bez}} = 60 V$, a bezpieczna wartość skuteczna prądu przemiennego wynosi $U_{AC_{bez}} = 25V$, można, na podstawie wyników przedstawionych w tabelicy 7, stwierdzić, że sposób zdalnego zasilania z wykorzystaniem odrębnych kanałów o podziale częstotliwościowym nie jest konkurencyjny pod względem wartości mocy dostarczonej do odległych odbiorników energii elektrycznej, w stosunku do wyżej analizowanych sposobów zdalnego zasilania prądem stałym. Powstaje również problem zapewnienia separacji galwanicznej między tymi kanałami oraz iskrobezpieczeństwa w stanie uszkodzenia, tzn. przy powstaniu awaryjnego szeregowego połączenia między źródłami zasilania odrębnych kanałów.

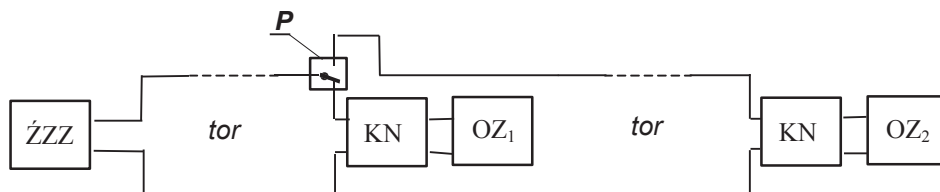
Bardziej obiecującym, pod względem realizacji technicznej, wydaje się sposób organizacji kanałów przesyłania iskrobezpiecznej energii elektrycznej oparty na podziale czasowym.

Tablica 7. Wartości użytecznej mocy elektrycznej dostarczonej do odbiorników przez tor pochodny i macierzysty z wykorzystaniem kanałów prądu przemiennego

$e(t) = 25\sin 2\pi ft$ $L = 10 \text{ km}$				P_{ZZ} W	P_{O_1} W	P_{O_2} W	P_{O_3} W	P_{O_4} W	P_U W	η %	
$R_j = 70 \Omega;$ $C_j = 50 \text{ nF};$ $L_j = 0,7 \text{ mH};$	$l_1 = 10 \text{ km}$ $l_2 = 10 \text{ km}$	f Hz	100	0,82	0,25	-	-	-	0,45	54,8	
			200		-	0,20	-	-			
	$l_1 = 5 \text{ km}$ $l_2 = 10 \text{ km}$	f Hz	100	1,28	0,42	-	-	-	0,62	48,4	
			200		-	0,20	-	-			
	$l_1 = 2,5 \text{ km}$ $l_2 = 5,0 \text{ km}$ $l_3 = 7,5 \text{ km}$ $l_4 = 10 \text{ km}$	f Hz	100	3,69	0,84	-	-	-	1,68	45,5	
			200		-	0,38	-	-			
			300		-	-	0,28	-			
			400		-	-	-	0,18			
	$R_j = 35 \Omega;$ $C_j = 80 \text{ nF};$ $L_j = 0,35 \text{ mH};$	$l_1 = 10 \text{ km}$ $l_2 = 10 \text{ km}$	f Hz	100	1,66	0,45	-	-	-	0,87	52,4
				200		-	0,42	-	-		
		$l_1 = 5 \text{ km}$ $l_2 = 10 \text{ km}$	f Hz	100	2,84	0,86	-	-	-	1,28	45,1
				200		-	0,42	-	-		
$l_1 = 2,5 \text{ km}$ $l_2 = 5,0 \text{ km}$ $l_3 = 7,5 \text{ km}$ $l_4 = 10 \text{ km}$		f Hz	100	7,98	1,7	-	-	-	3,44	43,1	
			200		-	0,78	-	-			
			300		-	-	0,58	-			
			400		-	-	-	0,38			

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowo schemat blokowy zdalnego zasilania dwóch odbiorników za pomocą jednego macierzystego toru transmisyjnego z wykorzystaniem podziału czasowego. Przy $U_{WE} = 60 \text{ VDC}$ użyteczna moc pobierana przez pierwszy odbiornik zasilania (ulożony na odległość $l_1 = 5 \text{ km}$) wynosi $P_{O_1} = 2,57 \text{ W}$, a przez drugi odbiornik zasilania (ulożony na odległość $l_2 = 10 \text{ km}$) wynosi $1,29 \text{ W}$.

Należy zauważyć, że realizacja techniczna sposobu przesyłania energii elektrycznej, z wykorzystaniem czasowego podziału, wymaga dodatkowego stosowania magazynów energii elektrycznej (np. baterii akumulatorów) oraz uwzględnienia problemów kompatybilności elektromagnetycznej, związanej z przełączaniem zasilania, z systemami transmisyjnymi wykorzystującymi sąsiednie tory w jednym wieloparowym kablu telekomunikacyjnym.



Rys. 3. Schemat blokowy zdalnego zasilania dwóch odbiorników z czasowym podziałem kanałów przesyłania energii elektrycznej: ZZZ – źródło zdalnego zasilania, OZ – odbiornik zasilania, P – przełącznik, KN – konwerter napięcia

Fig. 3. Block diagram for remote power supplying of two receivers with temporal division of electrical energy transmission channels, ZZZ – remote power supply source, OZ – power supply receiver, P – switch, KN – voltage converter

3. PODSUMOWANIE

Wartość mocy elektrycznej, którą można przesyłać na odległość do kopalnianych urządzeń telekomunikacyjnych, jest ograniczona wymaganiami iskrobezpieczeństwa oraz warunkami prowadzenia robót pod napięciem, przy czym czynnikiem dominującym w takim przypadku jest wartość mocy użytecznej dostarczonej do tych urządzeń.

Sprawność przesyłania energii elektrycznej w obwodzie zdalnego zasilania maleje ze wzrostem liczby stosowanych konwerterów napięcia. Przy zdalnym zasilaniu górniczych urządzeń telekomunikacyjnych, z uwzględnieniem wymagań iskrobezpieczeństwa oraz ograniczeń w stosunku do maksymalnej wartości napięcia zasilania U_{WE} , decydującym wskaźnikiem jest jednak maksymalna wartość mocy dostarczonej do odbiorników energii elektrycznej. W takim przypadku przy stosowaniu konwerterów napięcia, w porównaniu z wariantami zasilania bez tych konwerterów (układ drabinkowy i szeregowy), można osiągnąć kilkakrotnie wyższą wartość mocy elektrycznej dostarczonej na odległość l przy porównywalnych wartościach prądu na wejściu obwodu zdalnego zasilania.

Stosowanie odrębnych kanałów przesyłania energii do poszczególnych odbiorników zdalnego zasilania pozwala na dostarczenie nieco większej mocy użytecznej w porównaniu ze sposobem konwencjonalnym. Jednak realizacja techniczna odrębnych kanałów zarówno o podziale częstotliwościowym, jak i o podziale czasowym jest bardziej skomplikowana i związana z istotnymi problemami zapewnienia iskrobezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej.

Najbardziej korzystny pod względem realizacji technicznej, jest sposób zdalnego zasilania, polegający na stosowaniu przelotowych konwerterów napięcia. Pozwala on w sposób dogodniejszy zapewnić iskrobezpieczeństwo obwodu zdalnego zasilania drogą podziału tego obwodu na iskrobezpieczne izolowane między sobą galwaniczne odcinki.

Literatura

1. *Skoropacki W.*: Problemy zwielokrotnienia torów naturalnych kopalnianej sieci telekomunikacyjnej. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 1999 Nr 837.
2. PN-IEC 60364-4-41. Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona porażeniowa.
3. *Nowicki W.*: Podstawy teletransmisji. Warszawa, Wydaw. Komunikacji i Łączności 1971.

Recenzent: dr inż. Stanisław Trzcionka