

Stanisław Frączek

ZNIEKSZTAŁCENIA IMPULSÓW STRZAŁOWYCH W SIECIACH CENTRALNEGO STRZELANIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę jakości i wielkości zniekształceń impulsów strzałowych występujących w długich liniach sieci centralnego strzelania. Wyniki badań potwierdzają słuszność stosowania uproszczonych wzorów do obliczania obwodów strzałowych w sieciach centralnego strzelania.

1. Wstęp

W kopalniach silnie gazowych przy drażeniu szybów przekopów głównych i przekopów udostępniających nowe pokłady, w polskim górnictwie węglowym i solnym, stosowane jest powszechnie tzw. centralne strzelanie.

Centralne strzelanie polega na odpalaniu ładunków materiałów wybuchowych z tzw. stanowiska centralnego strzelania umieszczonego na powierzchni.

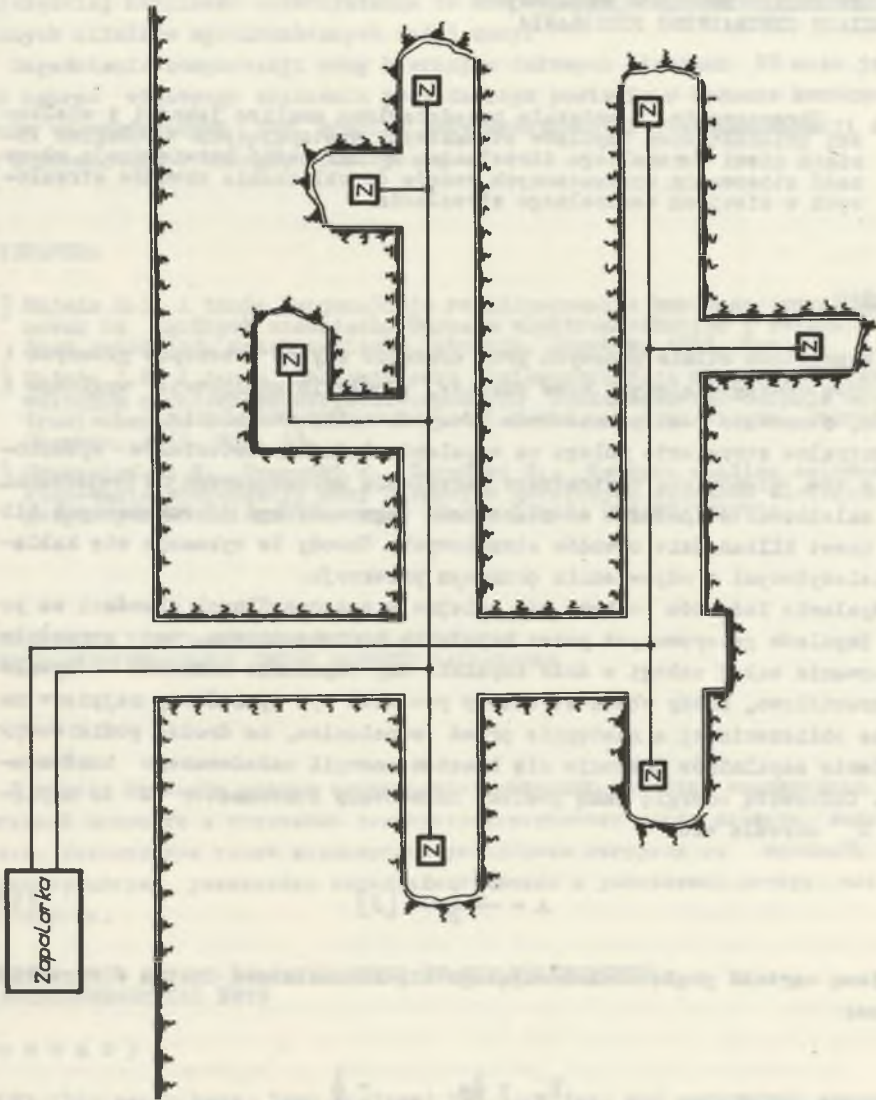
W zależności od potrzeb do stanowiska tego może być doprowadzonych kilka a nawet kilkanaście obwodów strzałowych. Obwody te wykonuje się kablami wielożyłowymi o odpowiednio dobranym przekroju.

Odpalanie ładunków odbywa się kolejno w poszczególnych obwodach za pomocą impulsów generowanych przez zapalarkę kondensatorową, po uprzednim ewakuowaniu całej załogi z dołu kopalni. Aby odpalanie ładunków odbywało się prawidłowo, każdy obwód strzałowy powinien być sprawdzony najpierw na drodze obliczeniowej a następnie przed odpalaniem, na drodze pomiarowej. Odpalanie zapalników dokonuje się kosztem energii naładowanego kondensatora. Całkowitą energią jaką posiada naładowany kondensator C do napięcia U_0 określa wzór

$$A = \frac{U_0^2 \cdot C}{2} \quad [\text{J}] \quad (1)$$

Chwilową wartość prądu rozładowującego się kondensatora można określić wzorem:

$$i = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat sieci centralnego strzelania

Celem określenia zdolności zapalnej zapalnika elektrycznego mostkowego wygodniej jest posługiwać się pojęciem tzw. impulsu zapłonu, który określamy wyrażeniem

$$K_z = \frac{A_z}{R} \left[A^2 s \right] \quad (3)$$

gdzie:

- A_z - energia użyta na odpalanie zapalnika,
 R - całkowita oporność obwodu strzałowego.

Na podstawie badań przeprowadzonych w kopalni doświadczalnej Barbara ustalono wymagania, które należy spełnić, aby odpalanie zapalników elektrycznych za pomocą zapalarek kondensatorowych było pewne.

1) Zapalarka kondensatorowa powinna dostarczyć każdemu zapalnikowi impuls prądu o wartości co najmniej $4 \left[m A^2 s \right]$.

2) Natężenie prądu na końcu impulsu strzałowego nie powinno być mniejsze od wartości $1 \left[A \right]$.

Wychodząc z założenia, że obwód strzałowy składa się tylko z parametrów RC (rys. 1) wówczas impuls strzałowy, pochodzący z rozładowania kondensatora zapalarki można określić wzorem:

$$K = \int_0^{t_1} I_0^2 e^{-\frac{2t}{T}} dt = \frac{I_0^2 T}{2} \left(1 - e^{-\frac{2t_1}{T}} \right) \quad (4)$$

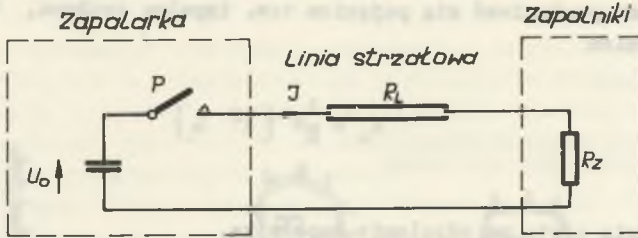
Wychodząc ze wzoru (4), możemy określić natężenie prądu J_0 , jakie powinno płynąć przez zapalniki w momencie włączenia naładowanego kondensatora zapalarki do napięcia U_0 , tak aby zapalniki otrzymały wymagany impuls K oraz aby wartość prądu na końcu impulsu nie była niższa od $1 \left[A \right]$.

Początkową wartość prądu tego impulsu strzałowego określono ze wzoru:

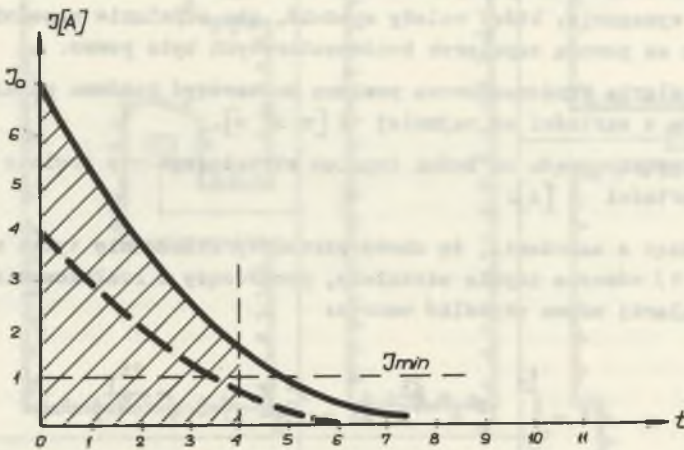
$$J_0 \geq \sqrt{\frac{2K}{RC} + 1} \quad (5)$$

Wzór ten jest obecnie stosowany dla wykonywania obliczeń sprawdzających obwodów strzałowych.

Teoretyczny przebieg impulsu strzałowego będący obrazem rozładowania kondensatora przez oporność czynną ilustruje rysunek 3.



Rys. 2. Schemat obwodu strzałowego



Rys. 3. Przebieg impulsu strzałowego bez zniekształceń

Stosując ten wzór do obliczeń robi się szereg założeń upraszczających, jak np. że wszystkie zapalniki mają jednorodne charakterystyki elektryczne i fizyczne oraz że obwody strzałowe mają tylko jeden parametr, to jest oporność czynną R .

Przy obliczeniach sprawdzających sieci centralnego strzelania, powstawały wątpliwości, czy wystarczające jest uwzględnienie w obliczeniach obwodów strzałowych tylko jednego parametru linii a mianowicie tylko oporności czynnej R . Pod względem elektrycznym linie elektryczne posiadają jeszcze inne parametry jak indukcyjność L , pojemność C oraz wpływność G . Dlatego postanowiono zbadać analitycznie, jaki wpływ mają te parametry na przebieg impulsu strzałowego, a zwłaszcza, w jakim stopniu te parametry zmieniają charakter energetyczny impulsu strzałowego.

2. Wpływ parametrów linii na zniekształcenie impulsów strzałowych

2.1. Uwzględnienie w obliczeniach, w przebiegu impulsów strzałowych, parametrów R , L linii

Przyjmując uproszczony model obwodu strzałowego składający się z pojemności kondensatora zapalarki C_0 , oporności czynnej obwodu R i oporności czynnej zapalników R_0 możemy w prosty sposób określić chwilową wartość prądu w obwodzie przy rozładowaniu kondensatora C_0 naładowanego do napięcia U_0 (rysunek 4a).

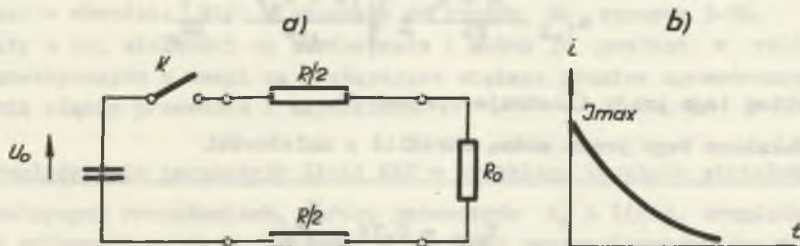
Prąd ten określamy zależnością

$$i = \frac{U_0}{R + R_0} e^{-\frac{t}{C_0(R + R_0)}} \quad (6)$$

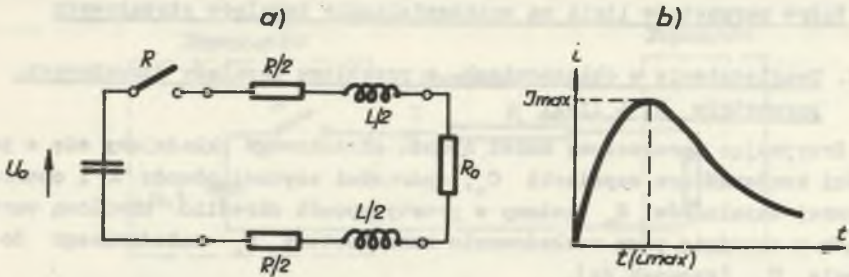
maksymalna wartość prądu, przy takim modelu obwodu przypada w chwili $t = 0$ i można ją określić ze wzoru

$$J_{\max} = \frac{U_0}{R + R_0} \quad (7)$$

Przebieg tego prądu obrazuje wykres (4b).



Rys. 4. Obwód strzałowy uwzględniający tylko oporność czynną
a) schemat zastępczy, b) charakterystyka przebiegu impulsu



Rys. 5. Obwód strzałowy uwzględniający oporność czynną i indukcyjność
a) schemat zastępczy, b) charakterystyka przebiegu impulsu

Jeżeli zgodnie z rzeczywistością założymy, że model obwodu posiada szeregowo włączoną indukcyjność (rys. 5a), wówczas chwilową wartość napięcia rozładowania kondensatora możemy określić równaniem:

$$u_c'' + \frac{R + R_0}{L} u_c' + \frac{1}{LC_0} u_c = 0 \quad (8)$$

Po rozwiązaniu tego równania dla warunków początkowych dla $t=0$ $u_c(0) = U_0$ oraz $i(0) = 0$ możemy określić chwilową wartość prądu w obwodzie

$$i = \frac{U_0}{Z_p} (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}) \quad (9)$$

gdzie: $Z_p = \sqrt{(R + R_0)^2 + 4 \frac{L}{C_0}}$ impedancja obwodu

$$a_{1,2} = \frac{R + R_0}{2L} \pm \sqrt{\frac{(R + R_0)^2}{4L^2} - \frac{1}{LC_0}}$$

przebieg tego prądu ilustruje rysunek 5b.

Maksimum tego prądu można określić z zależności

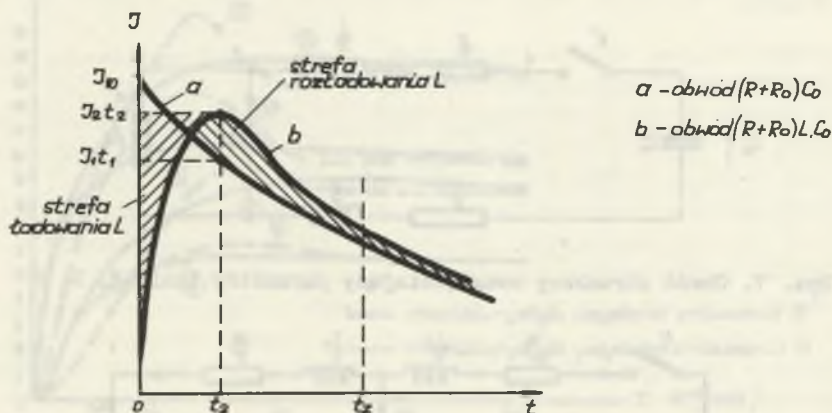
$$I_{\max} = 0,74 \frac{U_0}{R + R_0} \quad (10)$$

i występuje ono po czasie

$$t(i_{\max}) = 2 \frac{L}{R + R_0} \text{ [s]} \quad (11)$$

Posługując się modelami obwodu strzałowego wg rys. 4a i 5a, obliczono przebiegi prądów dla kilku linii strzałowych o przekroju żył $1,5 \text{ mm}^2$ oraz $2,5 \text{ mm}^2$ i długości od 1-4 km, w których nastąpiło rozładowanie kondensatora zapalarki o pojemności $3 \mu\text{F}$ i $300 \mu\text{F}$.

Przykład porównania przebiegów impulsu prądu w linii z parametrami RC i RLC ilustruje rys. 6.



Rys. 6. Porównanie przebiegów impulsów strzałowych w obwodach RC i RLC

Z porównania charakterystyk wynika, że w obwodzie typu RC maksymalna wartość prądu na wartość większą niż w obwodzie RLC.

Zaobserwowany sposób narastania prądu w obwodzie RLC od $I = 0$ do I_{max} spowodowany jest procesem magazynowania energii w indukcyjności obwodu.

Natomiast zaobserwowana większa wartość prądu w obwodzie RLC w okresie opadania niż w tym samym czasie w obwodzie typu RC spowodowana jest procesem rozładowywania energii z indukcyjności obwodu.

Czas narastania prądu w obwodzie RLC dla typowych obwodów strzałowych wynosi: ok. 0,1 ms. Straty energetyczne impulsu strzałowego w tym okresie czasu w obwodzie RLC w stosunku do obwodu RC wynoszą 3-5%.

Straty o tej wielkości są bardzo małe i można je pominąć w obliczeniach praktycznych z uwagi na występujące większe różnice spowodowane opornością złączy przewodów i zapalników.

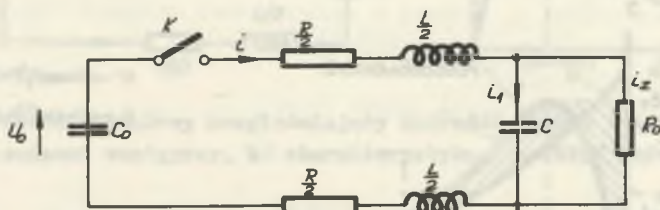
2.2. Uwzględnienie parametrów linii RLC w przebiegu impulsów strzałowych

W następujących rozważaniach, oprócz parametrów R, L linii, uwzględniono również pojemność międzyprzewodową. W tym celu przeanalizowano dwa modele obwodu strzałowego o parametrach w postaci skupionej (rys. 7 i 8).

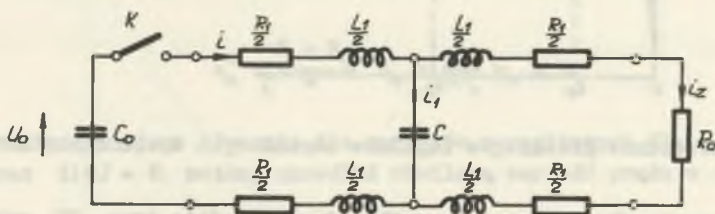
W pierwszym modelu (rys. 7) pojemność własną obwodu uwzględniono w postaci skupionej na końcu linii. W drugim - jako skupioną w środku czwórniaka typu H.

Dla modelu z rys. 7 chwilową wartość prądu i_2 , który płynie przez zapalnik o oporności R_0 , można określić równaniem:

$$i_2^{(3)} + \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{RC}\right) i_2^{(2)} + \left(\frac{1}{LC_0} + \frac{1}{LC} + \frac{R_0}{RLC}\right) i_2^{(1)} + \frac{1}{RLCC_0} i_2 = 0 \quad (12)$$



Rys. 7. Obwód strzałkowy uwzględniający parametry linii R, L, C



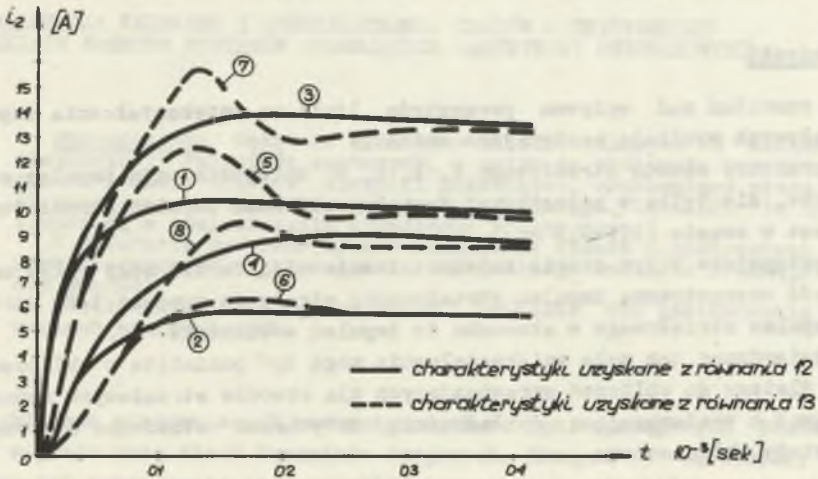
Rys. 8. Schemat zastępczy obwodu strzałkowego w postaci czwórnik H z parametrami linii RLC

Opierając się o równanie różniczkowe (12) z pomocą maszyny analogowej otrzymano charakterystyki przebiegu przyjmując do obliczeń prądu w obwodach strzałkowych przekroje przewodów 1,5 i 2,5 mm² Cu. Założono również, że napięcie zapalarki wynosi $U_0 = 700$ V i pojemność kondensatora - 300 μF. Są to charakterystyki 1-4. Przebieg tego prądu zbliżony jest do aperiodycznego i nie wykazywał dostrzegalnych drgań.

Podobnie postąpiono analizując drugi model obwodu strzałkowego uwzględniając w nim pojemność skupioną w środku linii (rys. 8). W tym modelu, chwilową wartość prądu i_2 , który płynie przez zapalnik o oporności R_0 można opisać równaniem różniczkowym:

$$i_2^{(4)} + \left(\frac{2R_1 + R_0}{L_1} + \frac{R_1(R_0 + R_1)}{L_1^2} + \frac{2}{L_1 C}\right) i_2^{(3)} + \left(\frac{R_0 + R_1}{C_0 L_1^2} + \frac{2R_1 + R_0}{CL^2}\right) i_2^{(2)} + \frac{1}{L_1^2 C_0 C} i_2 = 0 \quad (13)$$

Rozwiązanie tego równania różniczkowego dokonano również z pomocą maszyny analogowej przyjmując podobnie jak w poprzednim przykładzie wartości parametrów typowych linii strzałowych o długości 1-4 km.



Charakterystyki	1,5	kabel	KGSgft	2x15 mm ²	Cu - 2km
	2,6	-	-	-	- 4km
	3,7	-	-	2x25 mm ²	Cu - 2km
	4,8	-	-	-	- 4km

Rys. 9. Charakterystyki początkowej fazy przebiegu impulsów strzałowych w linii z parametrami RLC

W wyniku obliczeń otrzymano charakterystyki prądu i_2 przepływającego przez zapalniki (rys. 9 krzywe 5-8). Porównując otrzymane charakterystyki otrzymane drogą obliczeń na maszynie analogowej stwierdzono co następuje:

- dla modelu obwodu RLC z pojemnością skupioną na końcu linii, charakterystyka przebiegu prądu jest zbliżona do przebiegu operiodycznego i nie wykazuje dostrzegalnych drgań;
- dla modelu obwodu RLC z pojemnością skupioną w środku obwodu charakterystyka przebiegu prądu wykazuje drgania. Drgania te są tym silniejsze im mniejszą wartość posiada oporność czynna obwodu;
- dostrzegalne zniekształcenia impulsu strzałowego trwają bardzo krótko (ok. 0,2 ms), co przy trwaniu impulsu strzałowego 4 ms stanowi zaledwie 5% czasu. Natomiast straty energetyczne tego impulsu wynoszą tylko 4÷6%, co w obliczeniach praktycznych można pominąć.

Rozważano również przypadek, wpływu upływności międzyprzewodowej.

W obwodach, w których upływność była mniejsza od 10^{-4} [S], wpływ jej na kształt impulsu strzałowego był praktycznie niedostrzegalny. Taka wartość upływności świadczy o bardzo złym stanie izolacji linii, a mimo tego zniekształceń impulsów strzałowych nie stwierdzono.

3. Wnioski

Z rozważań nad wpływem parametrów linii na zniekształcenia impulsów strzałowych wynikają następujące wnioski:

1. Parametry obwodu strzałowego R, L, C, G zniekształcają impulsy strzałowe, ale tylko w początkowej fazie powstawania impulsu strzałowego to jest w czasie (0,1-0,3 ms).
2. Występujące w tym czasie zniekształcenia mają bardzo mały wpływ na wartość energetyczną impulsu strzałowego; straty te wynoszą 1-2% wartości impulsu strzałowego w stosunku do impulsu w obwodzie RC.
3. Stwierdzone tak małe zniekształcenia mogą być pominięte w obliczeniach i dlatego do obliczeń sprawdzających dla obwodów strzałowych można stosować z wystarczającą dokładnością dotychczas stosowane uproszczone metody obliczeniowe.

LITERATURA

- [1] Cybulski W., Krzystolik P.: Strzelanie elektryczne w górnictwie. - "Śląsk", Katowice 1970.
- [2] Frączek St.: Analiza wpływu parametrów obwodów strzałowych na zniekształcenia impulsów strzałowych oraz ich bezpieczne przesyłanie. Rozprawa doktorska - Pol. Śl. 1970.
- [3] Frączek St.: Obliczanie sieci centralnego strzelania. Projekty - Problemy Nr 4, 1971.
- [4] Іуріе А.І.: Электрические взрывы зарядов углетех. Москва 1960.

ИСКАЖЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ЗАЖИГАНИЯ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ЦЕПЯХ ВЗРЫВНЫХ СЕТЕЙ

Р е з ю м е

Описано аналитический метод исследования искажений импульсов зажигания в длинных цепях взрывных сетей.

BLASTING IMPULS DISTORTIONS IN THE NETWORKS OF CENTRAL BLASTING

S u m m a r y

This article describes the analysis of the distortions of the blasting impulses which appear in the very long circuits of the central blasting networks.