

212152 L

**INSTYTUT TECHNOLOGII ELEKTRONOWEJ
POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ**

Raporty ITE

Seria: PRE /13/

**Metoda kontroli ogniskowania
wiązki elektronowej w proce-
sie spawania elektronowiązkowego**

Czesław Kirczuk

**Słowa kluczowe: spawanie elektronowiązkowe,
ogniskowanie wiązki elektronów,
sterowanie wiązką elektronów**

Wrocław 1979

mgr inż. Czesław Kirczuk

Instytut Technologii Elektronowej
Politechniki Wrocławskiej
50-372 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Rozprawa doktorska

Raport wpłynął do redakcji - 10.04.1979

Žonie

Serdecznie dziękuję
Panu doc.dr Andrzejowi Hałasowi za
opiekę naukową oraz życzliwe uwagi
w czasie wykonywania i redagowania
niniejszej pracy

Autor

SPIS TREŚCI

WSTĘP

1. PRĄD CZĄSTEK EMITOWANYCH PRZEZ DETAL SPAWANY	7
1.1. Próba oszacowania charakteru fluktuacji prądu cząstek emitowanych przez detal spawany	8
1.2. Pomiary rozkładu widmowego fluktuacji prądu cząstek .	15
1.3. Koncepcja układu do kontroli ogniskowania w spawar- kach elektronowięzkowych	17
1.4. Pomiary składowych zmiennych prądu cząstek emitowa- nych w czasie spawania wiązką elektronów	23
1.5. Interpretacja przebiegów napięć wyjściowych z prze- tworników	30
1.6. Podsumowanie	34
2. WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI PROPONOWANEJ METODY KONTROLI OGNISKOWANIA	35
2.1. Analiza kształtu uzyskiwanych przetopów	35
2.2. Prąd przechodzący przez próbkę	38
2.3. Składowe stałe prądu cząstek a średnia częstotliwość fluktuacji	41
2.4. Podsumowanie	45
3. UKŁAD DO AUTOMATYCZNEGO OGNISKOWANIA WIĄZKI ELEKTRONÓW W SPAWARCE ELEKTRONOWEJ	46
3.1. Wymagania stawiane układom do automatycznego ognisko- wania wiązki elektronów	46
3.2. Schemat blokowy układu do automatycznego ogniskowa- nia w spawarce elektronowej	47

4. BADANIA EKSPLOATACYJNE UKŁADU DO AUTOMATYCZNEGO OGNISKOWANIA	54
4.1. Badania przy wykorzystaniu układu symulującego charakterystykę obiektu.....	54
4.2. Współpraca układu do automatycznego ogniskowania ze spawarką WS-2/30	59
5. WNIOSKI KOŃCOWE	72
SPIS LITERATURY	75
DODATEK	

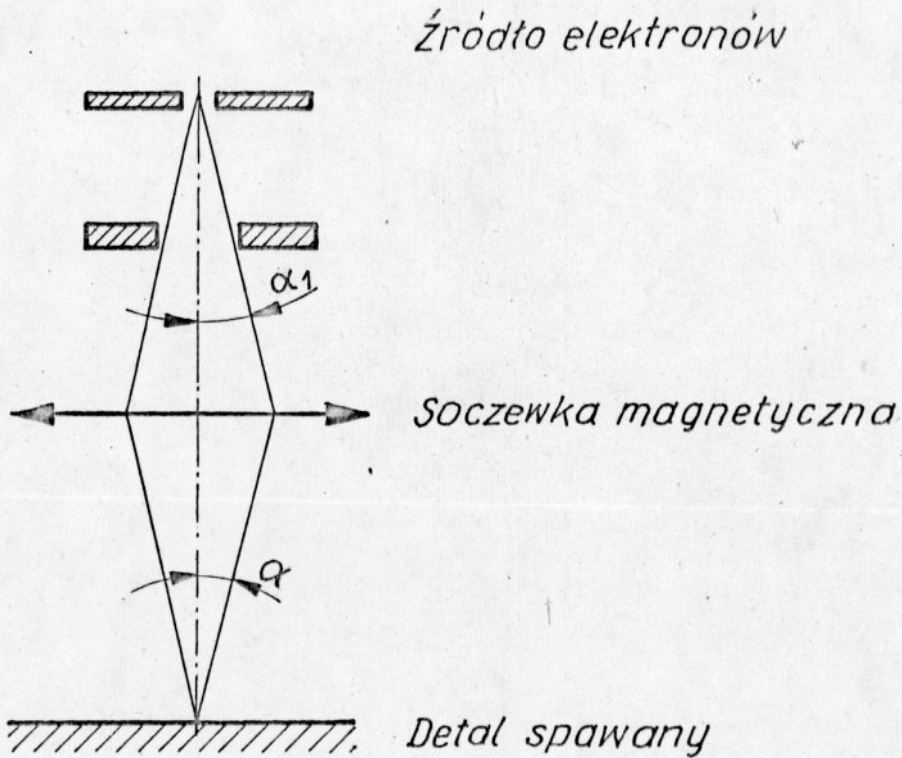
WSTĘP

Podczas spawania elektronowiązkowego uzyskuje się trwałe połączenie detali w wyniku wypełnienia występującej między nimi szczeliny stopionym materiałem pochodzącym najczęściej ze stopionych krawędzi łączonych materiałów. Źródłem ciepła niezbędnym do topienia jest przyspieszona i zogniskowana wiązka elektronów.

Źródło ciepła jakim jest wiązka elektronów wykorzystuje się nie tylko do spawania lecz także w takich operacjach technologicznych jak: drażnienie otworów, cięcie, hartowanie, czyszczenie strefowe, topienie, naparowywanie cienkich warstw. Charakteryzuje się ono dużą sprawnością, zapewnia ponadto możliwość osiągnięcia dużych mocy i dużych gęstości mocy zarówno przy pracy ciągłej jak i impulsowej.

Podstawowym podzespołem każdej spawarki elektronowej jest układ elektronoptyczny wytwarzający i kształtujący wiązkę elektronów. Najczęściej stosowane są układy zawierające jedną soczewkę magnetyczną. Schemat takiego układu pokazuje rys. 1.

Zastosowanie wiązki elektronów do spawania pozwala osiągnąć szczególnie duże wartości stosunku głębokości do szerokości spoiny, nieosiągalne innymi metodami spawania. Aby w pełni wykorzystać możliwości jakie stwarza wiązka elektronów należy zapewnić w trakcie spawania prawidłowe ogniskowanie wiązki. Stwierdzono w praktyce, że optymalne położenie przewężenia wiązki elektronów wypada na głębokości $0,5 \pm 0,75$ głębokości spoiny [37]. Uzyskuje się wówczas maksymalną głębokość i maksymalny stosunek głębo-



Rys. 1. Schemat układu elektrooptycznego spawarki elektro-
nowej z magnetycznym ogniskowaniem wiązki elektronów.

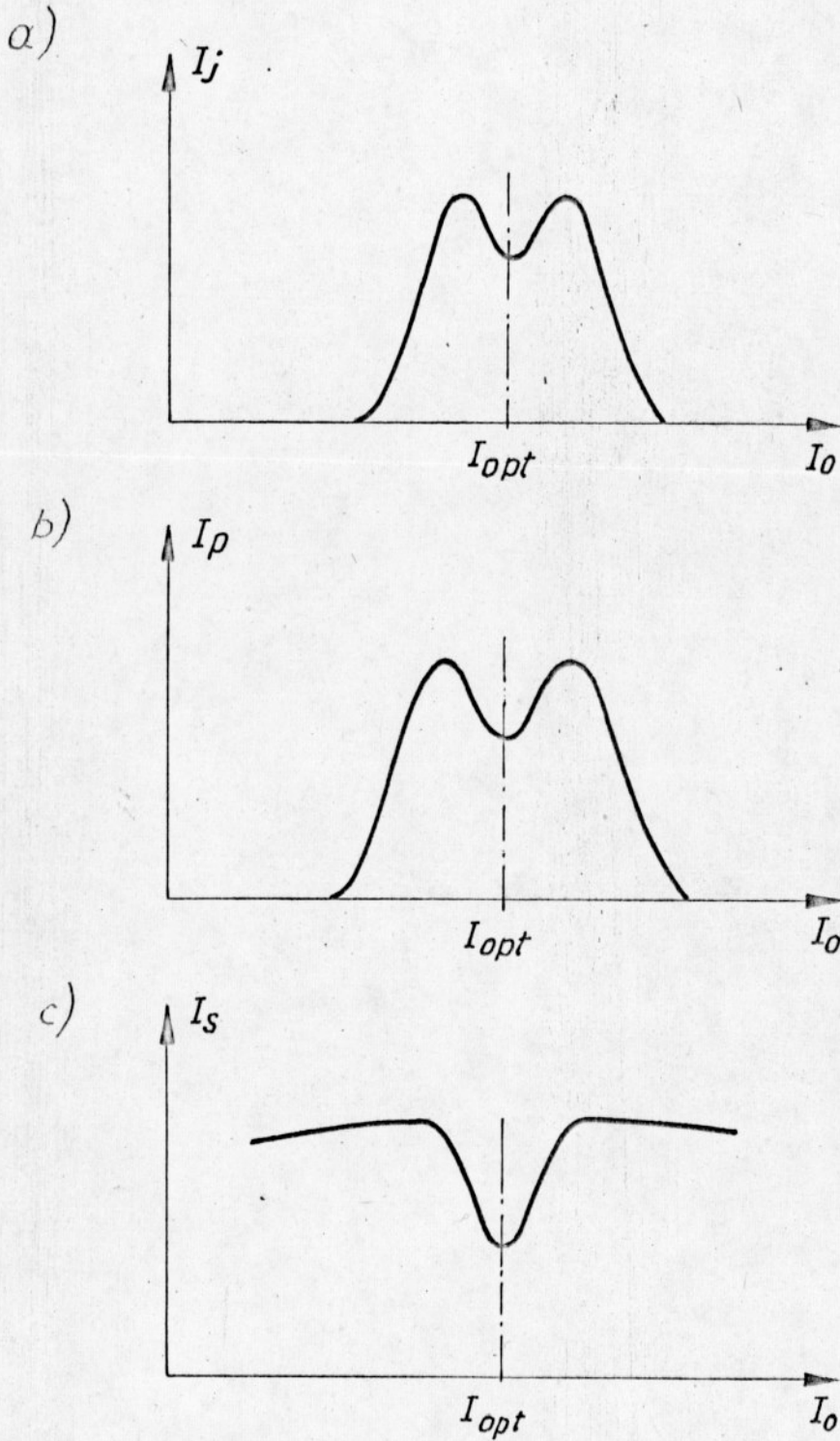
kości do szerokości spoiny, a energia zużyta na jednostkę długości spoiny dzielona przez głębokość spoiny osiąga minimalną wartość [37]. Ponieważ bezpośredni pomiar położenia przewężenia wiązki podczas spawania jest niemożliwy, opracowano szereg metod kontroli ogniskowania. Niektóre z nich: jak wizualna ocena średnicy wiązki niespawającej /o małej mocy/, czy ocena intensywności świecenia zjonizowanych par metalu są metodami subiektywnymi. Skuteczność ich zależy od wprawy i praktyki operatora obsługującego spawarkę. Szereg znanych metod umożliwiających obiektywną kontrolę ogniskowania jest przedmiotem licznych patentów [27, 28, 29, 30, 31]. Posiadają one jednak wiele wad, które utrudniają zastosowanie ich

w praktyce. I tak np.:

- metoda badania drgań mechanicznych spawanej próbki wymaga amortyzacji drgań stolika roboczego spawarki [33],
- metoda pomiaru prądu próbki wymaga izolacji spawanych detali od masy urządzenia [27],
- metoda pomiaru promieniowania podczerwonego wymaga użycia specjalnego czujnika pomiarowego zabezpieczonego przed naporowaniem [9,28].

Wydaje się, że najbardziej przydatne w praktyce mogą być metody kontroli ogniskowania oparte na pomiarach prądu cząstek emitowanych przez detal spawany [29,30,31,32]. W pracy [29] wykorzystano do kontroli ogniskowania przebiegi prądu: jonowego I_j , elektronów powolnych tj. elektronów o małej energii I_p i elektronów szybkich o dużych energiach I_s w funkcji prądu soczewki ogniskującej. Osiągnięcie minimum któregośkolwiek z prądów świadczy o osiągnięciu optymalnego w danych warunkach prądu ogniskowania. Przebiegi tych prądów w funkcji prądu soczewki ogniskującej pokazano na rys. 2.

W innych pracach [30,32] wykorzystano do kontroli ogniskowania efekty wynikające wyłącznie ze zmiany rozkładu przestrzennego elektronów szybkich odbitych od powierzchni detalu, występujące pod wpływem zmian prądu soczewki ogniskującej. Utworzenie się głębokiego kanału w spawanym materiale powoduje bowiem zmianę rozkładu przestrzennego par i elektronów szybkich, który staje się bardziej kierunkowy i wykazuje pewną niesymetrię w płaszczyźnie przechodzącej wzdłuż spoiny, prostopadle do powierzchni spawanych detali [11]. Stosując odpowiednie konstrukcje kolektorów można wykryć powyższe zmiany rozkładu przestrzennego i usta-



Rys. 2. Przebiegi: prądu jonowego /a/; prądu elektronów powolnych /b/ i prądu elektronów szybkich /c/ w funkcji prądu soczewki ogniskującej [29] .

lić optymalny prąd soczewki ogniskującej.

Metody oparte na pomiarach prądu cząstek emitowanych przez detal spawany opisane w pracach [29,30,32] posiadają pewne niedogodności ograniczające możliwości ich wykorzystania przy budowie elektronicznych układów, które samoczynnie ustalałyby optymalny prąd soczewki ogniskującej. W pierwszym rzędzie należałoby tu wymienić:

- duży zakres zmian uzyskiwanych sygnałów przy zmianie warunków spawania, a zwłaszcza przy zmianie prądu wiązki,
- "mało wyraźne" minimum sygnału w funkcji prądu soczewki,
- przypadkowe fluktuacje sygnałów,
- inercję obiektu związaną z topieniem i wytwarzaniem kanału przez wiązkę elektronów.

W trakcie badań przeprowadzonych w Instytucie Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej nad emisją cząstek naładowanych z obszaru oddziaływania wiązki elektronów dużej mocy z materiałem stwierdzono, że prądy związane z przepływem tych cząstek zawierają obok składowej stałej również pewną składową zmienną, przy czym zarówno częstotliwość jak i amplituda składowej zmiennej są skorelowane z głębokością przetopu. Wyniki badań opublikowane w pracach [14,17] wskazywały na możliwość wykorzystania zaobserwowanego efektu do ustalenia optymalnej wartości prądu ogniskowania wiązki w sposób znacznie wygodniejszy niż w przypadku znanych dotąd metod "emisyjnych". Pozwoliło to sformułować tezę niniejszej rozprawy w brzmieniu:

"Składowa zmienna prądu cząstek emitowanych przez spawany detal zawiera informację o głębokości wytwarzanego przetopu i może być wykorzystana do ustalania optymalnej wartości prądu ogniskowania wiązki elektronów".

Jako główny cel pracy przyjęto weryfikację powyższej hipotezy oraz opracowanie urządzenia do automatycznego ustalania optymalnej wartości prądu ogniskowania w oparciu o informacje zakodowane w składowej zmiennej pojawiających się sygnałów.

1. PRĄD CZĄSTEK EMITOWANYCH PRZEZ DETAL SPAWANY

Przekazywanie energii kinetycznej elektronów głęboko pod powierzchnię spawanego metalu /do kilkunastu centymetrów/ możliwe jest dzięki wytworzeniu w metalu kanału wypełnionego plazmą. Fakt ten został potwierdzony eksperymentalnie [20,40,41] .

Kanał wytworzony przez spawającą wiązkę elektronów jest źródłem strumienia par i gazów uwalnianych podczas topienia metalu w próżni oraz źródłem strumienia cząstek naładowanych tj. elektronów i jonów. Jony wytwarzane są zarówno wewnątrz kanału jak też na zewnątrz w obszarze oddziaływania wiązki elektronów ze strumieniem parującego materiału. Jonizacji ulegają również gazy uwalniane z metalu oraz gazy resztkowe znajdujące się w komorze roboczej spawarki. Jonizacja atomów zachodzi wskutek oddziaływania strumienia elektronów, promieniowania X i temperatury. Część jonów porusza się w kierunku katody powodując jej erozję [5] .

Pozostałe jony rozpraszają się w komorze roboczej rekombinując na jej ściankach. Na strumień elektronów emitowanych ze strefy oddziaływania wiązki elektronów z materiałem składają się: elektrony odbite sprężysto o energiach równych energii wiązki, elektrony odbite niesprężysto o energiach mniejszych od energii elektronów wiązki, elektrony wtórne o energii do 50 eV, elektrony uwalniane podczas jonizacji, oraz elektrony emitowane przez stopiony metal na zasadzie termoemisji.

Prąd cząstek emitowanych przez detal spawany jest sumą prądu jonowego i elektronowego. Obserwowane fluktuacje tego prądu

spowodowane są zjawiskami o charakterze dynamicznym, towarzyszącymi procesowi oddziaływania wiązki elektronów o dużej gęstości mocy z materiałem. Przyczynami fluktuacji prądu cząstek w czasie spawania mogą być:

- zmiany koncentracji parującego materiału,
- ruch stopionego metalu w kanale,
- zjawiska związane z formowaniem się kanału,
- lokalne zmiany własności materiału spawanego związane z obecnością wtrąceń, pęcherzy gazowych, zanieczyszczeń na powierzchni itp.,
- fluktuacje emitowanego ze strefy oddziaływania wiązki z metalem promieniowania X,
- oddziaływanie wiązki elektronów z plazmą,
- przypadkowe zmiany parametrów spawania np.: napięcia przyspieszającego, prądu wiązki itp.

1.1. Próba oszacowania charakteru fluktuacji prądu cząstek emitowanych przez detal spawany

Znaczna liczba czynników mogących powodować fluktuacje prądu cząstek emitowanych przez detal spawany uniemożliwia ilościowe oszacowanie wartości tych fluktuacji. Próbę jakościowego oszacowania charakteru fluktuacji, a ściślej ich rozkładu widmowego przeprowadzono przy pewnych założeniach upraszczających.

Przyjęto że:

1. Fluktuacje spowodowane są zmianami koncentracji parującego materiału oraz zmianami współczynnika emisji wtórnej wynikającymi z lokalnych własności spawanego

materiału,

2. Zmiany koncentracji par i współczynnika emisji wtórnej są losowe:

$$\begin{aligned} N &= N_0 + \{\Delta N(t)\} \\ \tilde{\sigma} &= \tilde{\sigma}_0 + \{\Delta \tilde{\sigma}(t)\} \end{aligned} \quad /1-1/$$

gdzie: N_0 - średnia koncentracja par metalu,

$\{\Delta N(t)\}$ - zmiany koncentracji w funkeji czasu o charakterze losowym,

$\tilde{\sigma}_0$ - współczynnik emisji wtórnej,

$\{\Delta \tilde{\sigma}(t)\}$ - losowa część współczynnika emisji wtórnej.

3. Procesy stochastyczne $\{\Delta N(t)\}$ i $\{\Delta \tilde{\sigma}(t)\}$ są stacjonarne a ich wartości oczekiwane $E\{\Delta N(t)\}$ i $E\{\Delta \tilde{\sigma}(t)\}$ są równe zeru.

W układzie przedstawionym na rys. 3 prąd kolektora jest częścią całkowitego prądu emitowanego ze strefy oddziaływania wiązki elektronów z materiałem i jest on sumą prądu jonowego i elektro-nowego:

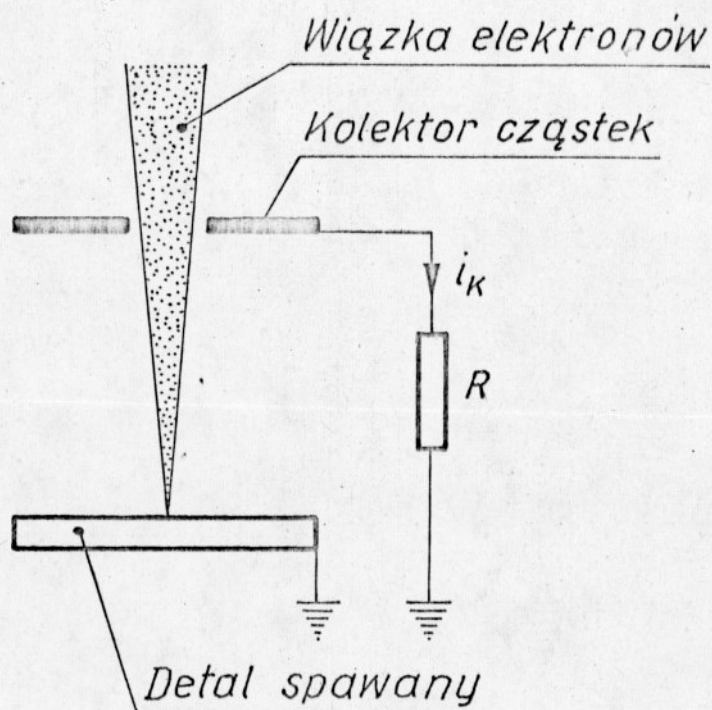
$$i_k = i_{kj} - i_{ke} \quad /1-2/$$

We wzorze /1-2/ nie uwzględniono prądu termo-elektronowego i elektronów generowanych w trakcie jonizacji z uwagi na ujemną polaryzację kolektora wywołaną przepływem prądu elektronów szybkich przez rezystor R /patrz rys. 3/.

Zgodnie z powyższymi założeniami prąd jonowy kolektora wyniesie:

$$i_{kj} = k_1^N I_w + k_1 \eta^N I_w + k_2 \tau^N I_w + k_3 \delta^N I_w$$

/1-3/



Rys. 3. Szkic układu pomiarowego prądu cząstek emitowanych ze strefy oddziaływania wiązki z materiałem.

gdzie: k_1, k_2, k_3 - stałe proporcjonalności

N - koncentracja par metalu,

I_w - prąd wiązki elektronów,

η - współczynnik odbicia sprężystego elektronów,

τ - współczynnik odbicia niesprężystego elektronów,

δ - współczynnik rzeczywistej emisji wtórnej.

Ponieważ w rzeczywistości prąd wiązki elektronów zawiera składową zmienną okresową spowodowaną np. pulsacją urządzeń zasilających:

$$I_w = I_{w0} + I_w(t)$$

gdzie: I_{wo} - składowa stała prądu wiązki,

$I_w(t)$ - składowa zmienna /okresowa/ prądu wiązki.

Zatem zgodnie z zależnością /1-3/

$$i_{kj} = (k_1 + \eta k_1 + \tau k_2 + \delta k_3) N I_w = K \left(N_o + \{\Delta N(t)\} \right) \left(I_{wo} + I_w(t) \right) =$$

$$= K N_o I_{wo} + K N_o I_w(t) + K I_{wo} \{\Delta N(t)\} \left(1 + \frac{I_w(t)}{I_{wo}} \right)$$

i stąd:

$$i_{kj} = I_{jo} + I_j(t) + \{\Delta I_j(t)\} \left(1 + \varphi(t) \right) \quad /1-5/$$

przy czym:

$$K = k_1 + \eta k_1 + \tau k_2 + \delta k_3$$

$$\varphi(t) = \frac{I_w(t)}{I_{wo}}$$

$I_{jo} = K N_o I_{wo}$ - składowa stała prądu jonów,

$I_j(t) = K N_o I_w(t)$ - składowa zmienna /okresowa prądu jonów/.

$$\{\Delta I_j(t)\} \left(1 + \varphi(t) \right) = K I_{wo} \{\Delta N(t)\} \left(1 + \frac{I_w(t)}{I_{wo}} \right) - \text{składowa}$$

losowa prądu jonów /szum/.

Prąd elektronowy kolektora stanowi pewną część całkowitego prądu emisji wtórnej:

$$i_{ke} = k_4 I_w \left(\zeta_o + \{\Delta \zeta(t)\} \right) \quad /1-6/$$

gdzie: k_4 - stała proporcjonalności.

Uwzględniając wzór /1-4/ otrzymuje się:

$$i_{ke} = k_4 I_{wo} \zeta_o + k_4 \zeta_o I_w(t) + k_4 I_{wo} \{\Delta \zeta(t)\} \left(1 + \frac{I_w(t)}{I_{wo}} \right) \quad /1-7/$$

co można zapisać w postaci:

$$i_{ke} = I_{eo} + I_e(t) + \{\Delta I_e(t)\} (1 + \varphi(t)) \quad /1-8/$$

gdzie: $I_{eo} = k_4 I_{wo} \tilde{\sigma}_o$ - składowa stała prądu elektronowego,

$I_e(t) = k_4 I_w(t)$ - składowa zmienna /okresowa/ prądu

elektronowego,

$$\{\Delta I_e(t)\} (1 + \varphi(t)) = k_4 I_{wo} \{\Delta \tilde{\sigma}(t)\} \left(1 + \frac{I_w(t)}{I_{wo}}\right) - \text{składowa}$$

losowa prądu elektronowego /szum/.

Prąd kolektora będący sumą prądu jonowego i elektronowego można więc przez analogię zapisać w postaci:

$$i_k = I_{ko} + I_k(t) + \{\Delta I_k(t)\} (1 + \varphi(t)) \quad /1-9/$$

Składowa zmienna prądu kolektora:

$$\{i_k(t)\} = I_k(t) + \{\Delta I_k(t)\} (1 + \varphi(t)) \quad /1-10/$$

jest sumą sygnału okresowego $I_k(t)$ oraz szumu $\{\Delta I_k(t)\} (1 + \varphi(t))$.

Funkcja korelacji procesu stochastycznego $\{i_k(t)\}$ wynosi:

$$R_{ii}(t_1, t_2) = E \left\{ \{i_k(t_1)\} \{i_k(t_2)\} \right\} \quad /1-11/$$

i przyjmuje postać

$$R_{ii}(t_1, t_2) = R_{II}(t_1, t_2) [1 + \varphi(t_1) + \varphi(t_2) + \varphi(t_1)\varphi(t_2)] + I_k(t_1) I_k(t_2)$$

gdzie: $R_{II}(t_1, t_2)$ jest funkcją korelacji procesu stochastycznego $\{\Delta I_k(t)\}$.

Dokonując zamiany współrzędnych: $t_1=t$, $t_2=t + \tau$ i uwzględniając stacjonarność procesu stochastycznego $\{\Delta I_k(t)\}$ otrzymuje się:

$$R_{ii}(t, t+\tau) = R_{II}(\tau) [1 + \varphi(t) + \varphi(t+\tau) + \varphi(t)\varphi(t+\tau)] + I_k(t) \cdot I_k(t+\tau)$$

Ze względu na okresowość funkcji korelacji można wyznaczyć jej średnią wartość:

$$\overline{R(\tau)} = \frac{1}{T} \int_0^T R_{II}(t, t+\tau) dt$$

Po wykonaniu całkowania:

$$\overline{R(\tau)} = R_{II}(\tau) \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n^2}{2} \cos 2\pi n f_0 \tau \right] + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_n^2}{2} \cos 2\pi n f_0 \tau$$

/1-12/

gdzie: C_n - amplituda n-tej harmonicznej funkcji okresowej

$$\varphi(t) = \frac{I_w(t)}{I_{w0}},$$

I_n - amplituda n-tej harmonicznej składowej zmiennej

/okresowej/ prądu kolektora cząstek $I_k(t)$,

$f_0 = \frac{1}{T}$ - częstotliwość składowej zmiennej prądu wiązki elektronów.

Średnią wartość funkcji korelacji można przedstawić więc w postaci sumy trzech składników:

$$\overline{R(\tau)} = R_{II}(\tau) + R_{II}(\tau) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n^2}{2} \cos 2\pi n f_0 \tau + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_n^2}{2} \cos 2\pi n f_0 \tau$$

/1-13/

Biblioteka
Pol. Wrocław.

Widmowa gęstość mocy fluktuacji prądu cząstek związana jest z funkcją korelacji przekształceniem Fouriera [7]:

$$G(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad /1-14/$$

i zgodnie z zależnością /1-13/ może być przedstawiona w postaci:

$$G(f) = G_1(f) + G_2(f) + G_3(f)$$

przy czym:

$$G_1(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{II}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad /1-15/$$

$$G_2(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{II}(\tau) \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n^2}{2} \cos 2\pi n f_0 \tau \right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad /1-16/$$

$$G_3(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_n^2}{2} \cos 2\pi n f_0 \tau \right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad /1-17/$$

Po wykonaniu całkowania trzeci składnik widmowej gęstości mocy wyniesie:

$$G_3(f) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{I_n^2}{2} \delta(f - n f_0) \quad /1-18/$$

gdzie: $\delta(f - n f_0)$ jest funkcją Diraca.

Poszczególne składniki widmowej gęstości mocy $G(f)$ można zinterpretować w następujący sposób:

$G_1(f)$ - widmowa gęstość mocy prądu $\{\Delta I_k(t)\}$ o charakterze szumu,

$G_2(f)$ - widmowa gęstość mocy prądu $\{\Delta I_k(t)\}\varphi(t)$ o charakterze szumu modulowanego sygnałem okresowym $\varphi(t)$,

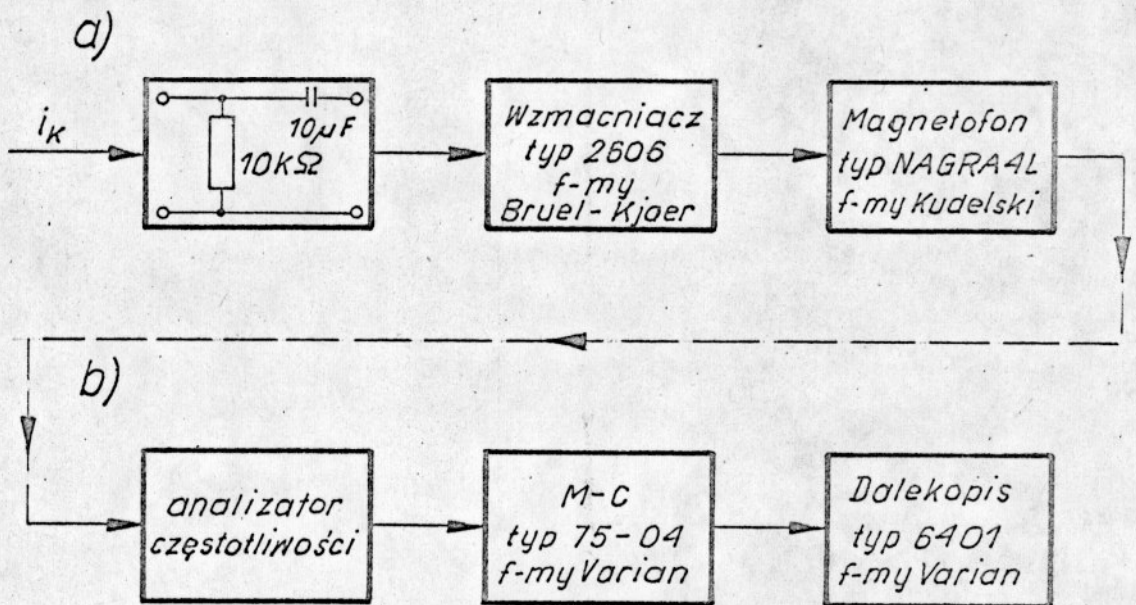
$G_3(f)$ - widmowa gęstość mocy składowej okresowej prądu kolektora $I_k(t)$ równa nieskończoności dla częstotliwości $f = n f_0$.

Analizując otrzymane zależności można stwierdzić, że rozkład widmowy fluktuacji prądu kolektora cząstek powinien posiadać maksima na pewnych wyróżnionych częstotliwościach. Przy złym ogniskowaniu wiązki, gdy nie ma zjonizowanych par metalu rozkład winien być bardziej dyskretny, ponieważ maleje wówczas udział szumów a uwidacznia się wpływ składowej okresowej prądu kolektora.

Pomiary rozkładu widmowego prądu cząstek w pełni potwierdziły przewidywany przebieg rozkładu i znaczny wpływ prądu soczewki ogniskującej na charakter rozkładu.

1.2. Pomiary rozkładu widmowego fluktuacji prądu cząstek

Analizę widma fluktuacji prądu cząstek emitowanych wewnątrz komory roboczej spawarki elektronowięzkowej WS-2/30 podczas spawania przeprowadzono w układzie pomiarowym pokazanym na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy układu stosowanego przy pomiarze i analizie widma fluktuacji prądu cząstek emitowanych przez detal spawany; a- układ do pomiaru fluktuacji, b- układ do analizy częstotliwościowej.

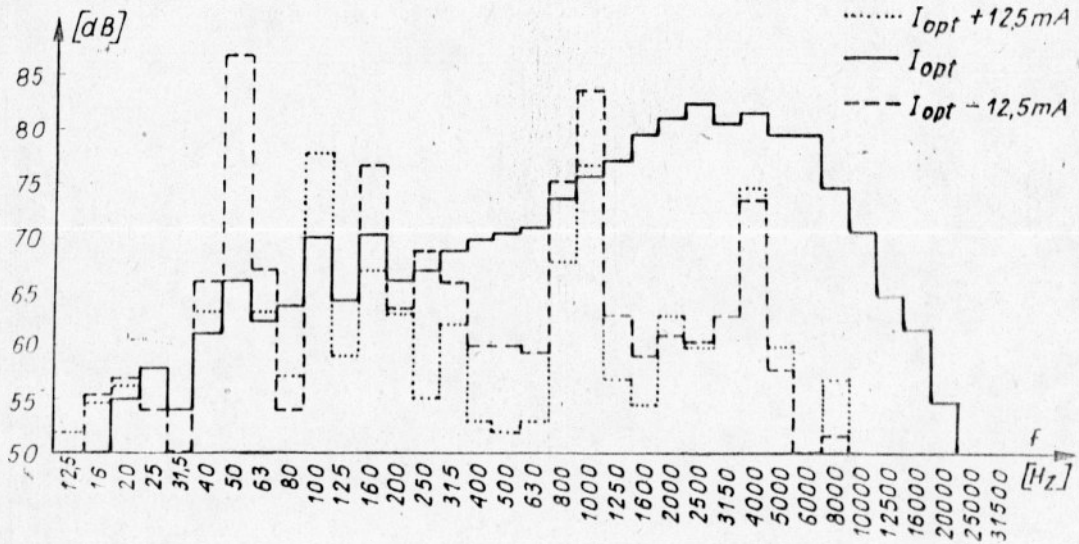
Składową zmienną prądu kolektora rejestrowano po wzmocnieniu na taśmie magnetofonowej. Czas rejestracji wynosił 60 sek. Następnie dokonano analizy widma zarejestrowanych przebiegów cyfrowo-pamięciowym analizatorem częstotliwości typ 3347 firmy Bruel-Kjaer.

Pomiary i analizę wykonano przy współpracy z Instytutem Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej.

Wyniki analizy widma uzyskane w formie wydruku z maszyny cyfrowej zamieszczono w dodatku na rysunkach 1d + 12d. Pomiary przeprowadzono w trakcie spawania stali 1H18N9T, miedzi MiG, stopu aluminium PA1N oraz wolframu. Rozkłady widmowe pokazane na rysunkach 2d, 5d, 8d, 11d zmierzono przy optymalnym ogniskowaniu, a na pozostałych rysunkach przy "odstrojeniu" o $\pm 12,5\text{mA}$ co nie przekraczało $\pm 5\%$ zmian prądu ogniskowania we wszystkich przypadkach.

Na rysunku 5 pokazano przykładowo obwiednie trzech rozkładów widmowych zmierzonych przy różnych wartościach prądu sozewki ogniskującej.

Dla optymalnego prądu ogniskowania $I_0 = I_{\text{opt}}$ rozkład widmowy staje się zbliżony do ciągłego co pozwala sądzić, że wówczas udział szumów /składowa $G_1(f)$ we wzorze 1-13/ w prądzie cząstek emitowanych ze strefy oddziaływania wiązki elektronów z materiałem. Przy złym ogniskowaniu wiązki obserwuje się wyraźne maksima rozkładu na pewnych wyróżnionych częstotliwościach. Rozkład widmowy staje się bardziej dyskretny. Tymi wyróżnionymi częstotliwościami są: częstotliwość sieci 50Hz i jej harmoniczne oraz częstotliwość pracy falownika tyrystorowego



Rys. 5. Rozkład widmowy składowej zmiennej prądu kolektora cząstek podczas spawania wiązką elektronów dla trzech wartości prądu soczewki ogniskującej. Parametry spawania: $U = 15kV$, $I = 30mA$, $V_s = 170$ cm/min, optymalny prąd soczewki ogniskującej $I_{opt} = 675$ mA, materiał spawany - stal 1H18N9T.

w zasilaczu wysokonapięciowym 1 kHz i jej harmoniczne.

1.3. Koncepcja układu do kontroli ogniskowania w spawarkach elektronowiązkowych [17]

Pomiary rozkładu widmowego fluktuacji prądu cząstek oraz obserwacje oscyloskopowe ujawniły zależność charakteru fluktuacji od warunków ogniskowania wiązki. Zjawisko to można wykorzystać w praktyce do określenia optymalnego prądu soczewki

ogniskującej. Losowy charakter fluktuacji nie pozwala na bezpośrednie wykorzystanie ich do kontroli ogniskowania wiązki. Do tego celu można natomiast użyć pewnych nielosowych /zdeterminowanych/ funkcji uzyskanych przez obróbkę statystyczną sygnału losowego $\{U(t)\}$ pochodzącego od fluktuacji prądu cząstek emitowanych z obszaru spawania np.:

a/ $E \{u^2(t)\}$ - wartość oczekiwaną kwadratu napięcia sygnału charakteryzującą moc fluktuacji,

b/ $E \{ |u(t)| \}$ - wartość oczekiwaną napięcia po wyprostowaniu dwupołówkowym sygnału $u(t)$,

c/ $E \left\{ \frac{|u(t)| + u(t)}{2} \right\}$ - wartość oczekiwaną napięcia po wyprostowaniu jednapołówkowym sygnału $u(t)$,

d/ $E \{ \lambda(u_0) \}$ - wartość oczekiwaną liczby przejść wartości napięcia sygnału $u(t)$ przez ustalony poziom u_0 w jednostce czasu /średnią częstotliwość wyskoków procesu stochastycznego $u(t)$ [8]/.

Przypadki: a, b, c można zapisać ogólniej jako: $E \{ \Psi(u(t)) \}$ gdzie: $\Psi(u) \geq 0$ i $\Psi(u) \neq \text{const.}$ Jako sygnał losowy $\{u(t)\}$ można uważać sygnał uzyskany na wyjściu układu liniowego o impedancji przejściowej $Z_p(j\omega)$, na wejście którego doprowadzono prąd kolektora cząstek $\{i_k(t)\}$, a za funkcję $\Psi(u)$ można uważać charakterystykę układu nieliniowego. Ponieważ nie można zrealizować operacji uśredniania statystycznego, zatem do oszacowania wartości oczekiwanej procesu stochastycznego $\{ \Psi(u(t)) \}$ na wyjściu układu nieliniowego należy zastosować uśrednianie w czasie, przyjmując założenie, że proces ten jest stacjonarny w przyjętych przedziałach czasowych. Schemat blokowy układu do kontroli ognis-

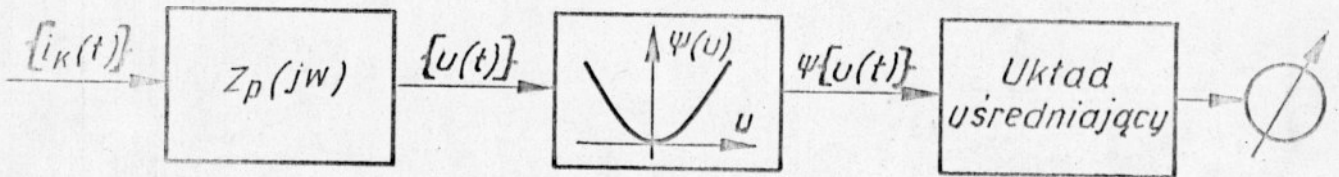
kowania oparty o powyższą koncepcję przedstawiono na rys. 6a. Zawiera on: układ liniowy o impedancji przejściowej $Z_p(j\omega)$, układ nieliniowy o charakterystyce $\psi(u)$, układ uśredniający i wskaźnik pomiarowy. Na rysunku 6b pokazano analogiczny schemat dla przypadku d jako nieco odbiegającego od przypadków a, b, c.

Zawiera on: układ liniowy o impedancji przejściowej $Z_p(j\omega)$, układ nieliniowy o charakterystyce

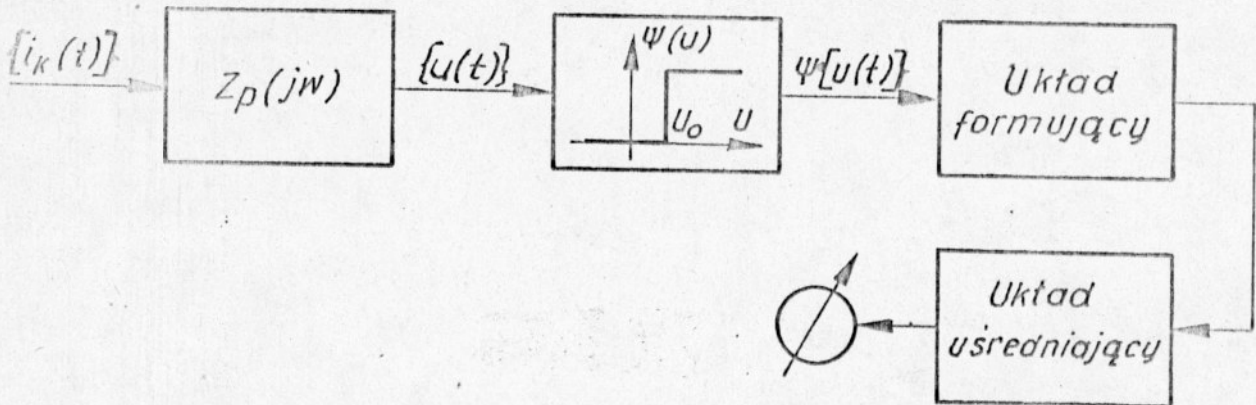
$$\psi(u) = \begin{cases} 0 & \text{dla } u < u_0 \\ A & \text{dla } u \geq u_0 \end{cases}, \text{układ formujący impulsy o stałym}$$

czasie trwania i amplitudzie, układ uśredniający.

a)



b)

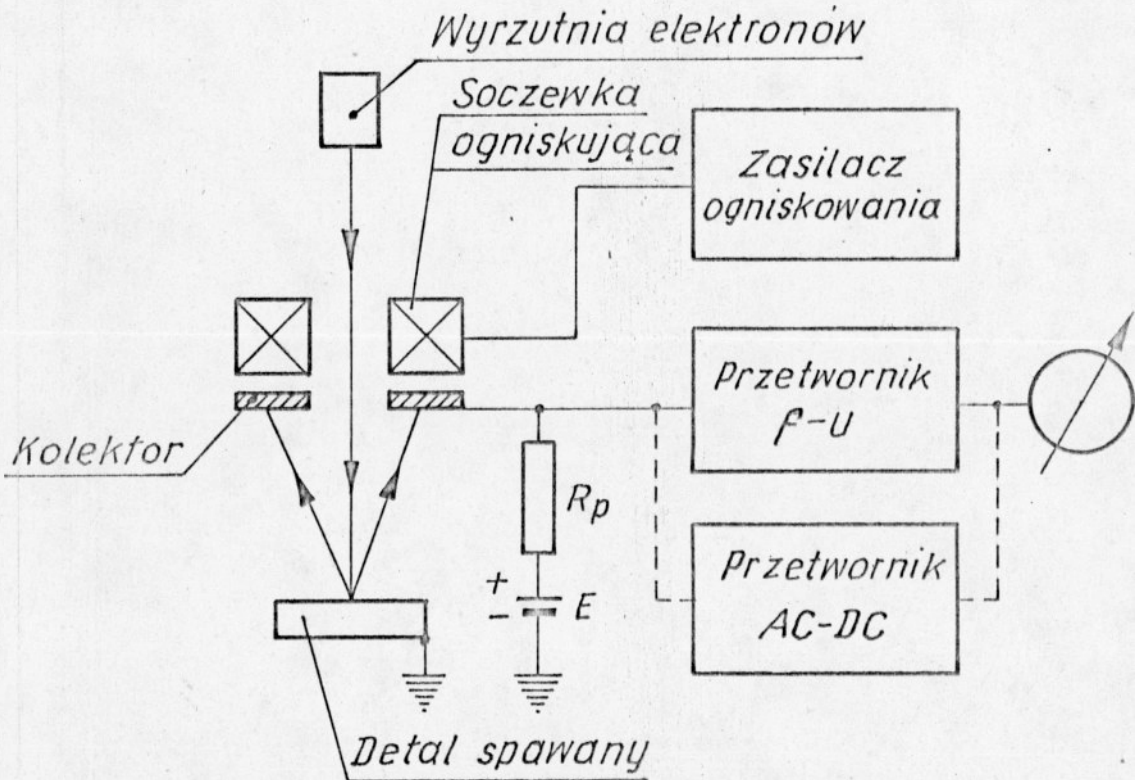


Rys. 6. Dwie wersje schematu blokowego układu do kontroli ogniskowania.

W niniejszej pracy badano poprawność przyjętej koncepcji układu do kontroli ogniskowania oceniając wartości oczekiwane $E\{u(t)\}$ i $E\{\lambda(u_0)\}$ w funkcji prądu soczewki ogniskującej. Okazało się, że zarówno średnia amplituda fluktuacji po ich wyprostowaniu jak też średnia częstotliwość zależą od zogniskowania wiązki elektronów.

Sposób kontroli ogniskowania wykorzystujący fluktuację prądu cząstek przedstawiono na rys. 7. W układzie tym kolektor rejestruje prąd elektronów emitowanych z obszaru oddziaływania wiązki z materiałem. Składowa zmienna tego prądu wytwarza na rezystorze R_p napięcie zmienne, które podawane jest na wejście przetwornika AC-DC lub na wejście przetwornika częstotliwość-napięcie. Na podstawie obserwacji wskazań miernika dołączonego do wyjścia przetwornika AC-DC lub przetwornika f-U można ustalić optymalny prąd soczewki ogniskującej I_{opt} .

Jeżeli wiązka elektronów jest rozogniskowana, a gęstość mocy w sąsiedztwie powierzchni spawanych detali jest niewystarczająca do topienia wówczas składowa zmienna napięcia na rezystorze R_p jest również niewielka i oba przetworniki prawie jej nie rejestrują. W miarę wzrostu prądu soczewki i skupiania wiązki w pobliżu powierzchni detali rozpoczyna się proces topienia, któremu towarzyszy gwałtowny wzrost wskazań obu przetworników. Przy małych mocach wiązki optymalne warunki ogniskowania uzyskuje się w chwili osiągnięcia maksymalnej wartości napięcia wyjściowego z przetworników /rys. 8a/. Przy dużych mocach wiązki, gdy w metalu spawanym tworzy się charakterystyczny kanał, przebieg napięcia wyjściowego przyjmuje postać pokazaną na rys. 8b,

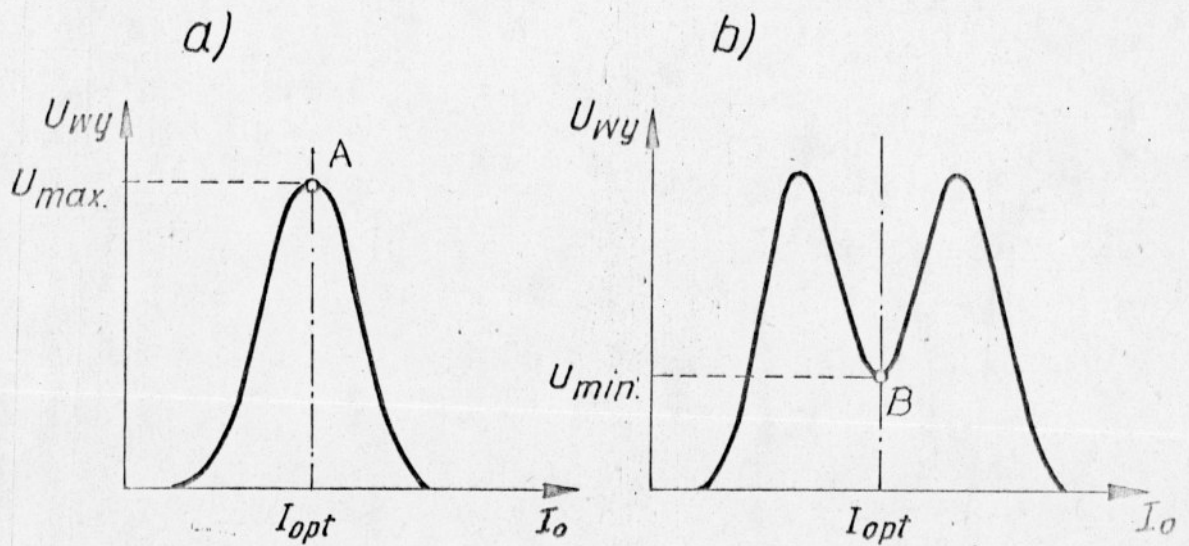


Rys. 7. Sposób kontroli ogniskowania wykorzystujący fluktuacje prądu cząstek emitowanych przez spawane detale.

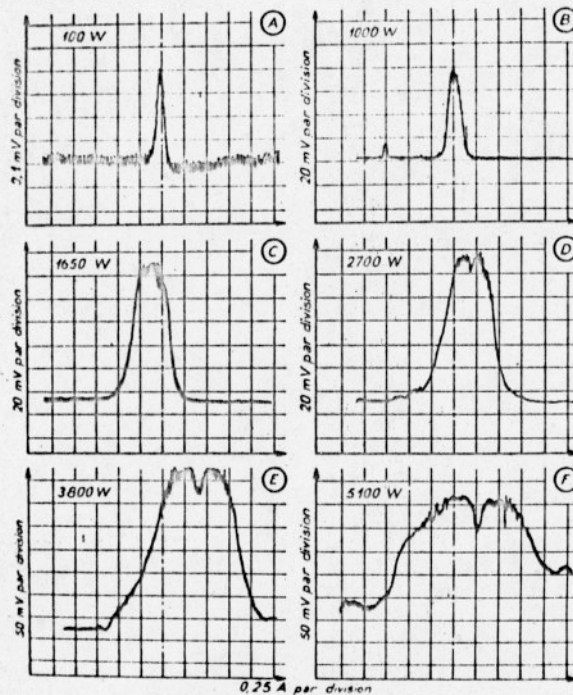
a optymalny prąd soczewki ogniskującej uzyskuje się w punkcie B tego przebiegu tj. w chwili osiągnięcia minimum napięcia wyjściowego z przetwornika $f-U$ lub AC-DC.

Podobne przebiegi uzyskuje się również przy wykorzystaniu do kontroli ogniskowania innych wielkości fizycznych [9,10,29].

Na rys. 9 pokazano przykładowo przebieg napięcia wyjściowego z detektora promieniowania podczerwonego emitowanego z obszaru spawania w funkcji prądu soczewki podany w pracy [10].



Rys. 8. Kształt napięcia wyjściowego z przetwornika AC-DC lub f-U w funkcji prądu soczewki ogniskującej: /a/ - przy małej mocy wiązki; /b/ - przy dużej mocy wiązki.



Diagrammes A & F. — V cellule I (I focalisation).

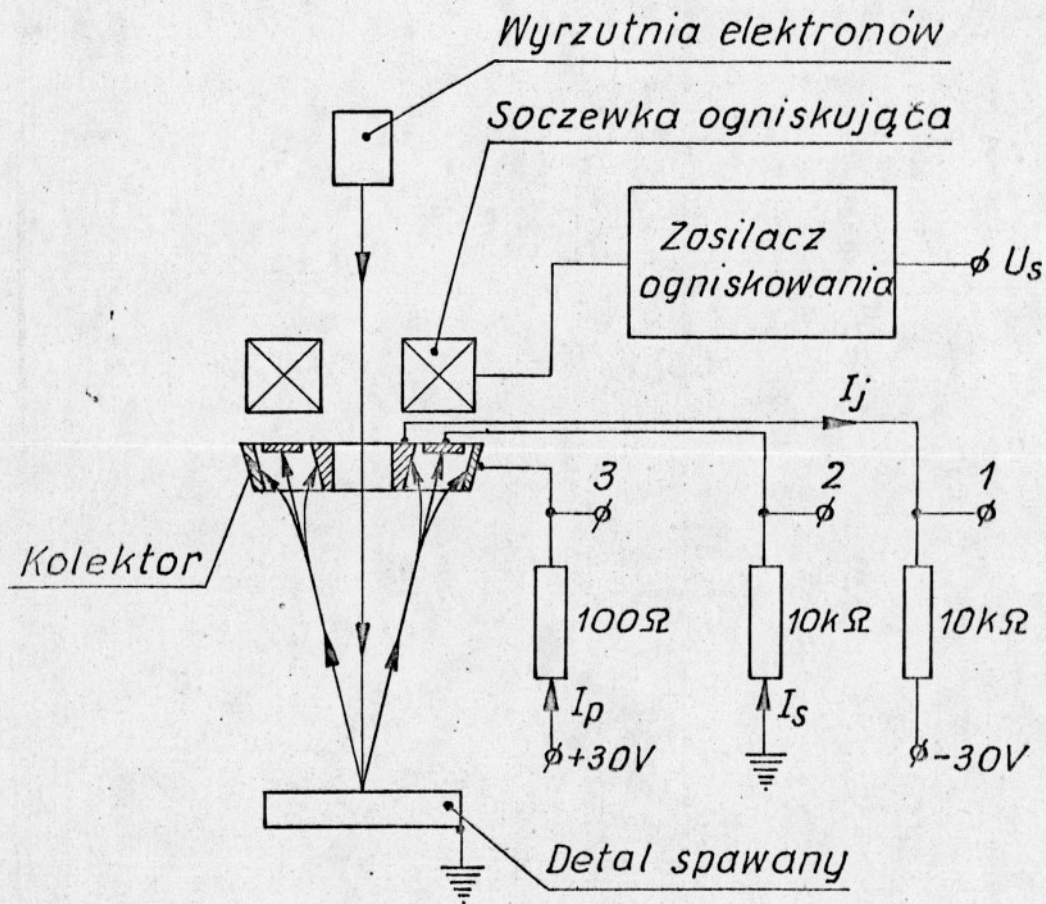
Rys. 9. Zależność natężenia promieniowania podczerwonego od prądu soczewki ogniskującej przy różnych mocach wiązki [10]. Materiał spawany stal nierdzewna.

1.4. Pomiary składowych zmiennych prądu cząstek emitowanych w czasie spawania wiązką elektronów

Pomiary składowych zmiennych prądu cząstek emitowanych w czasie spawania wykonano w układzie pomiarowym pokazanym na rys. 10.

Kolektor cząstek wykonano z dwóch współosiowych i wydrążonych stożków ściętych oraz pierścienia. Powierzchnie boczne stożków spolaryzowane przeciwnie względem masy spawarki stanowiły odpowiednio kolektor jonów i kolektor elektronów powolnych. Strumień elektronów powolnych tworzą: elektrony wtórne, elektrony wytworzone w procesie jonizacji oraz termoelektrony, które są dominującym składnikiem tego strumienia. Wytworzone między powierzchniami bocznymi stożków pole elektryczne rozdziela strumień cząstek na prąd jonów I_j oraz prąd elektronów powolnych I_p . Elektrony szybkie o dużych energiach przelatują przez obszar pola elektrycznego a ich tory ulegają jedynie niewielkiemu odchyleniu. Elektrony te padają na kolektor w kształcie pierścienia powodując przepływ prądu I_s . Fluktuacje prądu elektronów szybkich I_s , prądu elektronów powolnych I_p oraz prądu jonów I_j wytwarzają w punktach oznaczonych na rys. 10 cyframi 1, 2, 3 zmienne sygnały napięciowe. Sygnały te mierzone za pomocą przetwornika AC-DC typ AD-2B i rejestratora SP-6HV firmy Riken Denshi Co. Ltd.

Prąd soczewki zmieniano liniowo podając odpowiedni sygnał na wejście sterujące zasilacza ogniskowania spawarki WS-2/30. Prędkość narostu prądu soczewki $\frac{dI_0}{dt}$ wynosiła 1 A/min. Ponieważ



Rys. 10. Schemat układu do pomiaru składowych zmiennych prądu cząstek emitowanych przez detal spawany.

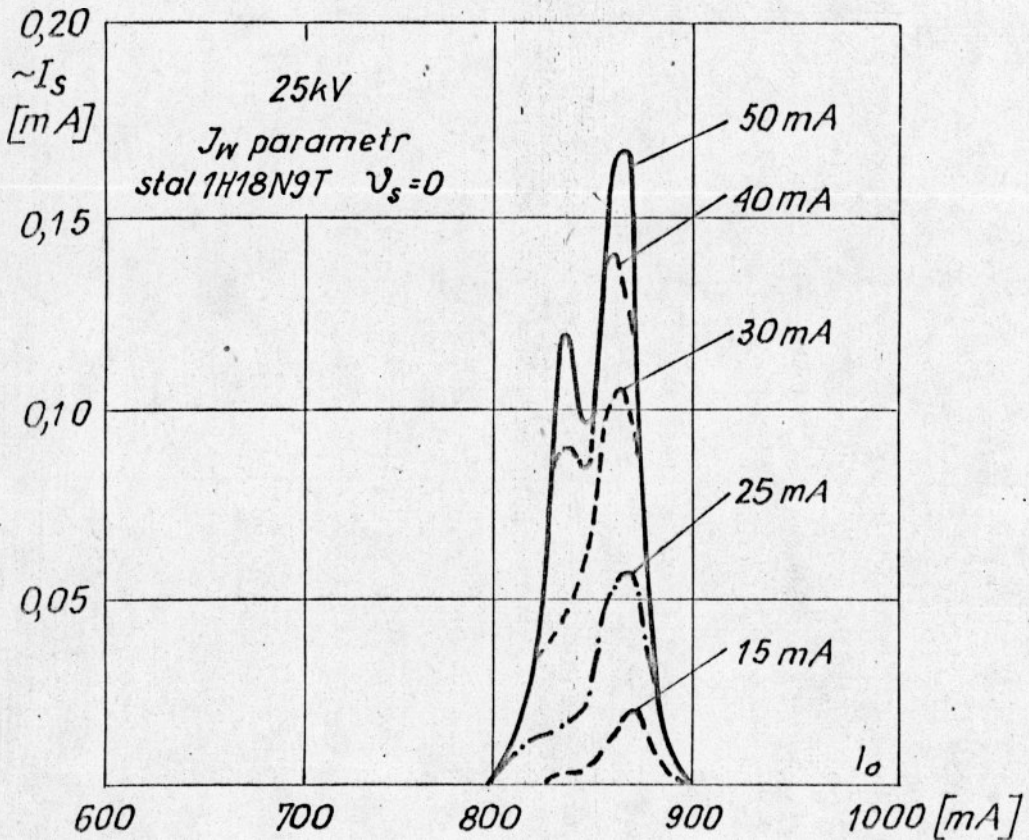
przetwornik AC-DC reaguje na wartość średnią modułu napięcia zmiennego $|u(t)|$, zatem zmierzona przez rejestrator wartość napięcia odpowiada oszacowaniu wartości oczekiwanej:

$$U_k = (\sim I_k) R_p = E \left\{ \left| \{ i_k(t) \} \right| \right\} R_p \quad /1-19/$$

gdzie: R_p - wartość rezystancji pomiarowej

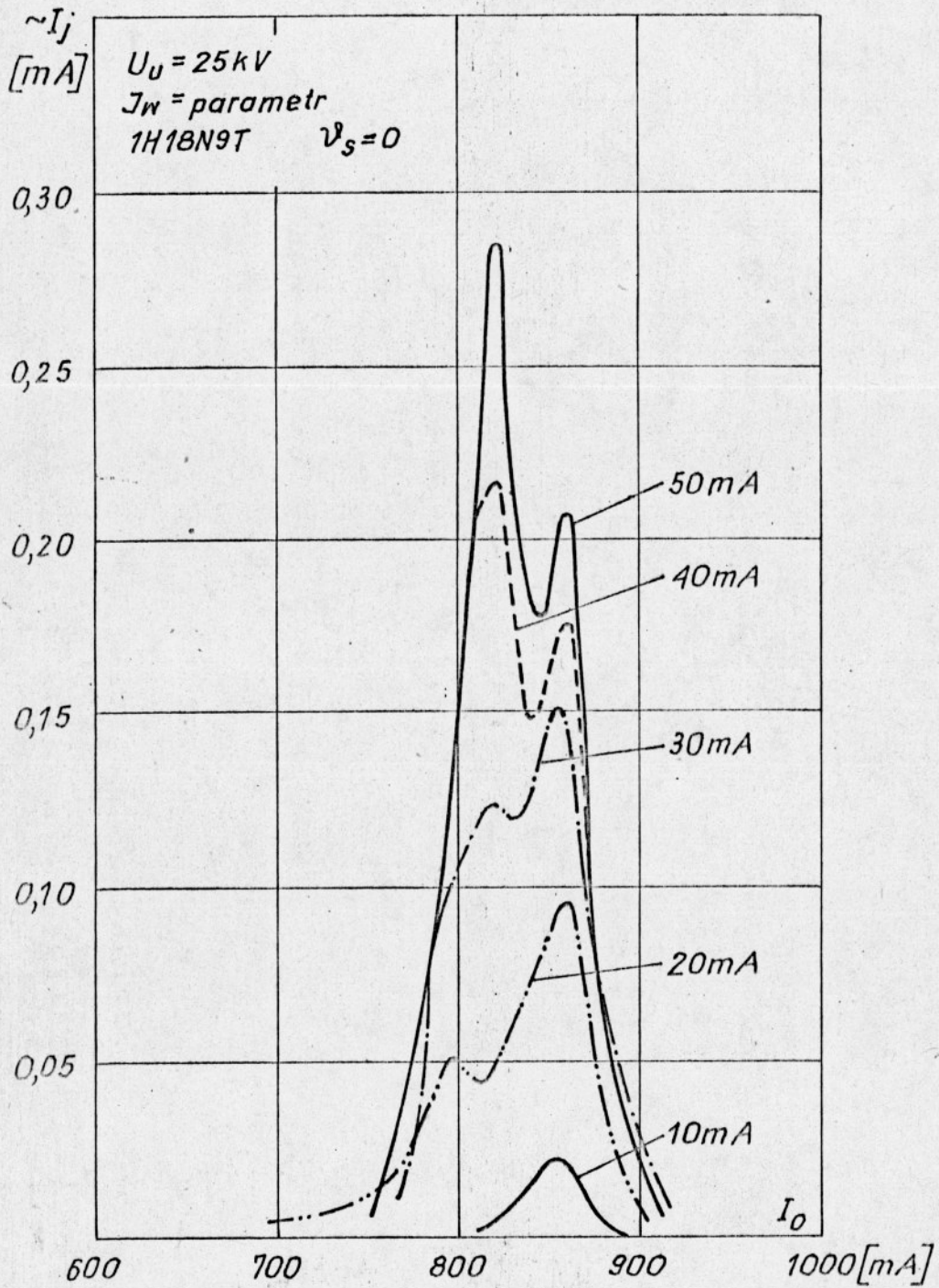
$\{ i_k(t) \}$ - składowa zmienna mierzonego prądu kolektora.

Na rys. 11 pokazano wyniki pomiarów składowej zmiennej prądu elektronów szybkich $\sim I_s$ w funkcji prądu ogniskowania przy różnych prądach wiązki.

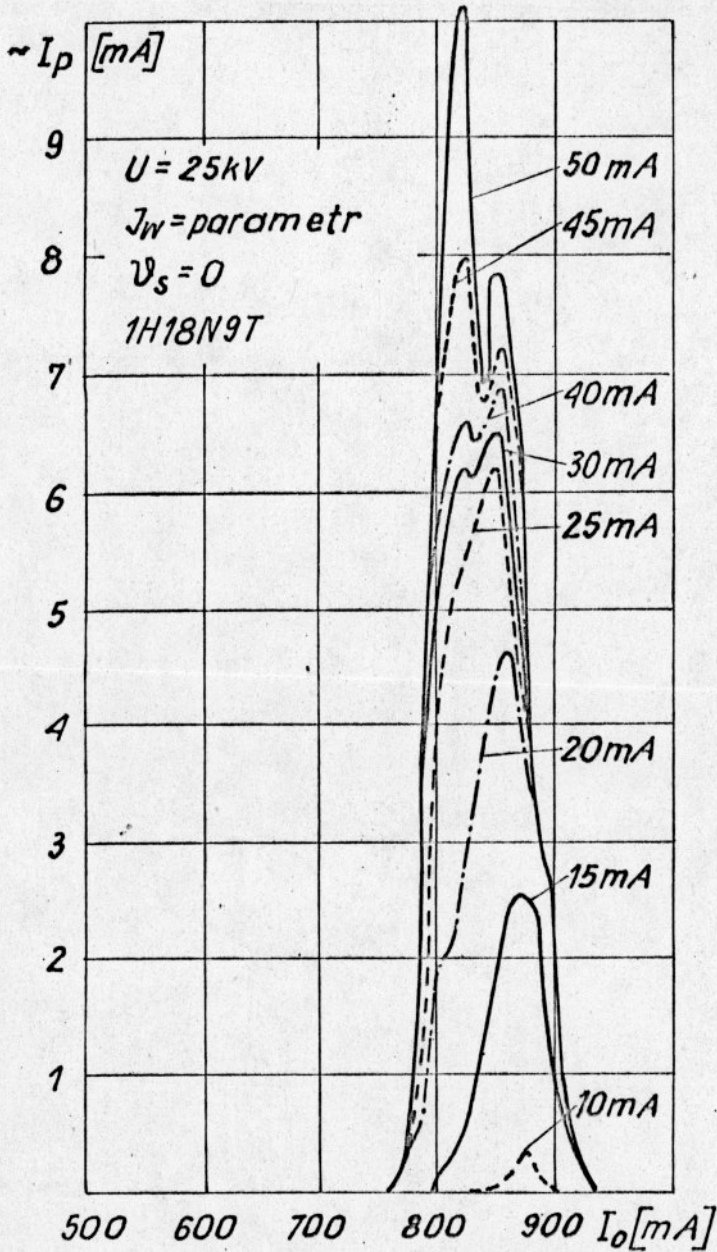


Rys. 11. Składowa zmienna prądu elektronów szybkich $\sim I_s$ w funkcji prądu ogniskowania przy różnych prądach wiązki.

Podobne zależności składowej zmiennej prądu jonów $\sim I_j$ i elektronów powolnych $\sim I_p$ pokazano na rysunkach 12 i 13.



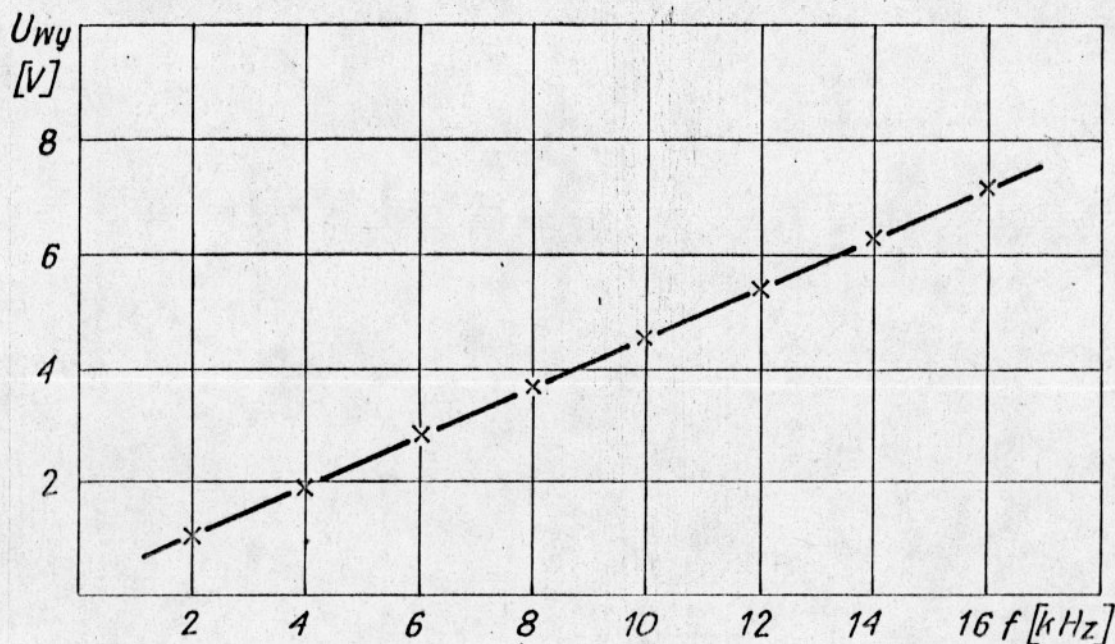
Bys. 12. Składowa zmienna prądu jonów $\sim I_j$ w funkcji prądu ogniskowania przy różnych prądach wiązki.



Rys. 13. Składowa zmienna elektronów powolnych $\sim I_p$ w funkcji prądu ogniskowania przy różnych prądach wiązki.

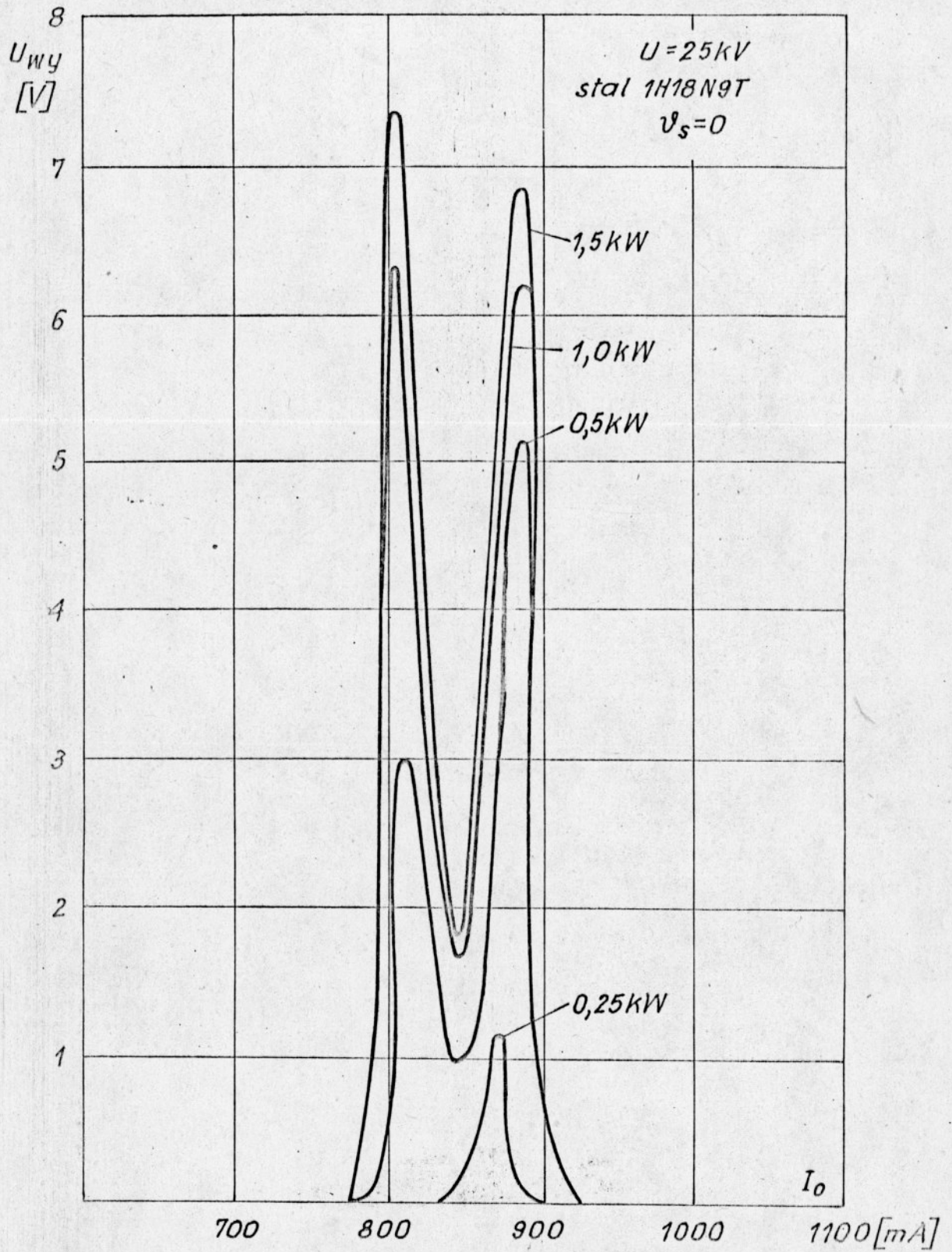
Pomiary średniej częstotliwości fluktuacji wykonano w układzie przedstawionym na rys. 10. dołączając do punktów 1, 2, 3 przetwornik częstotliwości napięcia. Charakterystykę wykonanego przetwornika pokazano na rysunku 14.

Jak widać, napięcie na wyjściu przetwornika w zakresie częstotliwości akustycznych jest proporcjonalna do częstotliwości. Mierzając tym przetwornikiem fluktuacje prądu cząstek można więc uważać, że napięcie na wyjściu jest proporcjonalne do średniej



Rys. 14. Charakterystyka $U_{wy} = f(f)$ przetwornika
częstotliwość-napięcie.

częstotliwości fluktuacji $E\{\lambda(u_0)\}$. Poziom u_0 ustalono doświadczalnie na wartość około 20 mV tj. powyżej progu zakłóceń zewnętrznych. Na rysunku 15 pokazano zależność napięcia wyjściowego z przetwornika $f-U$ przy różnych mocach wiązki w przypadku gdy przetwornik podłączono do kolektora elektronów powolnych. Charakter zależności podanych na rysunkach 11, 12, 13, 15 nie ulega zasadniczym zmianom przy zmianie materiału spawanego.



Rys. 15. Zależność napięcia wyjściowego z przetwornika f-U od prądu ogniskowania przy różnych mocach wiązki.

1.5. Interpretacja uzyskanych przebiegów napięć wyjściowych z przetworników

Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów zarówno średnia częstotliwość jak i średnia amplituda fluktuacji prądu cząstek emitowanych w czasie spawania zależą od prądu soczewki ogniskującej. Po przekroczeniu pewnego progu mocy wiązki rzędu kilkuset watów przebieg obu tych wielkości w funkcji prądu soczewki ma kształt zbliżony do litery M. Natomiast w przypadku małych mocy przebiegi te charakteryzują się występowaniem tylko jednego maksimum. Podobne kształty przebiegów innych sygnałów wykorzystywanych do kontroli ogniskowania [9,10,27,29,32] sugerują istnienie wspólnej przyczyny powodującej powstanie jakościowo podobnych zależności różnych wielkości fizycznych od prądu soczewki ogniskującej. Obserwując kształty przetopów wykonanych różnymi mocami wiązki elektronowej zauważa się również charakterystyczne przejście od przetopu hemisferycznego do tzw. przetopu "głębokiego". Ma to miejsce wówczas gdy zaistnieją warunki sprzyjające wytworzeniu charakterystycznego kanału podczas spawania. Istnienie kanału, pozwalającego na głęboką penetrację wiązki w metal, można uznać za wspólną przyczynę charakterystycznego przebiegu różnych wielkości fizycznych w funkcji prądu soczewki ogniskującej. I tak np.:

- minimum na "krzywej M" przebiegu składowej stałej prądu jonów [29] tłumaczy się zmniejszeniem ilości czynnika jonizującego w wyniku przechwyty znacznej liczby emitowanych

elektronów przez ścianki głębokiego i wąskiego kanału,
- podczas powstania kanału obszar o najwyższej temperaturze
przesuwa się w głąb metalu w wyniku czego maleje emisja
promieniowania podczerwonego [10] i termoemisja [29] .

Kanał wytworzony przez wiązkę działa więc jak ekran zmniejszają-
cy ilość promieniowania elektromagnetycznego oraz liczbę cząstek
mogących się wydostać z obszaru o największej temperaturze. Po-
woduje on również zmiany rozkładu przestrzennego emitowanych elek-
tronów i par metalu w obszarze nad spawanymi detalami.

Powstanie charakterystycznego przejścia od "krzywej M" do
krzywej z jednym maksimum można wiązać ze stopniowym zanikiem
strefy aktywnej wiązki elektronowej tj. obszaru w którym gęstość
mocy przekracza pewną wartość krytyczną, charakterystyczną dla
każdego materiału.

Wiązkę elektronów o danym rozkładzie gęstości prądu i na-
pięciu U można traktować z energetycznego punktu widzenia, jako
źródło energii o rozkładzie gęstości mocy:

$$p(r, \varphi, z) = j(r, \varphi, z) U \quad /1-20/$$

Zmiana warunków ogniskowania powoduje zmianę tego rozkładu.

Chcąc określić kształt strefy aktywnej należy rozwiązać równa-
nie:

$$p(r, \varphi, z) = p_{kr} \quad /1-21/$$

gdzie: $p(r, \varphi, z)$ - rozkład gęstości mocy wyrażony w przyjętym
układzie współrzędnych cylindrycznych,

p_{kr} - krytyczna wartość gęstości mocy.

Równanie to przedstawia równanie powierzchni o stałej gęstości mocy równej gęstości krytycznej. Powierzchnia opisana równaniem ogranicza więc pewien obszar wiązki, określane jako strefa aktywna wiązki elektronów. Ponieważ w praktyce nie jest znany rozkład $p(r, \varphi, z)$, a próba jego obliczenia napotyka na poważne trudności, do rozważań jakościowych przyjęto zgodnie z pracą [16], że rozkład ten jest rozkładem gaussowskim:

$$p(r, z) = \frac{P}{2\pi(\tilde{\sigma}_p^2 + \alpha^2 z^2)} e^{-\frac{r^2}{2(\tilde{\sigma}_p^2 + \alpha^2 z^2)}} \quad /1-22/$$

gdzie: P - moc wiązki elektronów,

$\tilde{\sigma}_p^2$ - dyspersja rozkładu w płaszczyźnie przewężenia wiązki tj. w płaszczyźnie $z=0$,

α - kąt zbieżności wiązki elektronów.

Równanie:

$$P_{kr} = \frac{P}{2\pi(\tilde{\sigma}_p^2 + \alpha^2 z^2)} e^{-\frac{r^2}{2(\tilde{\sigma}_p^2 + \alpha^2 z^2)}} \quad /1-23/$$

przedstawić można w postaci parametrycznej:

$$r = \sqrt{2} \tilde{\sigma}_p \sqrt{\frac{P_p}{P_{kr}} \frac{\ln t}{t}} \quad /1-24/$$

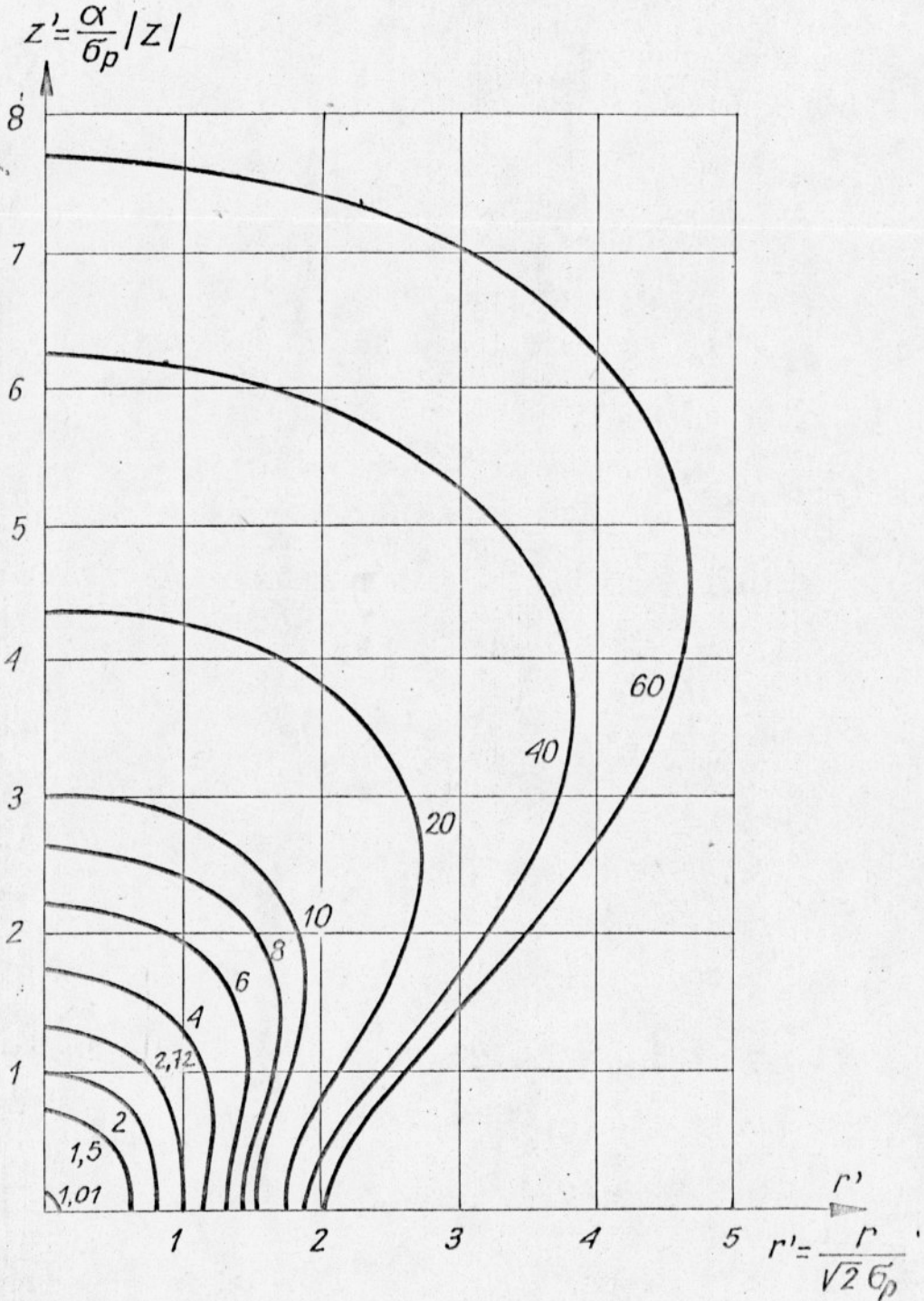
$$|z| = \frac{\tilde{\sigma}_p}{\alpha} \sqrt{\frac{P_p}{P_{kr}} \frac{1}{t} - 1} \quad /1-25/$$

gdzie parametr t zmienia się w przedziale $\left[1, \frac{P_p}{P_{kr}}\right]$.

a
$$P_p = \frac{P}{2\pi \tilde{\sigma}_p^2} \quad /1-26/$$

Na rysunku 16 pokazano przekrój strefy aktywnej płaszczyzną

$\varphi = \text{const}$ w układzie współrzędnych zredukowanych $z' = \frac{\alpha}{\delta_p} |z|$
 $r' = \frac{r}{\sqrt{2} \delta_p}$ dla kilku wartości $\frac{P_D}{P_{kr}}$.



Rys. 16. Kształt strefy aktywnej dla wiązki o gaussowskim rozkładzie gęstości mocy przy różnych wartościach $\frac{P_D}{P_{kr}}$.

$\frac{P_D}{P_{kr}}$

Jak widać na rysunku 16 strefa aktywna może zmieniać swój kształt w zależności od stosunku $\frac{P_p}{P_{kr}}$, z faktem tym można wiązać charakterystyczne przejście od "krzywej M" do krzywej z 1 maksimum.

1.6. Podsumowanie

W czasie spawania wiązką elektronów występują fluktuacje prądu cząstek emitowanych przez detal spawany. Istnienie fluktuacji związane jest z dynamicznym charakterem zjawisk towarzyszących procesowi oddziaływania wiązki elektronów z materiałem spawanym. Wartość fluktuacji prądu cząstek jest tego samego rzędu co wartość składowych stałych poszczególnych prądów emitowanych ze strefy spawania.

Charakter fluktuacji, a ściślej ich rozkład widmowy, średnia amplituda i średnia częstotliwość zależą od warunków ogniskowania wiązki. Zależność ta może być wykorzystana do kontroli ogniskowania wiązki elektronów w spawarkach elektronowiązkowych.

2. WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI PROPONOWANEJ METODY KONTROLI OGNISKOWANIA

Chcąc uniknąć przypadkowych i błędnych wniosków, weryfikację poprawności proponowanej metody kontroli ogniskowania przeprowadzono kilkoma sposobami, a mianowicie:

- wykonywano przetopy przy liniowej zmianie prądu soczewki ogniskującej rejestrując charakterystykę $U_{wy} = f(t)$ i analizując kształt przekroju wzdłużnego przetopów,
- mierzono prąd przechodzący przez próbkę,
- porównano uzyskane wyniki z wynikami otrzymanymi przy pomocy innej znanej metody kontroli ogniskowania [29] .

Przetopy wykonywano w materiale litym eliminując wpływ dopasowania detali na kształt spoiny oraz konieczność precyzyjnego ustawiania próbek względem wiązki.

2.1. Analiza kształtu uzyskiwanych przetopów

Jako kryterium optymalizacji kształtu przetopu a tym samym i spoiny /przy zachowaniu dobrego dopasowania łączonych detali/ przyjmuje się często wartość parametru:

$$k_s = \frac{P}{V_s h} \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad /2-1/$$

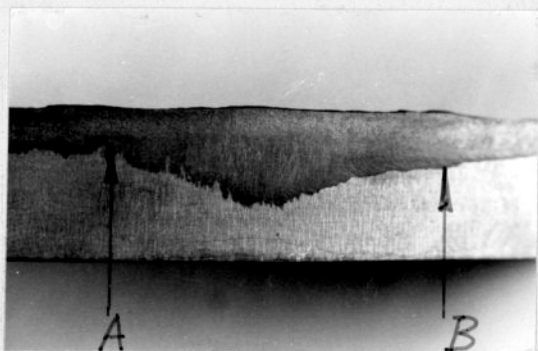
gdzie: P - oznacza moc wiązki,

V_s - prędkość spawania,

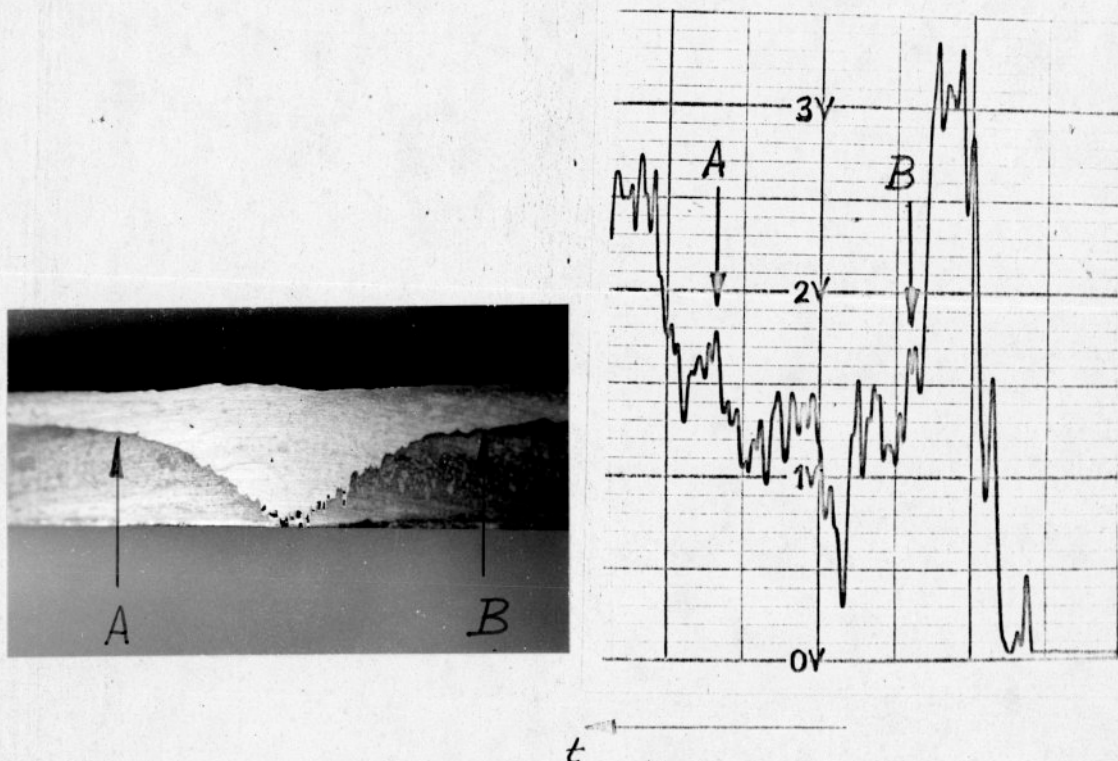
h - głębokość przetopu.

Parametr k_s określa energię zużywaną na wykonanie spoiny o jednostkowej długości i odniesioną do głębokości spoiny lub inaczej energią zużytą na jednostkę pola powierzchni przekroju wzdłużnego złącza. Kształt spoiny uważa się za optymalny jeżeli parametr ten osiąga wartość minimalną. Przy stałych parametrach spawania minimalną wartość k_s uzyskuje się przez dobór prądu soczewki ogniskującej, przy którym głębokość przetopu jest w danych warunkach największa.

Na rysunkach 17 i 18 przedstawiono fragmenty przekrojów wzdłużnych uzyskanych dla stali 1H18N9T i aluminium PA1 przy liniowej zmianie prądu soczewki ogniskującej i zmierzone w tych warunkach napięcie $U_{wy} = f(t)$.



Rys. 17. Przekrój wzdłużny przez przetop w stali 1H18N9T /a/ oraz charakterystyka $U_{wy} = f(t)$ /b/. Warunki spawania: $U = 30V$, $I = 67 mA$, $V_s = 40 cm/min$, $\frac{dI}{dt} = 1 A/min$.



Rys. 18. Przekrój wzdłużny przez przetop w aluminium PA1 /a/ oraz charakterystyka $U_{wy} = f(t)$ /b/. Warunki spawania: $U = 30$ kV, $I = 67$ mA, $V_s = 50$ cm/min, $\frac{dI_0}{dt} = 2$ A/min.

Jak widać, na obu rysunkach maksimum głębokości przetopu osiąga się przy minimum napięcia wyjściowego z przetwornika f-U. Ten sposób weryfikacji nie pozwala jednak na ilościowe określenie korelacji między wartościami prądu ogniskowania, przy których występuje maksimum głębokości przetopu i minimum średniej częstotliwości fluktuacji oraz na wyznaczenie dopuszczalnego przedziału odchyień. Ilościowe dane o położeniu maksimum głębokości przetopu względem minimum charakterystyki $U_{wy} = f(I_0)$ uzyskano w opracowanej przez autora metodzie weryfikacji opartej na pomiarze prądu przechodzącego przez spawaną próbkę.

2.2. Prąd przechodzący przez próbkę

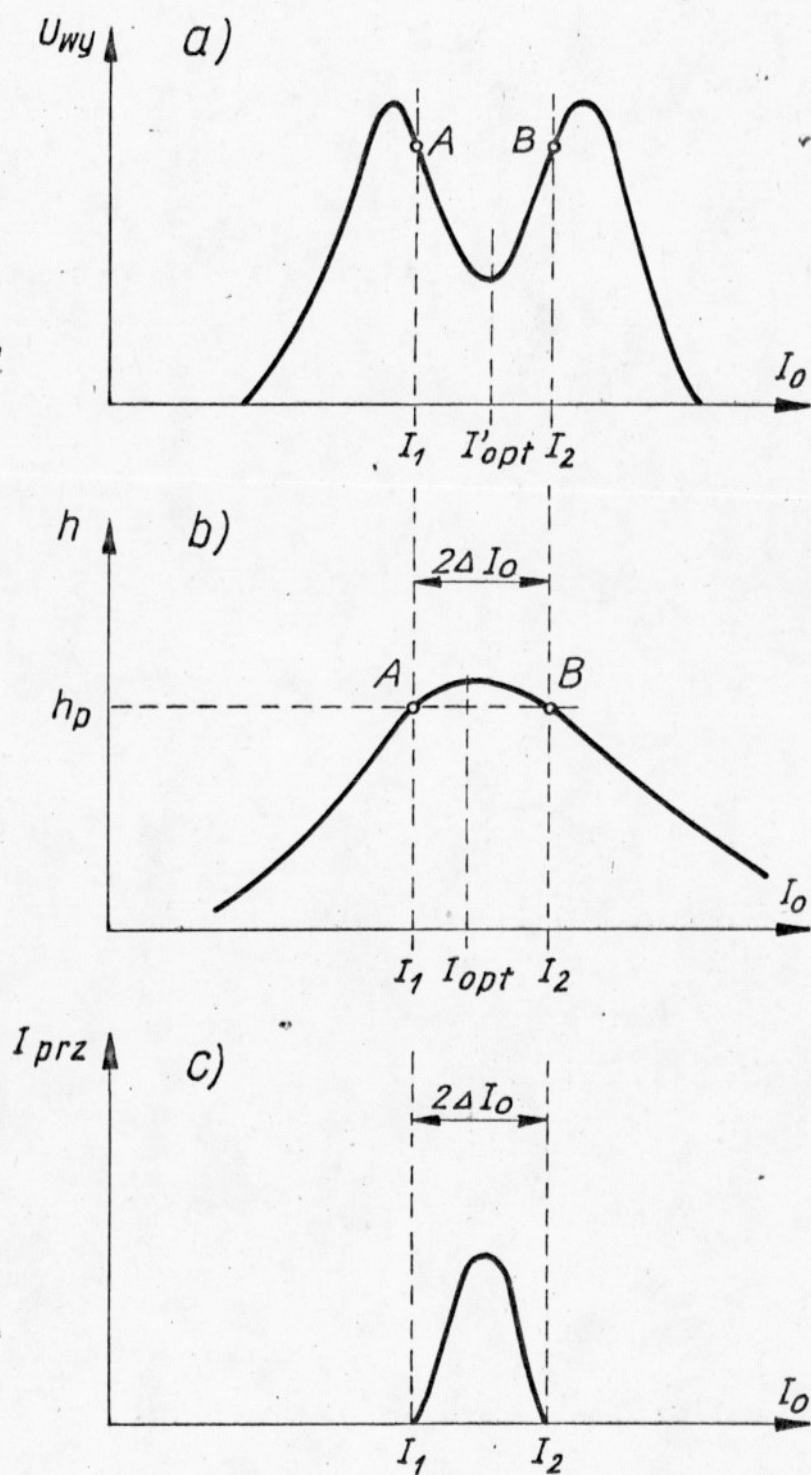
Dane ilościowe o położeniu maksimum głębokości przetopu względem minimum krzywej $U_{wy} = f(I_0)$ lub krzywej $U_{wy} = f(z)$ uzyskano mierząc jednocześnie prąd przechodzący przez spawaną próbkę oraz napięcie wyjściowe z przetwornika $f-U$ przy liniowej zmianie prądu soczewki względnie przy liniowej zmianie położenia spawanych próbek wzdłuż osi z . Liniową zmianę położenia próbek uzyskano przez pochylenie ich pod kątem 30° do płaszczyzny stolika.

Prąd przechodzący rejestrowano mierząc spadek napięcia na rezystorze $R_p = 1 \text{ k}\Omega$, łączącym dodatkowy kolektor z masą urządzenia. Kolektor ten mocowano pod spawanymi próbkami. Pomiarów wykonano dwukanałowym rejestratorem X-t firmy Riken Denshi Co. Ltd. Prąd przechodzący przez próbkę tworzą: elektrony pierwotne, elektrony wtórnie emitowane ze ścianek kanału oraz termoelektrony.

Idea wykorzystania prądu przechodzącego do weryfikacji metody kontroli ogniskowania oparta jest na następujących przesłankach:

- pojawienie się prądu przechodzącego przez próbkę świadczy o jej przetopieniu,
- przy pewnej wartości prądu soczewki ogniskującej prąd przechodzący powinien osiągnąć wartość maksymalną,
- maksimum głębokości przetopu leży w takim przedziale zmian prądu soczewki ogniskującej lub przedziale zmian położenia Δz spawanych próbek w którym obserwuje się prąd przechodzący $I_{prz} \neq 0$.

Jak wynika z rysunku 19 optymalna wartość prądu soczewki ogniskującej I_{opt} zawarta jest w przedziale $[I_1, I_2]$ i może być



Rys. 19. Zależność napięcia wyjściowego z przetwornika f-U /a/, głębokości przetopu /b/ oraz prądu przechodzącego I_{prz} przez próbkę o grubości h_p /c/ od prądu soczewki ogniskującej I_0 .

określona z błędem:

$$\delta_{I_0} < \frac{2\Delta I_0}{I_{opt}} \approx \frac{\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}}{2} = 2 \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad /2-2/$$

Zwiększenie dokładności metody można uzyskać w praktyce jedynie poprzez zmniejszenie wartości $2\Delta I_0$. Wymaga to odpowiedniego doboru mocy wiązki, tak aby maksymalna głębokość uzyskiwanych przetopów była równa grubości spawanej próbki. Znajomość przedziału $2\Delta I_0$, w którym zawarta jest optymalna wartość prądu ogniskowania pozwala wyznaczyć zakres charakterystyki $U_{wy} = f(I_0)$, w którym występuje maksymalna głębokość przetopu, a tym samym zweryfikować zaproponowaną metodę kontroli ogniskowania. Wyniki pomiarów podano w dodatku na rys. 13d + 23d, gdzie zaznaczono przedziały $2\Delta I_0$ i $2\Delta z$ z uwzględnieniem przesunięcia pisaków rejestratora, które wynosiło 3 mm.

W tabeli 1 zestawiono: parametry spawania, błąd określenia optymalnego prądu soczewki δ_{I_0} i względne przesunięcie minimum napięcia wyjściowego z przetwornika f-U w stosunku do środka przedziału $[I_1, I_2]$ oznaczone jako δ_p :

$$\delta_p = \left(\frac{2 I'_{opt}}{I_1 + I_2} - 1 \right) 100\% \quad /2-3/$$

Uzyskane rezultaty w pełni potwierdzają możliwość wykorzystania fluktuacji prądu cząstek do kontroli ogniskowania. Dla pełniejszego udokumentowania poprawności tej metody kontroli ogniskowania porównano ją z metodą kontroli ogniskowania opartą na pomiarach składowych stałych prądu cząstek emitowanych przez spawane detale [29].

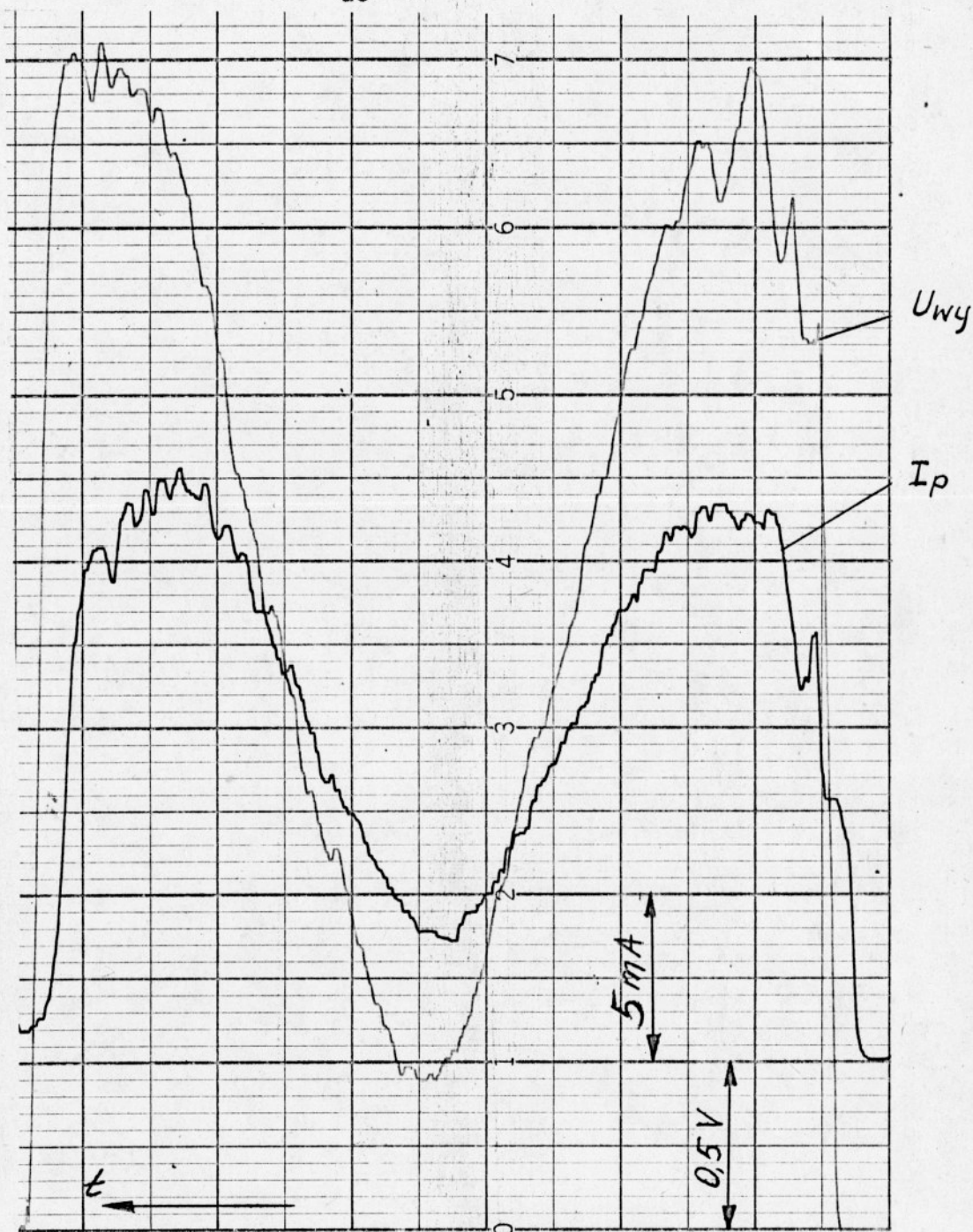
Tabela 1

Parametry spawania						δ_{I_0}	δ_p
Materiał	Gru- bość [mm]	U [kV]	I [mA]	V _s [$\frac{cm}{min}$]	$\frac{dI_0}{dt}$ [$\frac{A}{min}$]		
1H18N9T	8,0	25	80	40	1,0	0,7	0,00
1H18N9T	2,0	25	26	80	1,0	4,8	+0,15
1H18N9T	3,0	25	30	20	1,0	2,2	-0,55
1H18N9T	2,0	25	27	100	1,0	4,6	+0,02
PA1	8,0	25	80	80	0,4	2,0	+0,50
PA4	3,0	25	35	60	1,0	1,7	-1,50
PA6	5,0	25	60	60	1,0	2,0	-0,15
M1G	3,5	25	80	80	1,0	2,8	+0,54
M1G	2,0	25	55	60	1,0	1,2	+0,32
M1G	1,5	25	40	60	1,0	2,0	0,00
M1G	1,0	25	36	100	2,0	4,8	+0,12

2.3. Składowe stałe prądu oząstek a średnia częstotliwość fluktuacji

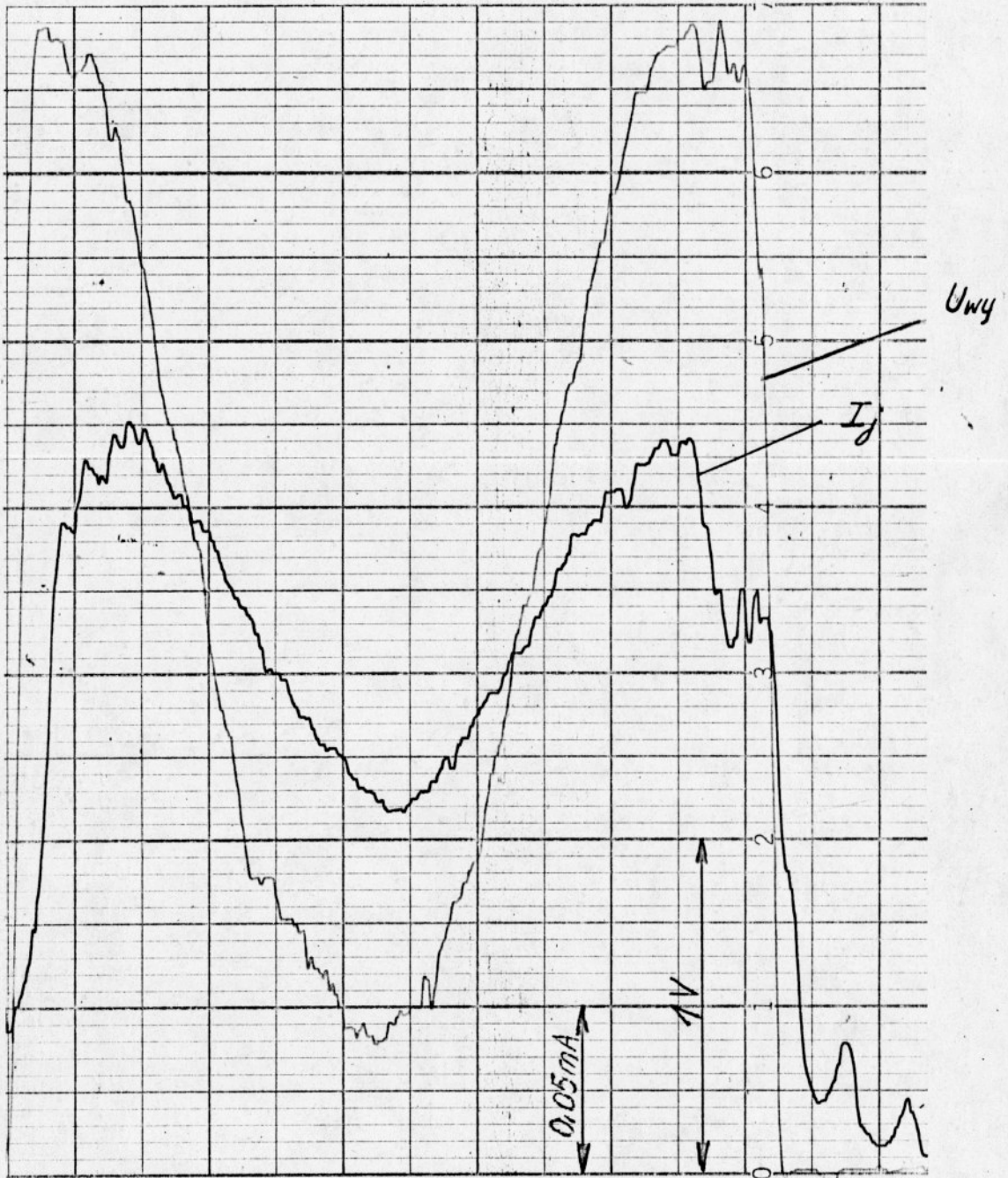
Schemat układu pomiarowego do rejestracji składowych stałych prądu oząstek emitowanych ze strefy oddziaływania wiązki elektronów ze spawanym materiałem pokazano na rys. 10. Składowe te mierzono przy pomocy dwukanałowego rejestratora X-t typu SP-H6V firmy Riken Denshi Co. Ltd. dołączając jeden kanał do jednego z punktów pomiarowych 1,2 lub 3 a drugi kanał rejestratora do wyjścia przetwornika f-U. Wejście przetwornika dołączono do punktu 3 mierząc średnią częstotliwość elektronów powolnych.

Rejestrowano więc jednocześnie średnią częstotliwość fluktuacji prądu elektronów powolnych /a ściślej napięcie wyjściowe z przetwornika proporcjonalne do średniej częstotliwości fluktuacji/ i jedną ze składowych stałych: składową stałą prądu elektronów powolnych I_p /rys. 24d i 25d w dodatku/, składową stałą elektronów szybkich I_s /rys. 26d i 27d/ lub składową stałą prądu jonów I_j /rys. 28d i 29d/. Na rysunkach tych pokazano jednocześnie przebiegi napięcia wyjściowego z przetwornika $f-U$ i poszczególnych składowych stałych I_p , I_s , I_j w funkcji czasu przy liniowej zmianie prądu soczewki w zakresie od $0,5 + 1,5A$. Uwzględniając wzajemne przesunięcie obu pisaków, które w stosowanym rejestratorze wynosiło 3 mm, można bez trudu na podstawie zamieszczonych w dodatku rys. 24d + 29d stwierdzić, że minima składowych stałych poszczególnych składników prądu cząstek emitowanych przez detal spawany i minima średniej częstotliwości fluktuacji prądu elektronów powolnych występują w tej samej chwili. Efekt ten wyraźnie widać na rys. 20 i 21, na których specjalnie "rozciągnięto" wykresy przez zmniejszenie prędkości narostu prądu soczewki ogniskującej $\frac{dI_0}{dt}$.



Rys. 20. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu elektronów powolnych I_p w funkcji czasu przy liniowych zmianach prądu soczewki ogniskującej.

Parametry spawania: $U = 25\text{kV}$, $I = 40\text{ mA}$, $V_s = 0$,
 $\frac{dI}{dt} = 0,2\text{ A/min}$, materiał - stal 1H18N9T.



Rys. 21. Przebieg napięcia wyjściowego przetwornika f-U i prądu jonów I_j w funkcji czasu przy liniowych zmianach prądu soczewki ogniskującej. Parametry spawania: $U = 25 \text{ kV}$, $I = 40 \text{ mA}$, $V_s = 0$, $\frac{dI}{dt} = 0,2 \text{ A/min}$, materiał stal 1H18N9T.

2.4. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych testów upoważniają do stwierdzenia w sposób jednoznaczny, że fluktuacje prądu cząstek zawierają informacje o warunkach ogniskowania wiązki elektronowej i mogą służyć do ustalenia optymalnych warunków ogniskowania.

Tym samym potwierdzona została główna teza niniejszej rozprawy i powstały możliwości praktycznego wykorzystania zaobserwowanego efektu w technice spawania elektronowego.

Porównując proponowaną metodę opartą na pomiarze średniej częstotliwości ze znaną metodą opartą na pomiarach składowych stałych można stwierdzić, że obie metody dają identyczne rezultaty, przy czym proponowana metoda charakteryzuje się następującymi zaletami:

- sygnały uzyskiwane przy małych prądach wiązki są większe,
- prąd wiązki w mniejszym stopniu wpływa na wartość sygnału,
- minimum sygnału jest "wyraźniejsze",
- istnieją proste możliwości galwanicznego oddzielenia obwodu kolektora od reszty układu kontroli ogniskowania ze względu na przenoszenie sygnału zmiennego,
- można stosować prosty kolektor bez separacji energetycznej cząstek emitowanych i bez źródeł polaryzacji.

3. UKŁAD DO AUTOMATYCZNEGO OGNISKOWANIA WIĄZKI ELEKTRONÓW

3.1. Wymagania stawiane układom do automatycznego ogniskowania wiązki elektronów

Układ do automatycznego ogniskowania powinien:

- 1/ ustalić optymalną wartość prądu soczewki ogniskującej I_{opt} w możliwie najkrótszym czasie,
- 2/ zapewnić stabilizację tej wartości prądu soczewki celem wyeliminowania wpływu ewentualnych zakłóceń.

Ustalenie optymalnej wartości prądu ogniskowania obarczone jest zawsze pewnym błędem. Skuteczność działania układu można określić przy pomocy współczynnika

$$\beta = \frac{h}{h_{max}} \cdot 100 \% \quad /3-1/$$

gdzie: h - głębokość przetopu uzyskana przy zastosowaniu układu automatycznego ogniskowania,

h_{max} - maksymalna wartość głębokości przetopu.

W fazie precyzowania założeń do układu automatycznego ogniskowania zrezygnowano z wymagań odnośnie regulacji prądu podczas procesu spawania, z uwagi na to, że układy regulacji ekstremalnej wymagają wprowadzenia drgań prądu soczewki aby proces regulacji był zbieżny do ekstremum w warunkach istnienia zakłóceń. Drgania prądu soczewki wprowadzałyby więc wahania głębokości przetopu. Zdecydowano, że układ powinien zapamiętywać wyszukaną wartość optymalnego prądu ogniskowania przez możliwie długi okres czasu.

Wymagania odnośnie zapewnienia wysokiej skuteczności działania układu i możliwie krótkiego czasu wyszukiwania optymalnej wartości prądu ogniskowania są wzajemnie sprzeczne. Zmniejszenie czasu wyszukania wymaga stosowania większych szybkości narostu prądu $\frac{dI_0}{dt}$, co z uwagi na inercję związaną z topieniem się spawanego materiału powoduje malenie sygnałów uzyskiwanych z układów kontroli ogniskowania. W granicznym przypadku przy bardzo dużych szybkościach narostu prądu $\frac{dI_0}{dt}$ może zanikać efekt topienia materiału przez wiązkę i wartość uzyskiwanych sygnałów maleje praktycznie do zera.

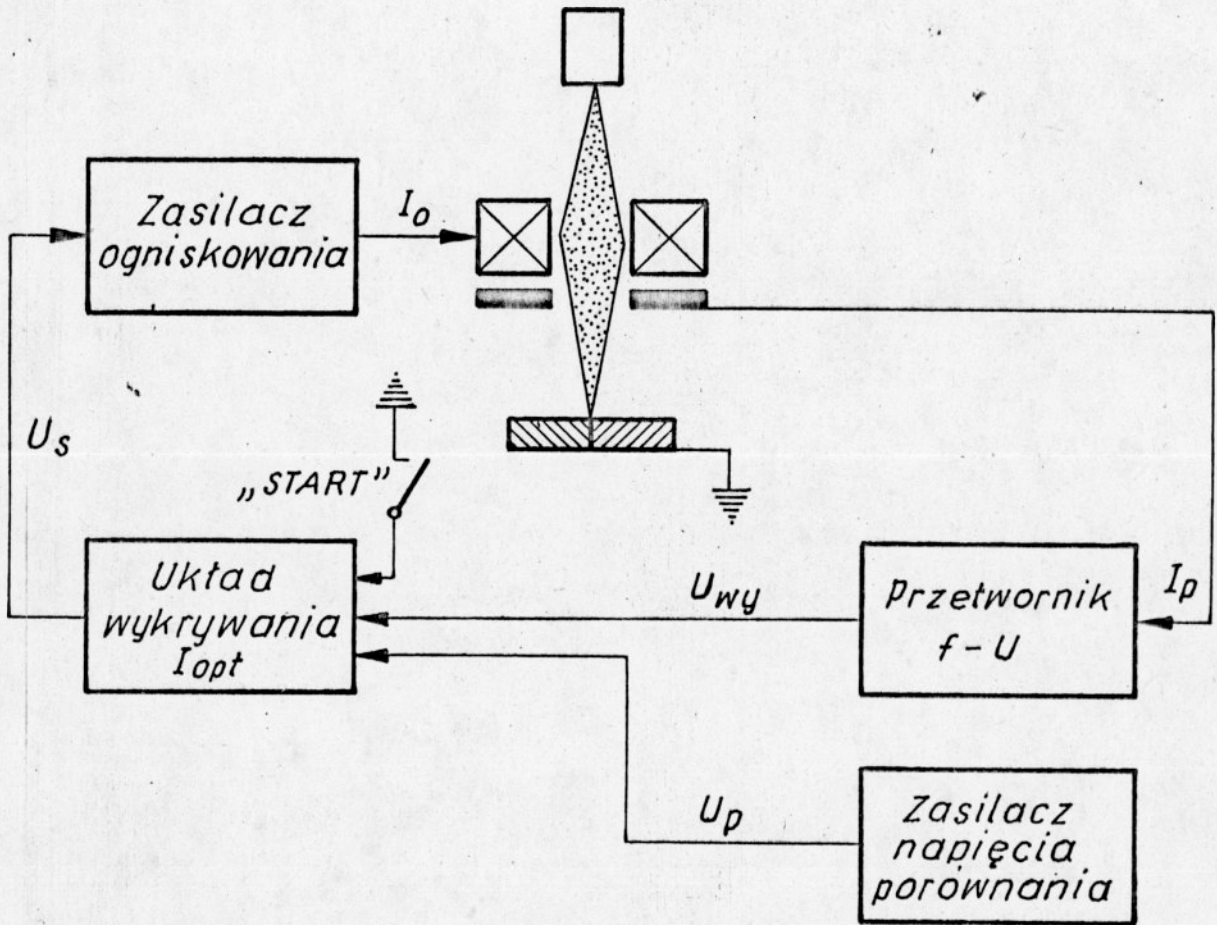
W wyniku przeprowadzonej analizy zdecydowano, że projektowany układ powinien się charakteryzować następującymi parametrami:

- czas wyszukania optymalnej wartości prądu ogniskowania nie dłuższy niż 1 sek,
- czas pamiętania optymalnej wartości prądu soczewki dowolnie długi,
- skuteczność działania układu przy maksymalnej mocy spawarki $\beta > 90\%$.

3.2. Schemat blokowy układu do automatycznego ogniskowania w spawarce elektronowej

Schemat blokowy układu do automatycznego ogniskowania wiązki elektronów pokazano na rys. 22.

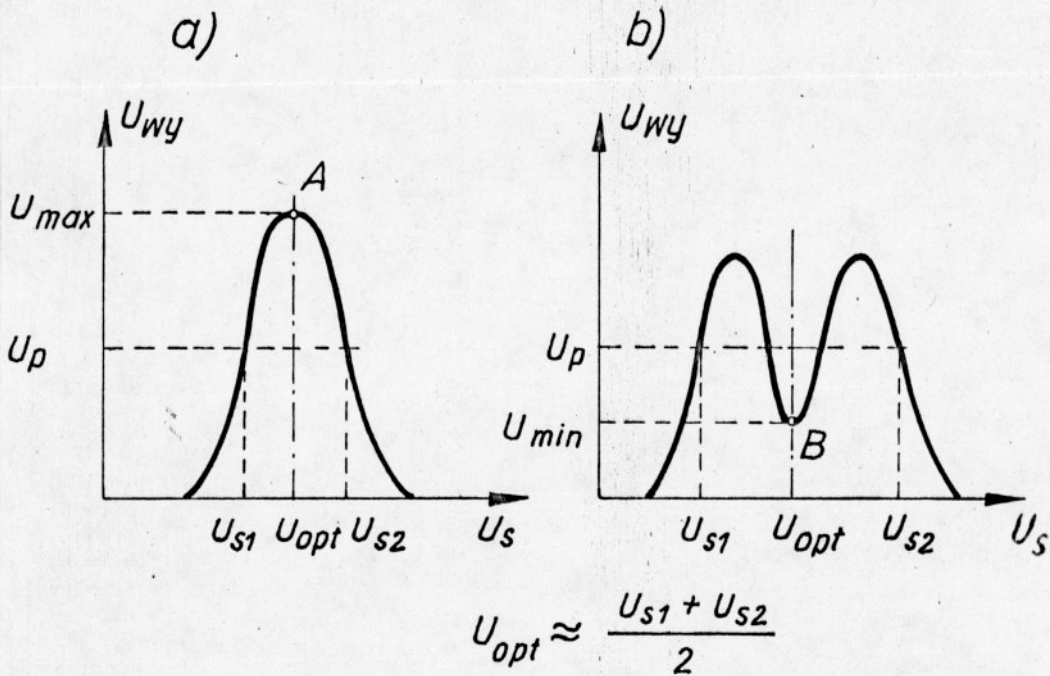
Zasada działania układu jest następująca: po naciśnięciu przycisku "START" na wyjściu układu wykrywania optymalnego prądu



Rys. 22. Schemat blokowy układu do automatycznego ogniskowania wiązki elektronowej.

ogniskowania pojawia się napięcie U_s o przebiegu trójkątnym sterujące zasilaczem ogniskowania i wymuszające odpowiedni przebieg prądu ogniskowania. W wyniku oddziaływania wiązki z materiałem, wraz ze zmianami prądu ogniskowania wygenerowana zostaje dwukrotnie charakterystyka napięcia wyjściowego z przetwornika $f-U$ w funkcji czasu: raz przy liniowym wzroście napięcia U_s , drugi raz przy liniowym opadaniu tego napięcia. Na podstawie przebiegu

$U_{wy} = f(t)$ i ustawionego poziomu napięcia porównania U_p układ wykrywania ustala i zapamiętuje wartość napięcia sterującego U_{opt} odpowiadającą optymalnej wartości prądu soczewki ogniskującej I_{opt} . Sposób ustalania optymalnej wartości napięcia sterującego zasilaczem ogniskowania ilustruje rys. 23.



Rys. 23. Sposób ustalania optymalnej wartości napięcia U_s sterującego zasilaczem ogniskowania przez układ wykrywania przy małych mocach wiązki /a/ oraz przy dużych mocach wiązki /b/.

Zgodnie z zasadą wcześniej przedstawionej metody kontroli ogniskowania, prąd soczewki osiąga wartość optymalną w chwili gdy napięcie wyjściowe z przetwornika $f-U$ osiąga maksimum /punkt A na rys. 23a/ lub minimum /punkt B na rys. 23b/. Przebieg zależności $U_{wy} = f(I_o)$ lub $U_{wy} = f(U_s)$ jest zbliżony do symetrycznego przy czym prosta $I_o = I_{opt}$ lub odpowiadająca jej prosta

$U_s = U_{opt}$ jest osią symetrii. Ze względu na symetrię optymalne napięcie sterujące zasilaczem ogniskowania lub optymalny prąd ogniskowania można określić wzorami:

$$U_{opt} \approx \frac{U_{s1} + U_{s2}}{2} \quad /3-2/$$

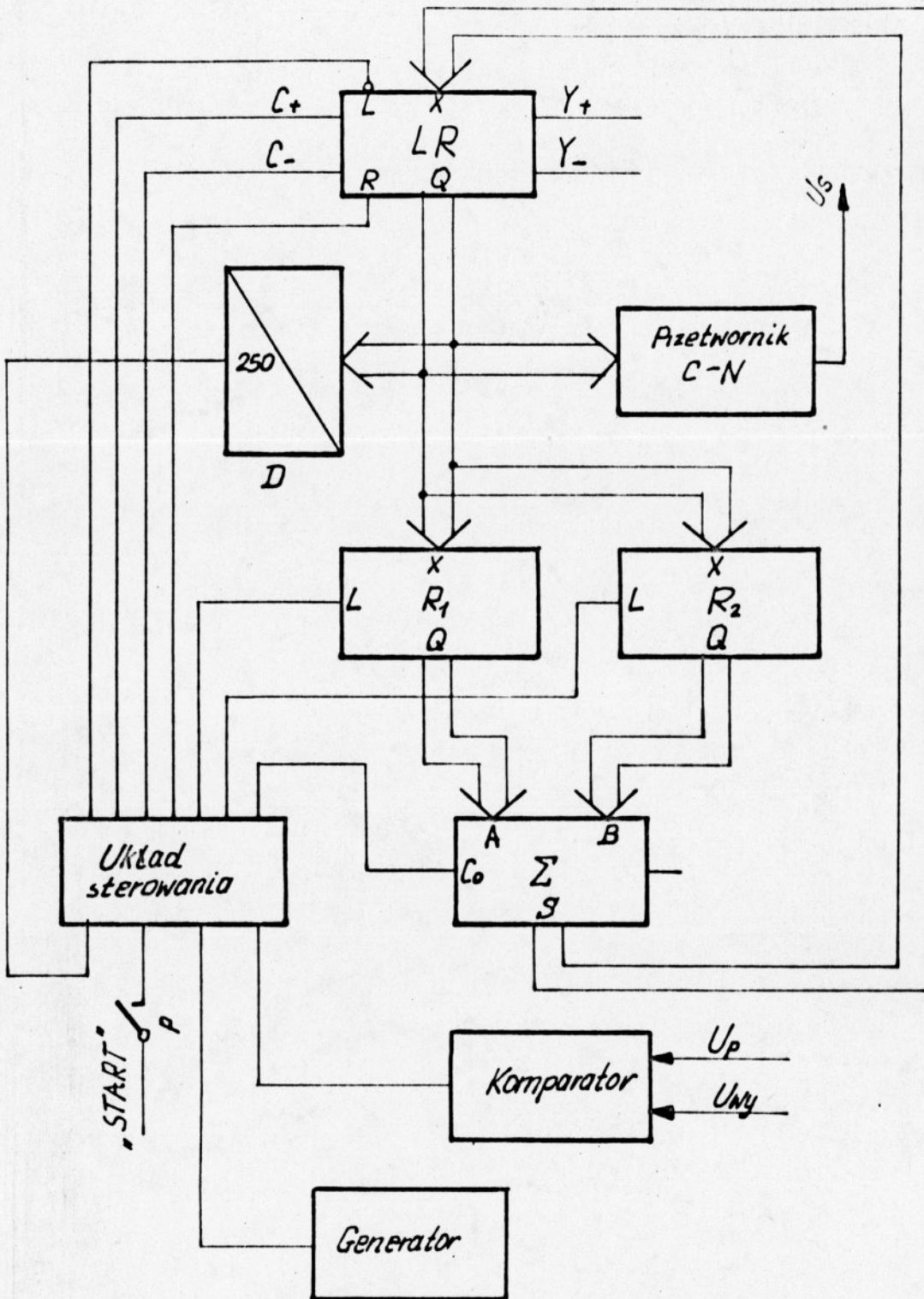
$$I_{opt} \approx \frac{I_1 + I_2}{2} \quad /3-3/$$

gdzie: U_{s1}, U_{s2} - wartości napięcia sterującego zasilaczem ogniskowania, przy których napięcie wyjściowe osiąga poziom porównania U_p ,

I_1, I_2 - wartości prądu soczewki ogniskującej przy których napięcie wyjściowe z przetwornika osiąga poziom porównania U_p .

Schemat blokowy układu umożliwiającego odszukanie punktów ekstremalnych A lub B na charakterystyce $U_{wy} = f(U_s)$ /patrz rys. 23a i b/ pokazano na rys. 24 a przebiegi wybranych sygnałów w czasie ustalania przez układ optymalnego prądu soczewki ogniskującej na rys. 25.

W momencie podania sygnału "START" /zwarcie przycisku p/ układ sterujący zeruje licznik rewersyjny a następnie na wejście C^+ licznika podaje z generatora ciąg impulsów prostokątnych. Na wyjściu przetwornika cyfra - napięcie pojawia się liniowo narastające napięcie U_s . Steruje ono zasilaczem ogniskowania powodując liniowy wzrost prądu soczewki. Przy pewnej wartości ogniskowania w obwodzie kolektora pojawia się prąd elektronów powolnych I_p , którego fluktuacje powodują powstanie na wyjściu przetwornika f-U sygnału napięciowego proporcjonalnego do średniej częstotli-



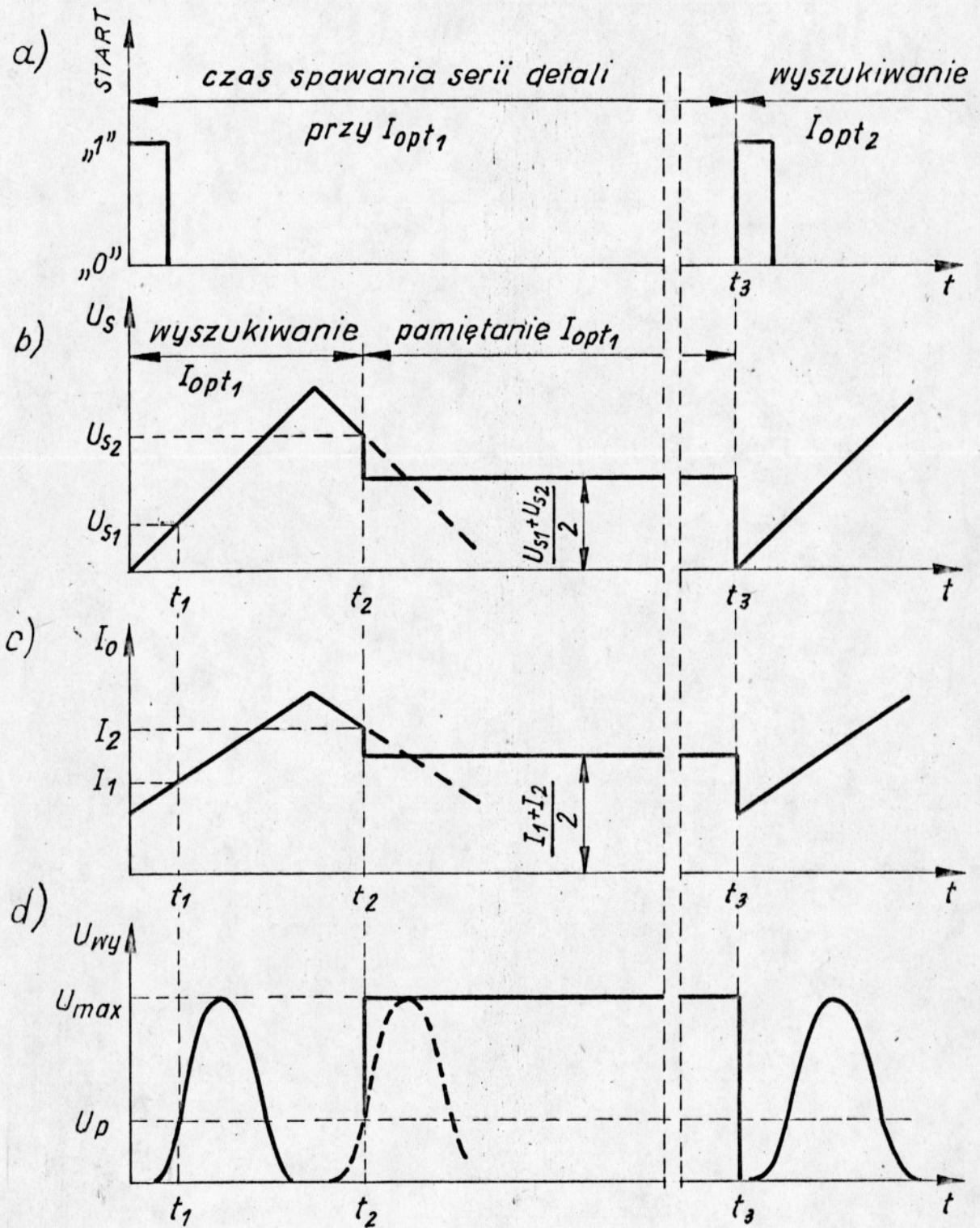
Rys. 24. Schemat blokowy układu do wykrywania optymalnego prądu soczewki ogniskującej.

LR - licznik rewersyjny z wypisywaniem równoległym asynchronicznym; R₁, R₂ - rejestry równoległe asynchroniczne; D - dekodery; Σ - sumator równoległy.

wości fluktuacji. W chwili t_1 /patrz rys. 25/ napięcie U_{wy} przekracza z dodatnim znakiem pochodnej poziom napięcia porównania U_p . Na wyjściu komparatora pojawia się sygnał, który poprzez układ sterujący oddziałuje na wejście L rejestru równoległego R_1 i w rejestrze tym zostaje zapamiętana połowa stanu licznika $\frac{N_1}{2}$ /tj. połowa liczby impulsów zliczonych przez licznik w przedziale czasu $[0, t_1]$ /. W czasie narostu wartości U_s i I_0 licznik zlicza 250 impulsów. Po upływie tego czasu zarówno napięcie sterujące jak i prąd ogniskowania zaczynają maleć ponieważ na wyjściu dekodera pojawia się sygnał który przez układ sterujący zmienia kierunek liczenia. Na wejściu C^- pojawia się więc ciąg impulsów prostokątnych których liczbę licznik odejmuje od liczby 250. W chwili t_2 gdy napięcie U_{wy} przekroczy ponownie poziom napięcia porównania z dodatnim znakiem pochodnej następuje:

- zapamiętanie na sygnał z komparatora w rejestrze R_2 połowy aktualnego stanu licznika w chwili t_2 tj. liczby $\frac{N_2}{2}$,
- sumowanie liczb $\frac{N_1}{2}$ i $\frac{N_2}{2}$,
- wpisanie wyniku sumowania do licznika rewersyjnego,
- wyłączenie generatora impulsów.

Licznik rewersyjny zapamiętuje więc w postaci binarnej liczbę $\frac{N_1}{2} + \frac{N_2}{2}$ odpowiadającą wartości średniej arytmetycznej napięć U_{s1} i U_{s2} na wyjściu przetwornika C-N tj. wartości U_{opt} . Licznik wraz z przetwornikiem C-N i zasilaczem ogniskowania pełnią rolę pamięci analogowej pozwalającej pamiętać przez dowolnie długi okres czasu przybliżoną wartość optymalnego prądu soczewki ogniskującej. Ponowne naciśnięcie przycisku "START" zapoczątkowuje nowy cykl ustalania optymalnej wartości prądu ogniskowania.

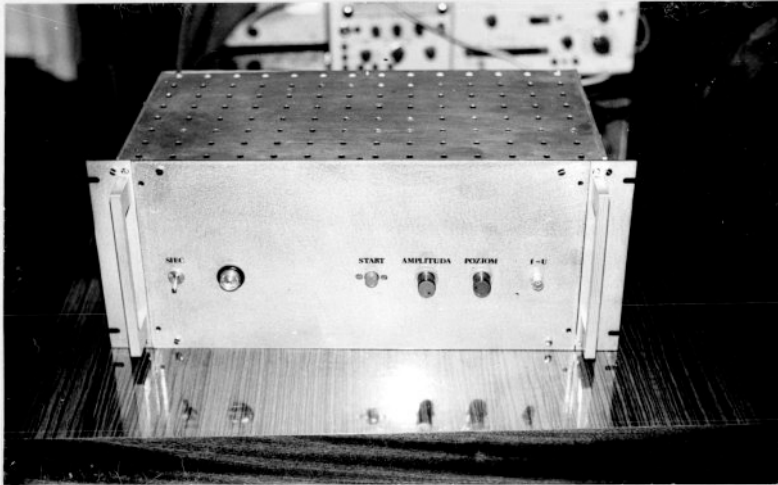


Rys. 25. Przebiegi sygnałów podczas wyszukiwania optymalnego prądu soczewki: a- stan przycisku; b- napięcie U_s sterujące zasilaaczem ogniskowania; c- prąd soczewki ogniskującej; d- napięcie wyjściowe z przetwornika f-U.

4. BADANIA EKSPLOATACYJNE UKŁADU DO AUTOMATYCZNEGO OGNISKOWANIA

4.1. Badanie przy wykorzystaniu układu symulującego charakterystykę obiektu

Prototyp układu do automatycznego ogniskowania wiązki pokazano na rys. 26.



Rys. 26. Układ do automatycznego ogniskowania wiązki.

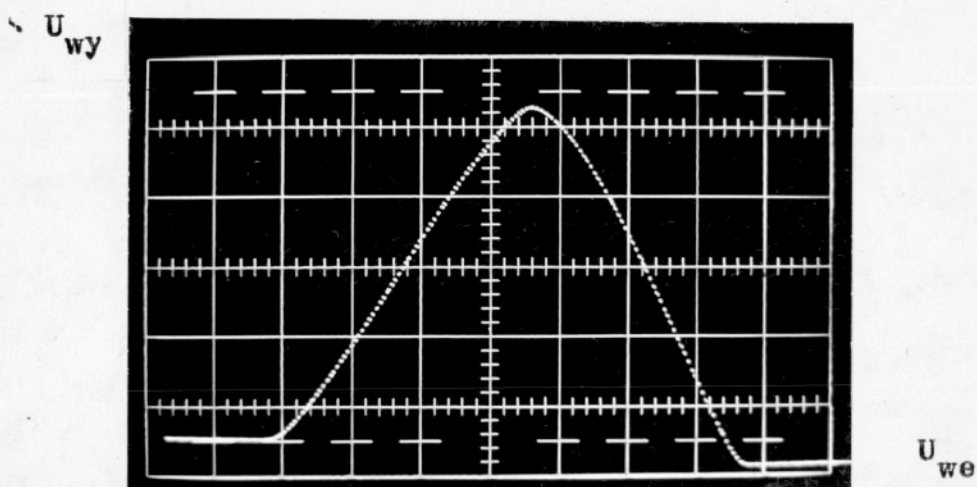
Schemat blokowy i zasadę działania układu opisano w punkcie 3.2 natomiast schematy ideowe układu przedstawiono w dodatku do pracy.

Celem sprawdzenia poprawności działania prototypu wykonano układ symulujący rzeczywistą charakterystykę $U_{wy} = f(I_o)$ przy małych mocach wiązki. Charakterystykę taką pokazano na rys. 27, a schemat blokowy układu symulującego na rys. 29.

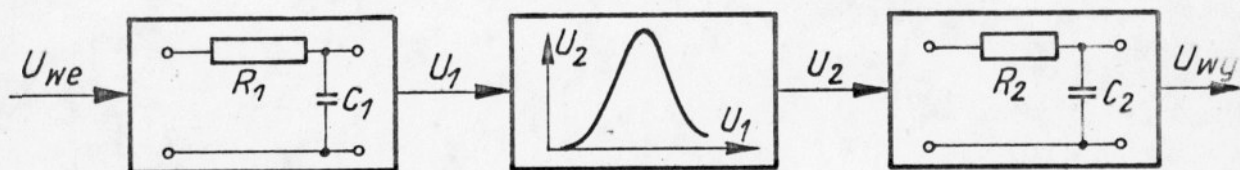
Układ symulujący charakterystykę $U_{wy} = f(I_o)$ zawierał prosty generator diodowy oraz elementy $R_1 C_1$ i $R_2 C_2$ dołączone na wejściu

i wyjściu generatora. Analizę pracy układu do automatycznego ogniskowania przeprowadzono dla następujących przypadków:

- 1 - obiekt bez inercji / $C_1 = 0$ i $C_2 = 0$ /
- 2 - obiekt z inercją na wejściu / $C_1 \neq 0$ i $C_2 = 0$ /
- 3 - obiekt z inercją na wyjściu / $C_1 = 0$ i $C_2 \neq 0$ /
- 4 - obiekt z inercją na wejściu i wyjściu / $C_1 \neq 0$ i $C_2 \neq 0$ /



Rys.27. Zależność napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego układu symulującego rzeczywistą charakterystykę $U_{wy} = f(I_o)$ dla małych mocy wiązki. Czulość Y - 0,3 V/dz, czulość X - 0,5 V/dz.



Rys. 28. Schemat blokowy układu symulującego rzeczywistą charakterystykę $U_{wy} = f(I_o)$ dla małych mocy wiązki.

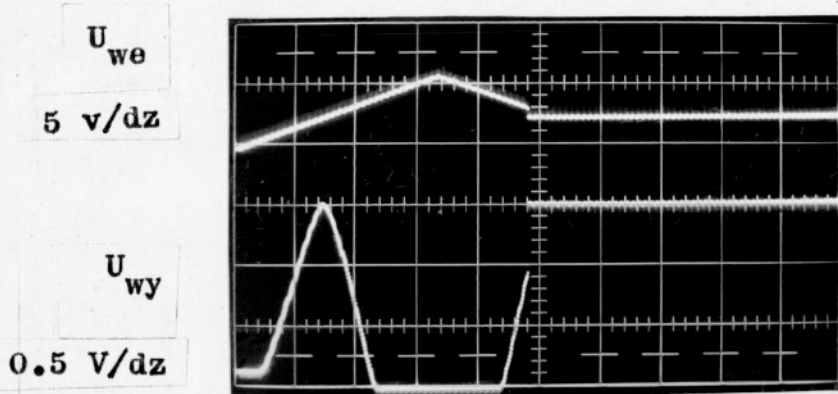
Role obiektu spełniał więc układ symulujący, którego konstrukcja pozwalała uwzględniać inercję na wejściu obiektu rzeczywistego tj. inercję zasilacza ogniskowania wraz z soczewką magnetyczną oraz inercję na wyjściu obiektu rzeczywistego tj. inercję przetwornika $f-U$ wraz z inercją związaną z oddziaływaniem wiązki na materiał. Przebiegi napięcia wyjściowego i wejściowego podczas wykrywania maksimum charakterystyki obiektu bez inercji pokazano na rys. 29a. Na rys. 29b pokazano zależność napięcia wyjściowego w funkcji napięcia wejściowego uzyskaną na ekranie oscyloskopu po przyłożeniu obu napięć odpowiednio na wejścia wzmacniaczy X i Y. Punkt jaśniejszy w okolicy maksimum przedstawia stan ustalony $/U_{we} = \text{const}, U_{wy} = \text{const}/$. Niesymetria charakterystyki $U_{wy} = f(U_{we})$ wprowadza pewien błąd wykrycia maksimum co widać na rysunku 29b.

Dla obiektu bez inercji przebieg napięcia $U_{wy} = f(U_{we})$ podczas narostu i opadania napięcia wejściowego generowane charakterystyki pokrywają się /charakterystyka statyczna obiektu pokrywa się z charakterystyką dynamiczną/ a maksymalna wartość U_{wy} ustala się natychmiast /brak stanu nieustalonego/.

Na rysunkach 30 i 31 pokazano podobne przebiegi uzyskane dla przypadków gdy obwód wejściowy lub wyjściowy układu symulacyjnego charakteryzował się pewną inercją.

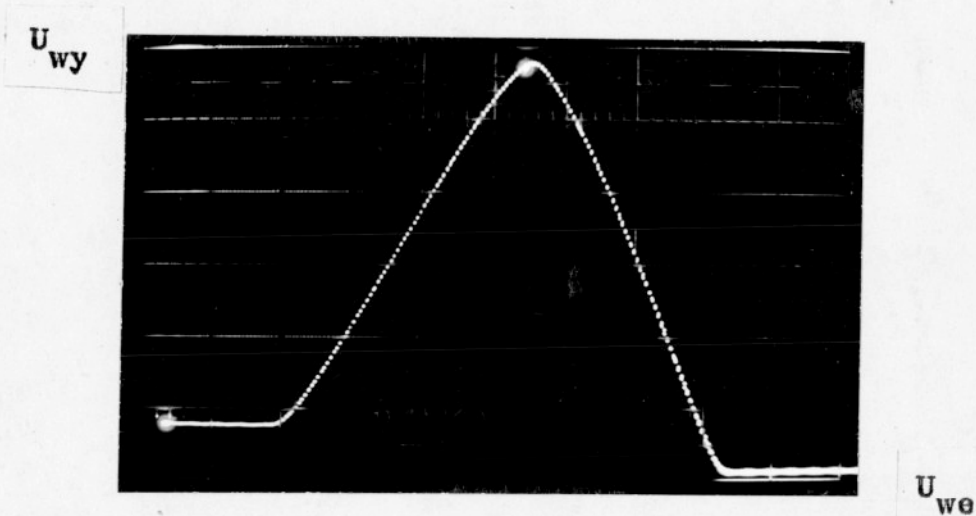
Jak widać na rys. 30 i 31 występowanie inercji powoduje, że przebieg $U_{wy} = f(U_{we})$ podczas narostu napięcia wejściowego nie pokrywa się z przebiegiem otrzymanym podczas malenia napięcia U_{we} . /Charakterystyka statyczna nie pokrywa się z charakterystyką dynamiczną/. Występowanie inercji wydłuża również czas wyszukiwania ekstremum. Inercja na wyjściu obiektu dodatkowo zmniejsza poziom

a)



t 0,2 s/dz

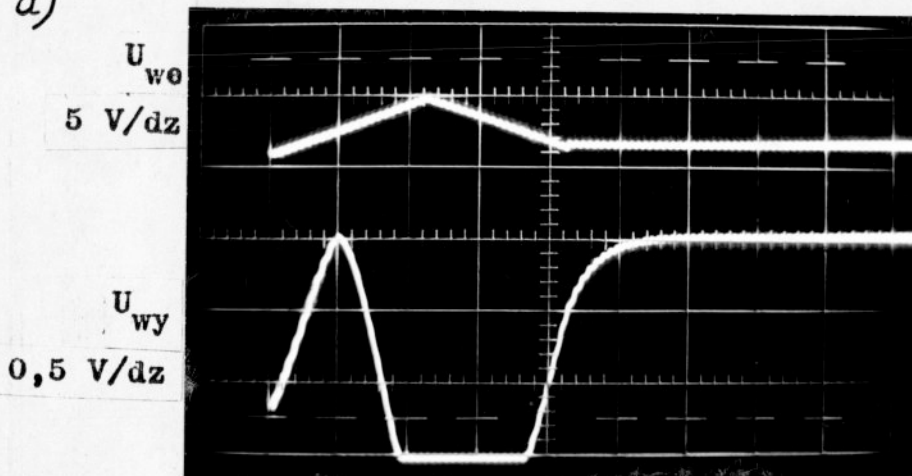
b)



Rys. 29. Wykrywanie maksimum charakterystyki $U_{wy} = f(U_{we})$ obiektu bez inercji. a - przebieg napięcia wejściowego i wyjściowego w funkcji czasu; b- przebieg napięcia $U_{wy} = f(U_{we})$, czułość Y = 0,3 V/dz, czułość X - 0,5 V/dz.

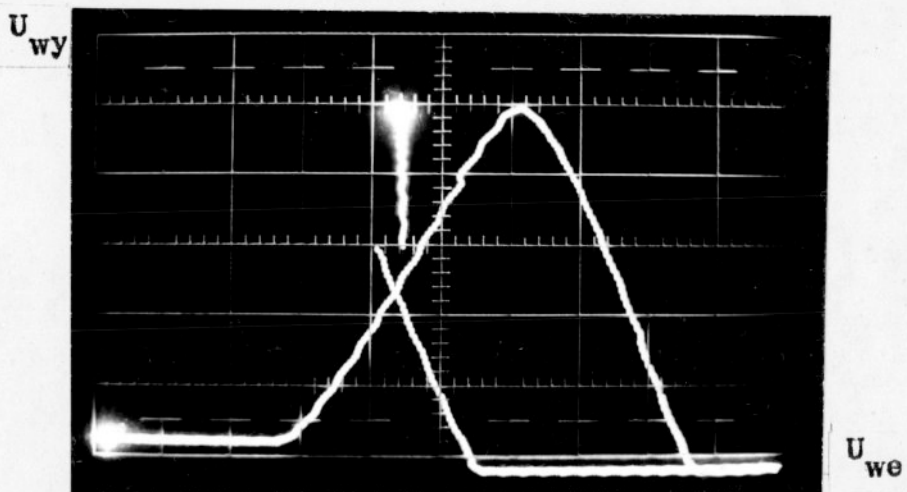
sygnału wyjściowego. Jeżeli stałe czasowe R_1C_1 na wejściu i R_2C_2 na wyjściu różnią się znacznie między sobą, to w przypadku $R_1C_1 \gg R_2C_2$ obiekt zachowuje się tak jak obiekt z inercją na wejściu, natomiast w przypadku $R_1C_1 \ll R_2C_2$ jak obiekt z inercją na wyjściu.

a)



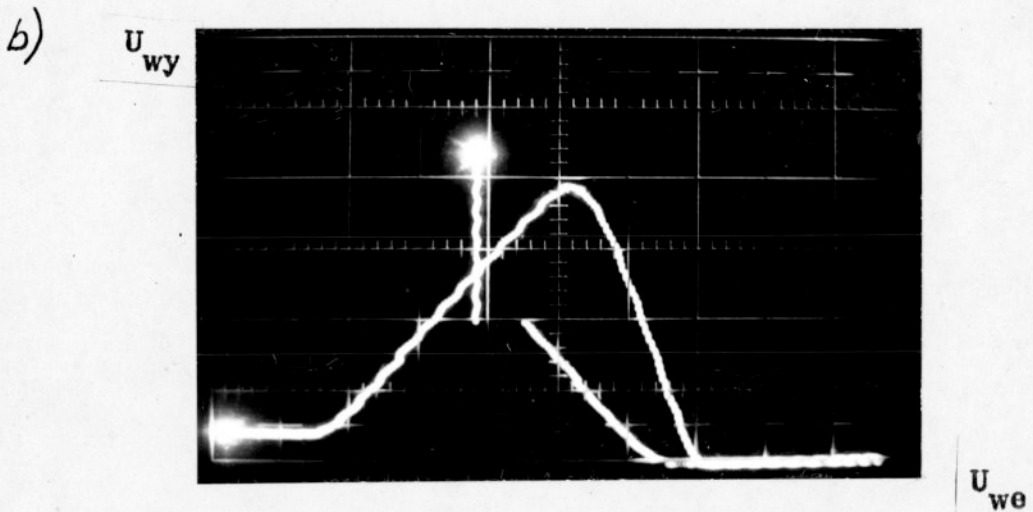
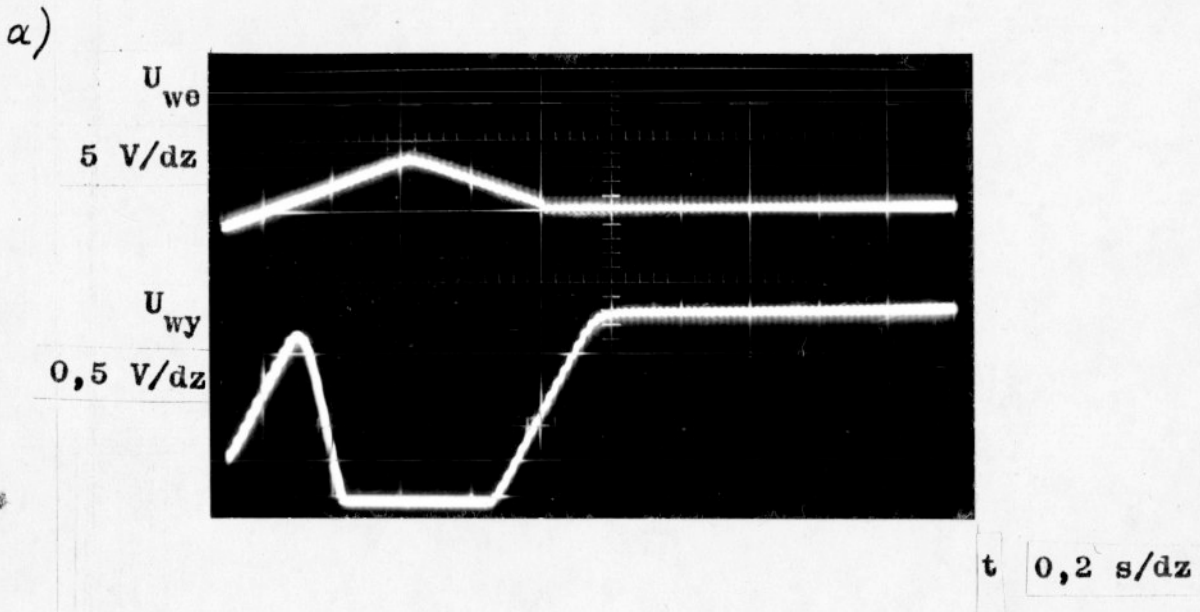
t 0,2 s/dz

b)



Rys. 30. Wykrywanie maksimum charakterystyki $U_{wy} = f(U_{we})$ obiektu z inercją na wejściu. a - przebieg napięcia wejściowego i wyjściowego w funkcji czasu; b - zależność $U_{wy} = f(U_{we})$, czułość Y - $0,3 \text{ V/dz}$, czułość X - $0,6 \text{ V/dz}$.

Oczywistym jest, że wpływ inercji na przebieg charakterystyki $U_{wy} = f(U_{we})$ będzie tym mniejszy im mniejsza będzie szybkość zmian napięcia wejściowego $\frac{dU_{we}}{dt}$. Inercja obiektu jest więc głównym czynnikiem ograniczającym czas wyszukania ekstremum.



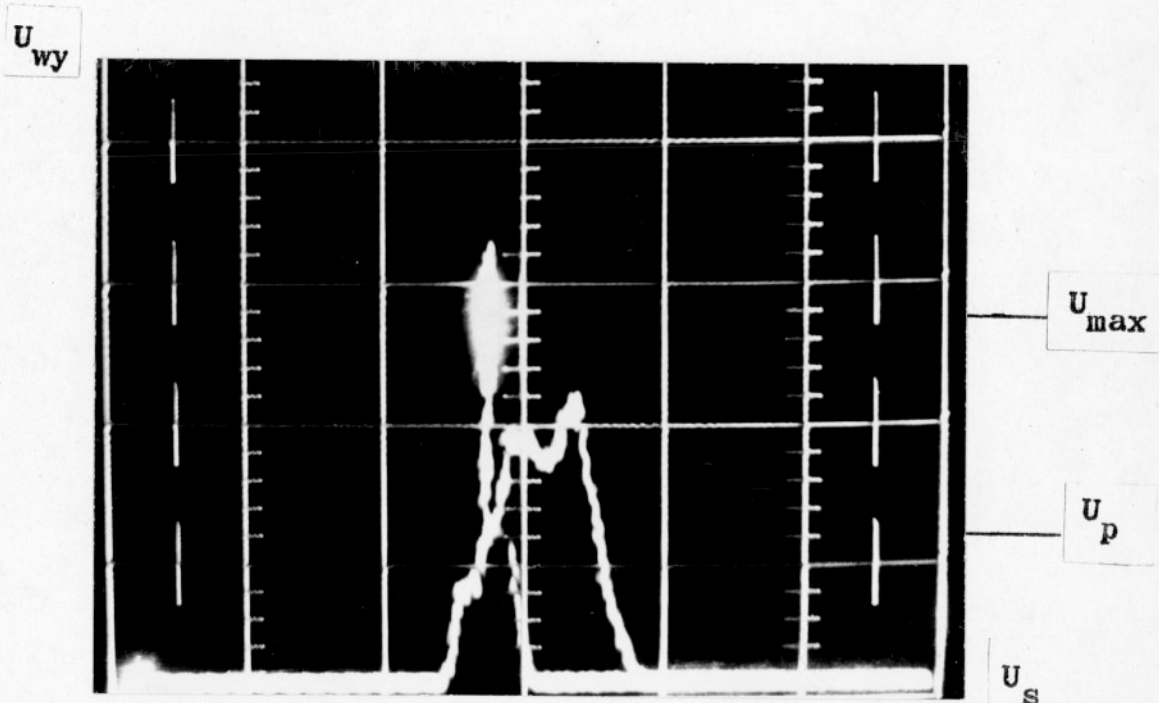
Rys. 31. Wykrywanie maksimum charakterystyki $U_{wy} = f(U_{we})$ obiektu z inercją na wyjściu. a - przebieg napięcia wejściowego i wyjściowego w funkcji czasu, b - zależność $U_{wy} = f(U_{we})$, czułość Y - 0,3 V/dz, czułość X - 0,6 V/dz.

4.2. Współpraca układu do automatycznego ogniskowania ze spawarką elektronową WS-2/30

Celem oceny poprawności działania układu automatycznego ogniskowania na obiekcie rzeczywistym, układ ten podłączono do spawarki elektronowej WS-2/30. W trakcie prób obserwowano przebiegi napięcia U_{wy} z przetwornika f-U oraz napięcia sterującego

zasilaczem ogniskowania podczas spawania stali 1H18N9T, miedzi M1G i aluminium PA1.

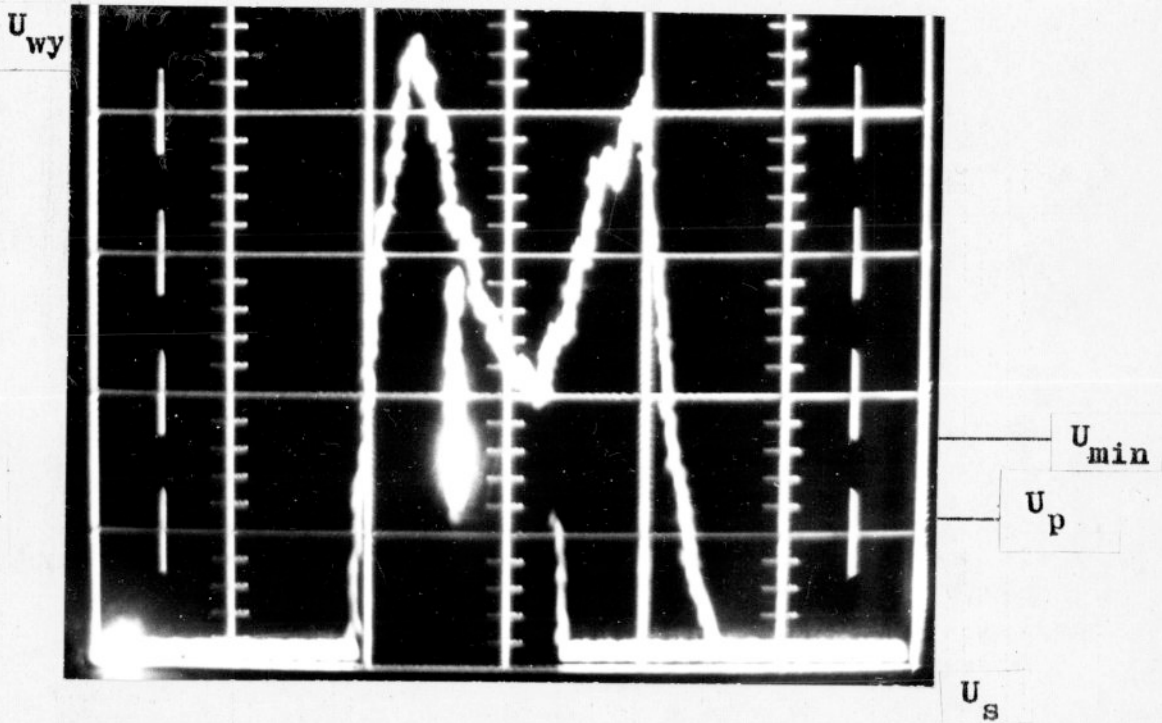
Stwierdzono, że rodzaj materiału nie wpływa na przebieg wykrywania optymalnego prądu ogniskowania i jedynie zwiększenie mocy wiązki powoduje zmianę kształtu charakterystyki $U_{wy} = f(I_0)$ jak to pokazano na rys. 23a i b. Na rys. 32 pokazano zależność napięcia wyjściowego z przetwornika f-U od napięcia U_s sterującego zasilaczem ogniskowania w przypadku gdy przebieg charakterystyki $U_{wy} = f(I_0)$ ma tylko jedno ekstremum. Jak widać, w stanie ustalonym napięcie U_s osiąga wartość równą wartości odpowiadającej optymalnemu prądowi ogniskowania przy którym występuje maksimum charakterystyki statycznej $U_{wy} = f(I_0)$.



Rys. 32. Zależność $U_{wy} = f(U_s)$ podczas ustalania optymalnego prądu soczewki ogniskującej.

Warunki spawania: $U = 25$ kV, $I = 40$ mA, $V_s = 0$, materiał PA1.

Na rys. 33 pokazano podobną zależność dla przypadku gdy charakterystyka $U_{wy} = f(I_o)$ posiada kształt litery "M".

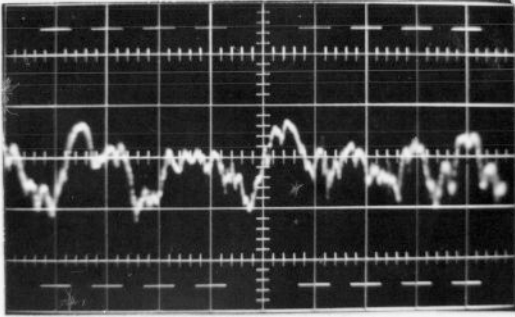


Rys. 33. Zależność $U_{wy} = f(U_s)$ podczas ustalania optymalnego prądu soczewki ogniskującej. Warunki spawania:
 $U = 25$ kV, $I = 40$ mA, $V_s = 0$, materiał - stal 1H18N9T

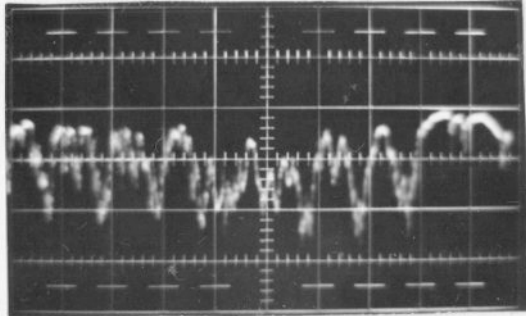
O poprawności działania układu świadczą również oscylogramy fluktuacji prądu elektronów powolnych I_p pokazane na rysunku 34. Różnica prądu soczewki o ± 10 mA tj. około 1,3% prądu ustalonego przez układ jako optymalny daje już zauważyć wyraźny efekt zmiany częstotliwości fluktuacji.

Podczas wyszukiwania optymalnego ogniskowania zmienia się gęstość mocy wiązki, a tym samym i szerokość lica spoiny. Na rysunku 35 pokazano fragment stanu nieustalonego na licu spoiny podczas wyszukiwania optymalnego prądu soczewki ogniskującej.

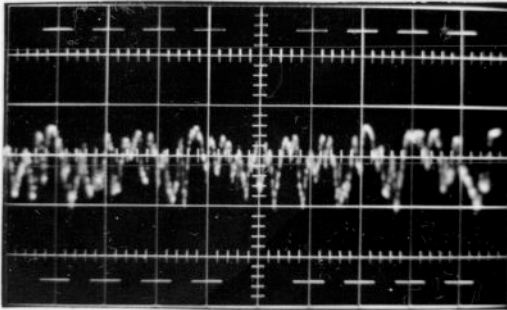
a)



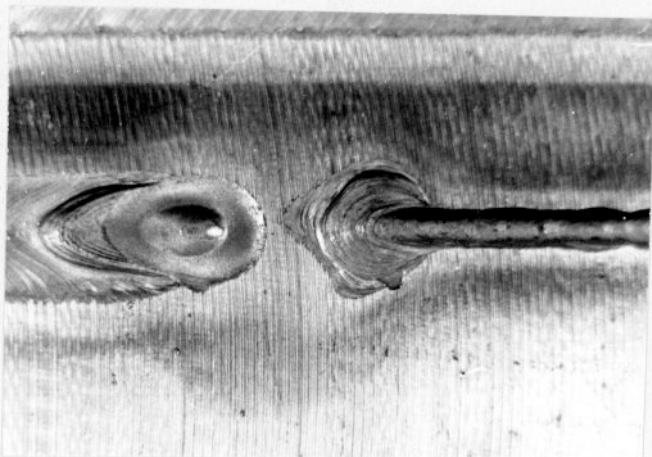
b)



c)



Rys. 34. Oscylogramy fluktuacji prądu elektronów powolnych I_p .
a/ warunki ogniskowania ustalone przez układ
 $I_o = I_{opt} = 783 \text{ mA}$; b/ $I_o = I_{opt} - 10 \text{ mA}$;
c/ $I_o = I_{opt} + 10 \text{ mA}$. Warunki spawania: $U = 25 \text{ kV}$,
 $I = 40 \text{ mA}$, $V_s = 0$, materiał stal 1H18N9T. Czulość
Y - 20 mA/dz , podstawa czasu oscyloskopu 1 ms/dz .



Rys. 35. Kształt lica spoiny podczas ustalania optymalnej wartości prądu soczewki ogniskującej. Warunki spawania $U = 30$ kV, $I = 70$ mA, $V_s = 60$ cm/min, materiał - stal 1H18N9T.

Prawidłowe działanie układu automatycznego ogniskowania wiązki potwierdziło słuszność przyjętej koncepcji ustalania optymalnej wartości prądu ogniskowania. Z praktycznego punktu widzenia ważna jest jednak nie tylko prawidłowość przyjętej koncepcji lecz również prawidłowość działania układu podczas normalnej eksploatacji. Szczególnie ważnymi parametrami technicznymi układu są skuteczność działania układu β zdefiniowana wzorem /3-1/i powtarzalność głębokości przetopów uzyskiwanych w stałych warunkach spawania. Ze względu na przypadkowe zmiany parametrów określających geometrię wiązki, warunków spawania oraz istniejące w spawarce elektronowej zakłócenia zarówno wartość prądu soczewki ogniskującej ustalona przez układ jak i głębokość przetopu są zmiennymi losowymi o pewnym rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa. Jako miarę powtarzalności głębokości przetopu i prądu ogniskowania przyjęto współczynnik zmienności zdefiniowany jako stosunek odchylenia standartowego σ_x do wartości średniej zmiennej losowej

wyrażony w procentach [39]:

$$W_x = \frac{\tilde{\sigma}_x}{x} \cdot 100\% \quad /4-1/$$

$$W_h = \frac{\tilde{\sigma}_h}{h_{sr}} \cdot 100\% \quad /4-2/$$

$$W_I = \frac{\tilde{\sigma}_I}{I_{sr}} \cdot 100\% \quad /4-3/$$

Ocenę skuteczności działania β przeprowadzono przy maksymalnej mocy spawarki WS-2/30 podczas spawania stali nierdzewnej o grubości 10 mm w następujących warunkach $U = 30$ kV, $I = 70$ mA, $V_s = 80$ cm/min. Pomiar przeprowadzono w następujący sposób:

- po włączeniu zasilania wyrzutni wczekiwano 30 minut na ustabilizowanie się warunków pracy wyrzutni,
- następnie przy pomocy układu automatycznego ogniskowania ustalano prąd soczewki ogniskującej i wykonywano przetop,
- czas wyszukiwania prądu ogniskowania nie przekraczał 1 sek,
- potem wykonywano jeszcze dwa przetopy dla prądów ogniskowania różniących się o +10 mA i o -10 mA od prądu ogniskowania ustalonego przez układ.

Wyniki pomiarów zebrano w tabeli 2.

Tabela 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h^+ [mm]	8,45	7,77	7,68	6,78	8,18	6,93	6,87	7,37	7,99	7,41
h [mm]	8,07	8,15	8,91	8,80	7,53	8,53	8,73	8,57	8,13	8,00
h^- [mm]	4,44	6,33	6,96	6,99	5,26	7,01	6,42	5,05	5,24	5,90
β [%]	88,1	89	97,3	96,1	82,2	93,1	95,3	93,6	88,8	87,3
L_p	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
h^+ [mm]	6,0	6,44	5,74	6,5	7,68	6,63	5,87	5,99	6,59	6,09
h [mm]	8,87	7,45	8,50	9,16	8,18	8,68	8,23	8,38	8,65	8,42
h^- [mm]	7,48	7,10	8,24	7,57	5,85	6,32	7,45	8,0	8,02	7,41
β [%]	96,8	81,3	92,8	0	89,3	94,8	89,8	91,5	94,4	91,9
L_p	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
h^+ [mm]	6,12	7,21	8,05	6,25	6,18	5,25	5,92	6,79	6,81	6,65
h^- [mm]	8,49	8,72	8,65	8,43	8,93	8,56	8,05	8,57	8,60	8,83
h^- [mm]	7,62	7,08	5,44	7,26	7,25	8,13	8,03	8,54	8,54	7,47
β [%]	92,7	95,2	94,4	92,0	97,5	93,5	87,9	93,6	93,9	96,4

Oznaczenia do tabeli 2:

h^+ - głębokość przetopu uzyskana przy zwiększeniu prądu soczewki o 10 mA względem wartości prądu ustalonego przez układ automatycznego ogniskowania,

h - głębokość przetopu uzyskana dla prądu soczewki ustalonego przez układ automatycznego ogniskowania,

h^- - głębokość przetopu uzyskana przy zmniejszeniu prądu soczewki o 10 mA względem wartości prądu ustalonego przez układ automatycznego ogniskowania.

Wartości h^+ , h , h^- określano jako średnią arytmetyczną z 4 wartości głębokości przetopu zmierzonych w różnych przekrojach poprzecznych spoiny za pomocą mikroskopu warsztatowego zaopatrzonego w śrubę mikrometryczną.

Wartości średnie h^+ , h , h^- wyznaczone dla 30 przetopów, odchylenia standardowe i współczynnik zmienności wynoszą odpowiednio:

$$h_{\text{sr}}^+ = 6,807 \text{ mm} \quad \sigma_{h^+} = 0,833 \text{ mm} \quad w_{h^+} = 12,24\%$$

$$h_{\text{sr}} = 8,459 \text{ mm} \quad \sigma_h = 0,384 \text{ mm} \quad w_h = 4,54\%$$

$$h_{\text{sr}}^- = 6,947 \text{ mm} \quad \sigma_{h^-} = 1,078 \text{ mm} \quad w_{h^-} = 15,52\%$$

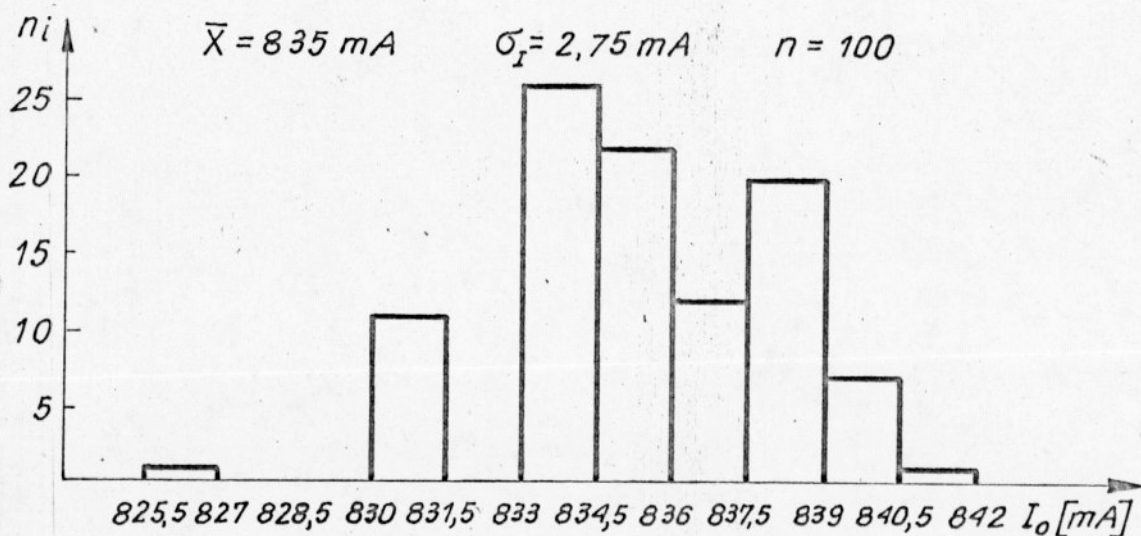
$$\text{a średnia wartość } \beta_{\text{sr}} = \frac{h_{\text{sr}}}{h_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{8,459}{9,16} \cdot 100\% = 92,3\%$$

Skuteczność działania β jest parametrem charakteryzującym przede wszystkim układ automatycznego ogniskowania, natomiast współczynnik zmienności charakteryzuje cały obiekt to jest spawarkę elektronową i układ automatycznego ogniskowania, ponieważ nie sposób oddzielić losowego dryftu przewężenia wiązki i charakterystyki $U_{\text{wy}} = f(I_0)$ od innych zakłóceń działających na układ i spawarkę. Wyniki pomiarów powtarzalności prądu ogniskowania zebrano w tabeli 3. Ocena powtarzalności prądu soczewki wyszukanego przez układ polegała na 100-krotnym powtórzeniu cyklu wyszukiwania optymalnego prądu ogniskowania i obliczeniu na podstawie uzyskanych 100 wartości prądu ogniskowania współczynnika zmienności w_I .

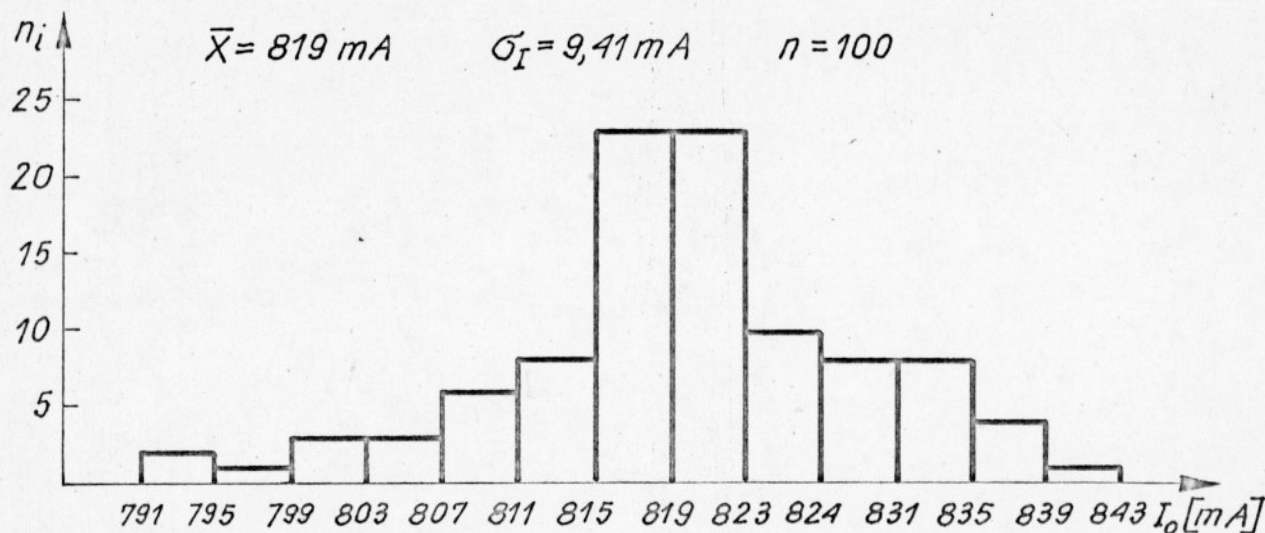
Tabela 3

MATERIAL SPAWANY			stal 1H18N9T		
Parametry spawania			Parametry zmiennej losowej I_{opt}		
U [kV]	I [mA]	V_s [cm/sek]	I_{opt}	ζ_I [mA]	w_I [%]
25	25	3,14	809	3,95	0,49
25	40	3,14	782	2,34	0,30
30	70	3,14	835	2,75	0,33
miedź MIG					
25	25	3,14	787	2,54	0,32
25	40	3,14	751	5,16	0,69
30	70	3,14	819	9,41	1,15
aluminium PA1					
25	25	3,14	795	3,36	0,42
25	40	3,14	765	4,48	0,56
30	70	3,14	832	4,93	0,59

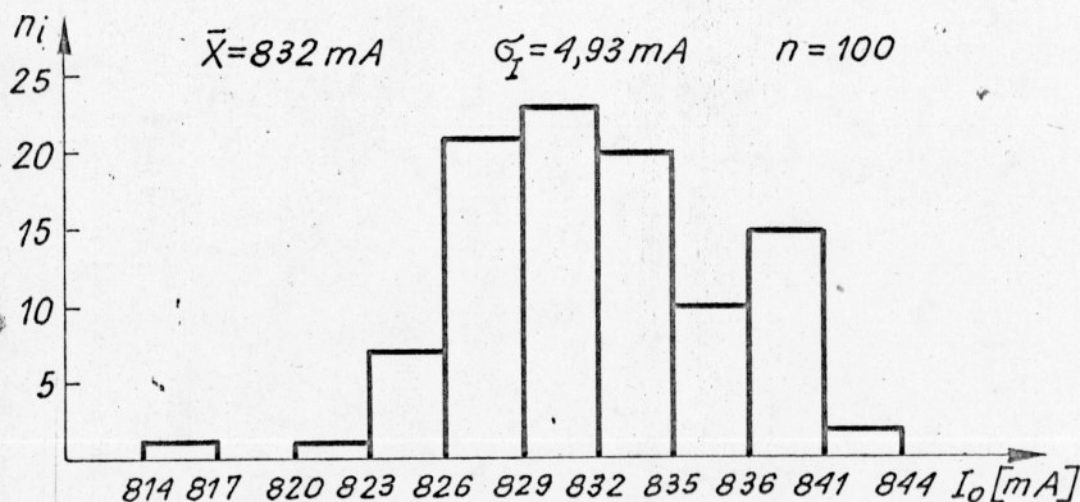
Na kolejnych trzech rysunkach przedstawiono kilka z uzyskanych histogramów wartości prądu ogniskowania przy zastosowaniu automatycznego ogniskowania wiązki.



Rys. 36. Histogram wartości prądu ogniskowania ustalanych przez układ automatycznego ogniskowania. Warunki spawania: $U = 30 \text{ kV}$, $I = 70 \text{ mA}$, $V_s = 3,14 \text{ cm/sek}$ materiał - stal 1H18N9T.



Rys. 37. Histogram wartości prądu ogniskowania ustalanych przez układ automatycznego ogniskowania. Warunki spawania: $U = 30 \text{ kV}$, $I = 70 \text{ mA}$, $V_s = 3,14 \text{ cm/sek}$, materiał - miedź M1G.



Rys. 38. Histogram wartości prądu ogniskowania ustalanych przez układ automatycznego ogniskowania. Warunki spawania: $U = 30 \text{ kV}$, $I = 70 \text{ mA}$, $V_s = 3,14 \text{ cm/sek}$, materiał - aluminium PA1.

Przedstawione powyżej wyniki świadczą o poprawnym wykrywaniu maksimum głębokości przetopu przez układ automatycznego ogniskowania. Na uwagę zasługuje fakt, że współczynnik zmienności w_h dla wartości prądu ustalanych przez układ jest około 3-krotnie mniejszy niż w przypadku odstrojeń o $\pm 10 \text{ mA}$ względem tej wartości. Odchylenia standartowe tworzą więc nierówność:

$$\sigma_h < \sigma_{h^+} < \sigma_{h^-}$$

którą można wytłumaczyć niesymetrią przebiegu zależności $h = f(I_o)$. Z rys. 30d zamieszczonego w dodatku wynika bowiem że:

$$\left| \frac{dh}{dI_o} \right|_{I=I_{opt}} < \left| \frac{dh}{dI_o} \right|_{I_o=I_{opt}+\Delta I_o} < \left| \frac{dh}{dI_o} \right|_{I=I_{opt}-\Delta I_o}$$

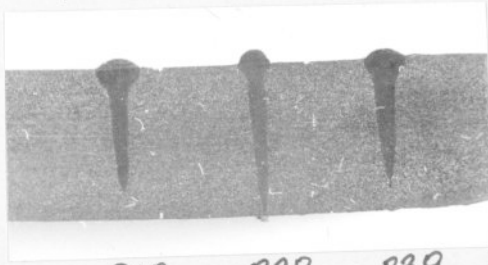
Tak więc przy stałym odchyleniu standartowym prądu wyszukanego przez układ uzyskuje się minimum odchylenia standartowego w okolicach maksimum zależności $h = f(I_0)$.

W tabeli 3 można zauważyć następujące prawidłowości:

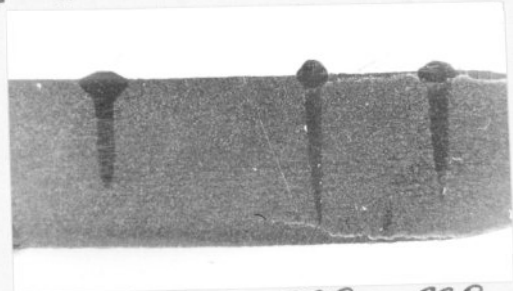
- 1 - przy napięciu przyspieszającym 25 kV i przy prądzie wiązki 40 mA uzyskano dla kolejnych materiałów mniejszą wartość średnią prądu ustalanego przez układ niż dla prądu wiązki wynoszącego 25 mA
- 2 - przy napięciu 30 kV uzyskano większą średnią wartość prądu ustalanego przez układ niż przy napięciu 25 kV.

Pierwszą z zaobserwowanych prawidłowości można tłumaczyć zmianą położenia pozornej źrenicy elektronooptycznej pod wpływem zmian napięcia na elektrodzie sterującej. /Regulacja prądu wiązki w spawarce WS-2/30 odbywa się przez zmianę napięcia na elektrodzie sterującej/. Druga prawidłowość jest oczywista. Zwiększenie energii elektronów z 25 keV na 30 keV wymaga bowiem wytworzenia w soczewce większego pola magnetycznego warunkującego zogniskowanie wiązki w tej samej odległości od soczewki. Zaobserwowane prawidłowości świadczą o poprawnej reakcji układu na zmianę warunków spawania.

Na rysunku 39 pokazano trzy przekroje poprzeczne przetopów wykonane w stali 1H18N9T. Przetop środkowy na każdym zdjęciu odpowiada prądowi ogniskowania ustalonemu przez układ, pozostałe przetopy odpowiadają prądowi różniącemu się o ± 10 mA względem ustalonej wartości. Mimo, że względne odstrojenie wynosi tu zaledwie $\frac{10}{828} \cdot 100\% = 1,22\%$ widać wyraźnie zmniejszenie głębokości przetopu oraz zmianę kształtu.



819 829 839 [mA]



818 828 838 [mA]



823 833 843 [mA]

Rys. 39. Kształty przetopów uzyskane przy I_0 ustalonym przez układ automatycznego ogniskowania. /Optymalny kształt ma środkowy przetop na każdym zdjęciu/ oraz przetopy uzyskane przy "odstrojeniu" o ± 10 mA. Warunki spawania: $U = 30$ kV, $I = 70$ mA, $V_1 = 80$ cm/min, stal 1H18N9T o grubości 10 mm.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Podczas spawania detali wiązką elektronów występuje efekt emisji cząstek naładowanych ze strefy oddziaływania wiązki elektronów z materiałem spawanym. Jony wytwarzane są w wyniku jonizacji parującego materiału i gazów resztkowych przez elektrony.

Strumień elektronów tworzą: elektrony wtórne, termoelektrony i elektrony uwalniane podczas procesu jonizacji.

Przeprowadzone w trakcie pracy badania pozwalają stwierdzić co następuje:

1. Prądy cząstek tj. elektronów powolnych, elektronów szybkich i jonów nie są stałe w czasie lecz podlegają fluktuacjom o charakterze losowym. Fluktuacje te spowodowane są zjawiskami o charakterze dynamicznym towarzyszącymi procesowi oddziaływania wiązki elektronów o dużej gęstości mocy na materiał.
2. W optymalnych warunkach ogniskowania rozkład widmowy fluktuacji prądu cząstek jest zbliżony do rozkładu ciągłego ponieważ wzrasta wówczas udział szumów w prądzie cząstek. Średnia częstotliwość fluktuacji leży w paśmie akustycznym i wynosi kilka kiloherców. Amplituda fluktuacji podobnie jak i średnia częstotliwość zależy od rodzaju materiału spawanego i warunków spawania.
3. Wraz ze zmianami prądu ogniskowania zmienia się zarówno amplituda jak i średnia częstotliwość fluktuacji prądu cząstek. Przebieg tych wielkości w funkcji prądu ognisko-

wania ma kształt "krzywej M" lub krzywej z jednym maksimum w zależności od mocy wiązki.

4. Gwałtowny wzrost amplitudy i częstotliwości następuje z chwilą rozpoczęcia się procesu topienia spawanego materiału. Przedział prądów ogniskowania w którym obserwuje się występowanie fluktuacji wzrasta wraz z mocą wiązki.
5. Maksimum amplitudy i średniej częstotliwości fluktuacji przy małych mocach wiązki /rzędu kilkuset watów/ lub lokalne minimum tych wielkości przy większych mocach występuje w chwili osiągnięcia maksymalnej głębokości przetopu.

Z przeprowadzonych badań wynika więc, że fluktuacje prądu cząstek emitowanych w czasie spawania wiązką elektronów zawierają informacje o głębokości przetopu i tym samym mogą służyć do ustalenia optymalnego prądu soczewki ogniskującej, co potwierdza słuszność głównej tezy niniejszej rozprawy.

Do kontroli ogniskowania wykorzystano fluktuacje elektronów powolnych z uwagi na dużą wartość otrzymywanych sygnałów.

Zaprojektowany i wykonany układ automatycznego ogniskowania może być z powodzeniem wykorzystywany w praktyce. Osiągnięto następujące parametry techniczne układu:

- czas ustalania optymalnego prądu ogniskowania -
mniejszy od 1 sekundy,
- czas pamiętania optymalnej wartości prądu ogniskowania -
dowolnie długi,
- skuteczność działania układu - większa od 90%.

Badania eksploatacyjne układu wykazały:

- poprawność działania układu w różnych warunkach pracy spawarki i przy spawaniu różnych materiałów,
- zadowalającą powtarzalność głębokości przetopów wykonywanych przy maksymalnej mocy spawarki WS-2/30 w stali 1H18N9T $/w_h = 4,54\%/$
- zadowalającą powtarzalność ustalanego prądu ogniskowania $/w_I < 1,15\%/$.

Proponowana metoda kontroli ogniskowania w stosunku do znanych metod posiada następujące zalety:

- większe wartości sygnałów uzyskiwanych przy małych mocach wiązki,
- zmniejszony wpływ prądu wiązki na wielkość sygnału,
- możliwość oddzielenia galwanicznego obwodu kolektora od reszty układu,
- możliwość pracy bez źródeł polaryzacji kolektora.

Przedstawione w pracy rozwiązanie techniczne problemu automatycznego ogniskowania jest rozwiązaniem nowym nie znanym w dostępnej literaturze.

SPIS LITERATURY

- [1]. Arata Y., Abe E., Fujisawa M., A Study on Dynamic Behaviours of Electron Beam Welding. Raport I - The Observation by a Fluoroscopic Method, Transaction of JWRI, 1976, 5, Nr 1.
- [2]. Arata Y., Matsuda F., Murakami T., Some Dynamic Aspects of Weld Molten Metal in Electron Beam Welding, Transaction of JWRI 1973, 2, Nr 2.
- [3]. Arata Y., Ishimura T., Miyamoto I., Focusing Characteristic of High Energy Density Beam, Transaction of JWRI 1973, 2, Nr 1.
- [4]. Arata Y., Tomie M., Terai K., Nagai H., Hatteri T., Shape Decision of High Energy Density Beam, 6-th Intern. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology, 1974.
- [5]. Arata Y., Tomie M., Kato Y., Some Properties of 30 KW - Class Electron Beam for Welding, Transaction of JWRI, 1973, 2, Nr 1.
- [6]. Barwicz W., Zastosowanie wiązek elektronowych w przemyśle i w badaniach naukowych UNITRA-OBREP, Warszawa 1974.
- [7]. Bendat J.S., Piersol A.G., Metody analizy i pomiarów sygnałów losowych, PWN, Warszawa 1976.
- [8]. Bolszakow I.A., Gutkin L.S., Lewin B.R., Stratonowicz R.L., Matematyczne podstawy współczesnej radioelektryki WNT, Warszawa 1971.
- [9]. Boncoeur H., Marhic J.-Y., Rapin M., Le réglage de la focalisation et le controle des autres paramètres d'un faisceau d'électrons par la mesure du courant traversant la pièce à souder, Soud. Techn. Conn., 1969, 23, Nr 5/6.

- [10]. Di Piazza L., Herzberger P., Soudage par faisceau d'électrons. Detection de la focalisation optimale, Soud. Techn. Conn., 1972, 26, Nr 5/6.
- [11]. Eggers H., Grimm H., Ruge J., Ausbildung der Dampfkapillare beim Elektronenstrahlschweissen, Schweissen und Schneiden 1972, 24, Nr 6.
- [12]. Friedel K., Influence of the Gun Parameters on Weld Penetration Depth in the Electron Beam Welding Method, 7-th Intern Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology Washington DC, 1976.
- [13]. Friedel K., Strefa aktywna wiązki elektronowej w spawarkach elektronowych, Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, Raport Nr 126, Wrocław 1977.
- [14]. Hałas A., Felba J., Kirczuk Cz., Kontrola ogniskowania wiązki w spawarce elektronowiązkowej, Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, Raport Nr 29, Wrocław 1974.
- [15]. Hehl D., Höcker K.H., Mayer R., Beitrag zur Theorie der Dampfkapillare beim Elektronenstrahlschweissen, DVS Berichte 44, Strahltechnik, DVS Düsseldorf 1977.
- [16]. Jüptner W., Bödecker V., Sepold G., Influence of the Spatial Intensity Distribution on Deep Welding Geometry, 6-th Intern. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology 1974.
- [17]. Kirczuk Cz., A New Method of Electron Beam Focusing in the EBW Machine, 7-th Intern. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology, Washington DC, 1976.

- [18]. Kirczuk Cz., Układ do automatycznego ogniskowania w spawarkach elektronowych. Założenie i projekt wstępny, Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, Raport Nr 114, Wrocław 1976.
- [19]. Kirczuk Cz., Sposób regulacji ogniskowania wiązki elektronów w urządzeniach elektronowiązkowych i układ do regulacji ogniskowania wiązki w urządzeniach elektronowiązkowych, patent PRL Nr 95588.
- [20]. Leskov G.I., Trunov E.N., Žiwaga L.I., Dinamičeskije jawlenija w swarocnoj wannie bolšoj glubiny pri elektronolučebnoj swarkie, Awtomatičeskaja Swarka, 1975 Nr 1.
- [21]. Mara G.L., Funk E.R., McMaster R.C., Pence P.E., Penetration Mechanism of Electron Beam Welding and the Spiking Phenomenon, Welding Journal 1974, 53, Nr 6
- [22]. Meleka A.H., Electron-beam Welding. Principles and Practice, McGraw-Hill, London 1971.
- [23]. Misiurewicz P., Grzybek M., Półprzewodnikowe układy logiczne, WNT, Warszawa 1975.
- [24]. Miyazaki T., Taniguchi N., An Experimental Analysis of Penetration Mechanism of High - Power - Density Electron Beam, 5-th Intern. Conf. on Electron Beam and Ion Beam Science and Technology, 1972.
- [25]. Miyazaki T., Material Removal Produced by a High- Power - Density Electron Beam, Journal of Applied Physics 1977, 48, Nr 7.

- [26]. Olszewski N.A., Gutkin A.M., Girimadzi G.D., Pieremiešćenije rasplawlennogo matieriała w processie elektronolučewoj swarki, Swaróčnoje Proizwodstwo, 1974, Nr 9.
- [27]. Patent angielski Nr 1259146.
- [28]. Patent francuski Nr 2095821.
- [29]. Patent francuski Nr 2024057.
- [30]. Patent RFN Nr 2141971.
- [31]. Patent RFN Nr 2122412.
- [32]. Patent RFN Nr 2013950.
- [33]. Patent USA Nr 3542995.
- [34]. Phadke M.S., Joglekar A.M., Wu S.M., Inwestigation of Spiking in Electron Beam Welding Using Stationary Stochastic Model, Transaction of the ASME, ser. B, Journal of Engineering for Industry, 1977, 99, Nr 2.
- [35]. Rastrigin L.A., Sistiemy Ekstremalnogo regulirowanija, Izd. Nauka, Moskwa 1974.
- [36]. Schebesta W., Untersuchungen zur Kapillardynamik beim Elektronenstrahlschweissen, DVS Berichte 44 Strahltechnik VIII, DVS Düsseldorf 1977.
- [37]. Schiller S., Heisig U., Panzer S., Elektronenstrahltechnologie, VEB Verlag Technik, Berlin 1976.
- [38]. Schwartz H., Mechanism of High - Power - Density Electron Beam Penetration in Metal, Journal of Applied Physics, 1964, 35, Nr 7.

- [39]. Smirnow N.W., Dunin - Barkowski I.W., Kurs rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej, PWN, Warszawa 1969.
- [40]. Tong H., Giedt W.H., Radiograph of Electron Beam Welding Cavity, The Review of Scientific Instruments 1969, 40, Nr 10.
- [41]. Tong H., Heat Transfer and Cavity Penetration during Electron Beam Welding, Raport University of California Department of Mechanical Engineering Davis, California 1969, Nr 69-14.
- [42]. Zatyka J., Spawanie wiązką elektronów, WNT, Warszawa 1965.
- [43]. Zujew I.W., Rykalin N.N., Uglov A.A., Ocenka krytycznej udzielnoy mośności pri elektronolučewoj swarkie s kindźalnym proplawlenijem, Fizika i Chimija Obrabotki Materialov, 1970, Nr 3.
- [44]. Zujew I.W., Krasilin J.L., Rykalin N.N., Uglov A.A., Sorsorow, O mechanizmie proplawlenija krystalicheskich tiel elektronnym lučom. Doklady A.N., SSSR, Izd., Nauka, Moskwa 1967, Nr 1.

D O D A T E K

F	50	60	70	80	90	'100	[DB]
[HZ]	*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*						
12.5	X						50.2
16	XXXXXXX						55.9
20	XXXXXXXX						57.4
25	XXXXX						53.6
31.5	X						50
40	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						65.8
50	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						87.1
63	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						66.6
80	XXXXX						53.9
100	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						69.9
125	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.8
160	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						77.1
200	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.4
250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						68.9
315	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						65.7
400	XXXXXXXXXXXX						59.8
500	XXXXXXXXXXXX						59.9
630	XXXXXXXXXXXX						59.5
800	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						75.5
1000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						84.2
1250	XXXXXXXXXXXX						62.6
1600	XXXXXXXXXXXX						58.3
2000	XXXXXXXXXXXX						60.7
2500	XXXXXXXXXXXX						60.5
3150	XXXXXXXXXXXX						63.2
4000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						74.8
5000	XXXXXXXXXXXX						57.6
6300	X						50.1
8000	XXX						52.3
10000	X						50
12500	X						50
16000	X						50
20000	X						50
25000	X						50
31500	X						50
40000	X						50
LIN	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						89.8

RYS. 1. ROZKLAD WIDMOWY SKŁADOWEJ PRĄDU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIĄZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : STAL 1H18N9T

PARAMETRY SPAWANIA
 U = 15 [KV] I(A) = 30 [MA] I_f = 662.5 [MA] V = 170 [CM/MIN]

F [KHZ]	50	60	70	80	90	100	[DB]	
12.5	*.....*							
16	X						50	
20	X						50.1	
25	XXXXXX						55	
31.5	XXXXXXXXXX						57.9	
40	XXXXXXXXXX						54.6	
50	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						60.6	
63	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						66.4	
80	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						62.1	
100	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						61.4	
125	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.4	
160	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.9	
200	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.5	
250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						66.2	
315	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						67.1	
400	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						68.6	
500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						69.1	
630	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.5	
800	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						71.3	
1000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						73.6	
1250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						76	
1600	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						77.5	
2000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79.7	
2500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						81.5	
3150	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						82.6	
4000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						81	
5000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						82.3	
6300	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80	
8000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						77.9	
10000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						75.1	
12500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.7	
16000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						65.3	
20000	XXXXXXXX						61.8	
25000	X						55.1	
31500	X						50	
40000	X						50	
LIN	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						50	
							90.6	

FYS. 2. ROZKLAD WIDMOWY SKŁADOWEJ PRĄDU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIĄZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : STAL 1H18N9T

PARAMETRY SPAWANIA

U = 15 [KV], I(A) = 30 [MA], I = 675 [MA], V = 170 [CM/MIN]

F	50	60	70	80	90	100	[dB]
CHZ	*.....*						
12.5	XXX						51.9
16	XXXXXX						54.5
20	XXXXXXXX						55.3
25	XXXXXX						54.3
31.5	X						50
40	XXXXXXXXXXXXXXXXXX						62.7
50	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.7
63	XXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.4
80	XXXXXXX						57.2
100	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						73
125	XXXXXXXXXX						58.5
160	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						67
200	XXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.3
250	XXXXXX						54.9
315	XXXXXXXXXXXXXXXXXX						61.9
400	XXXX						52.8
500	XXX						51.8
630	XXXX						52.7
800	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						68
1000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						77.4
1250	XXXXXXXXXX						57.1
1600	XXXXXX						54.4
2000	XXXXXXXXXXXXXXXXXX						62.7
2500	XXXXXXXXXXXX						60.4
3150	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						64
4000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						75.2
5000	XXXXXXXXXXXX						59.8
6300	X						50.2
8000	XXXXXXXXXX						57
10000	X						50
12500	X						50
16000	X						50
20000	X						50
25000	X						50
31500	X						50
40000	X						50
LIN	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						85.9

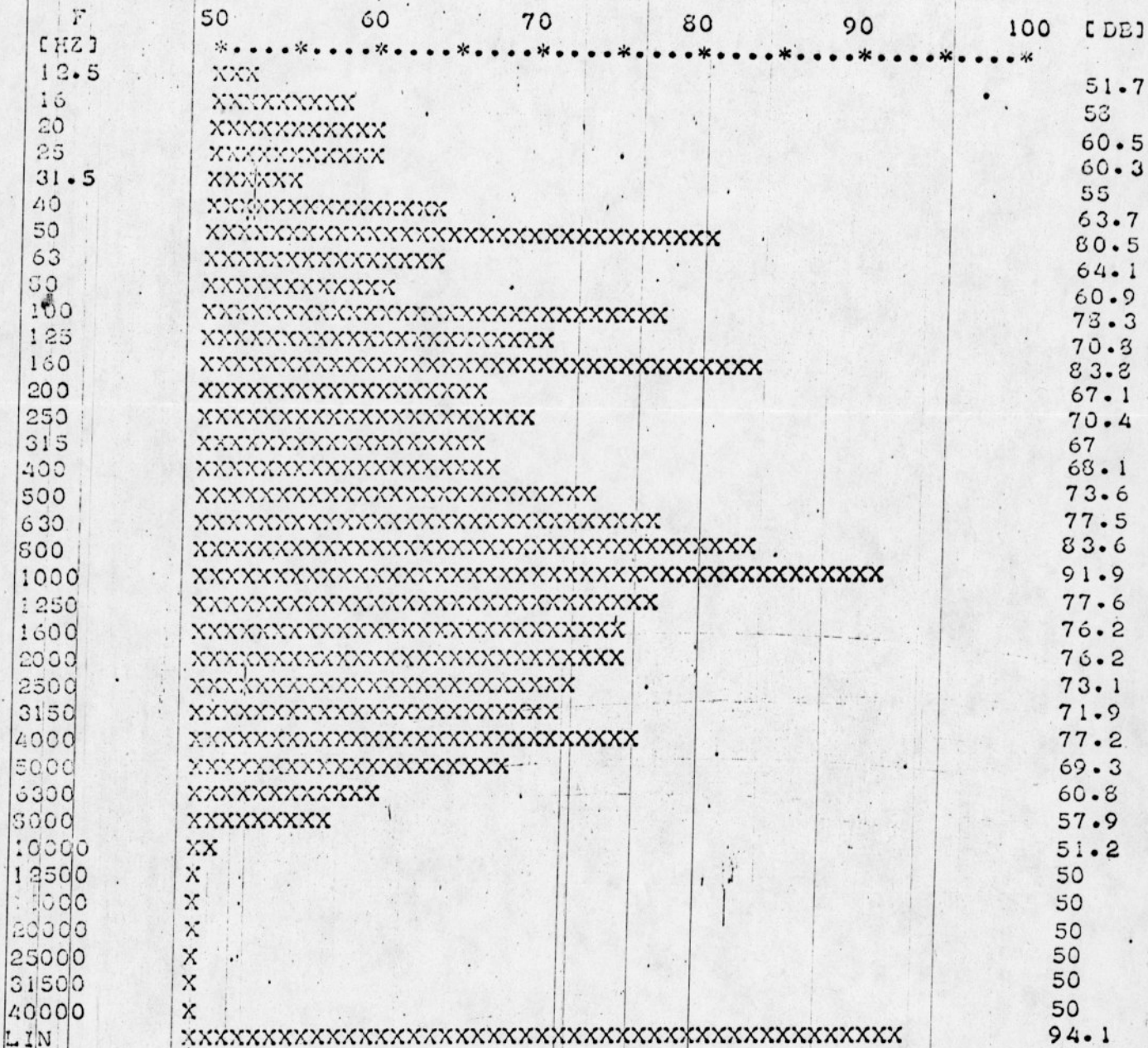
RY. 3.

ROZKŁAD WIDMOWY SKŁADOWEJ PRĄDU KOLEKTORA ELEKTRONÓW,
PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : STAL 1H18N9T

PARAMETRY SPAWANIA

U = 15 [KV] I(A) = 30 [MA] I = 687.5 [MA] V = 170 [CM/MIN]

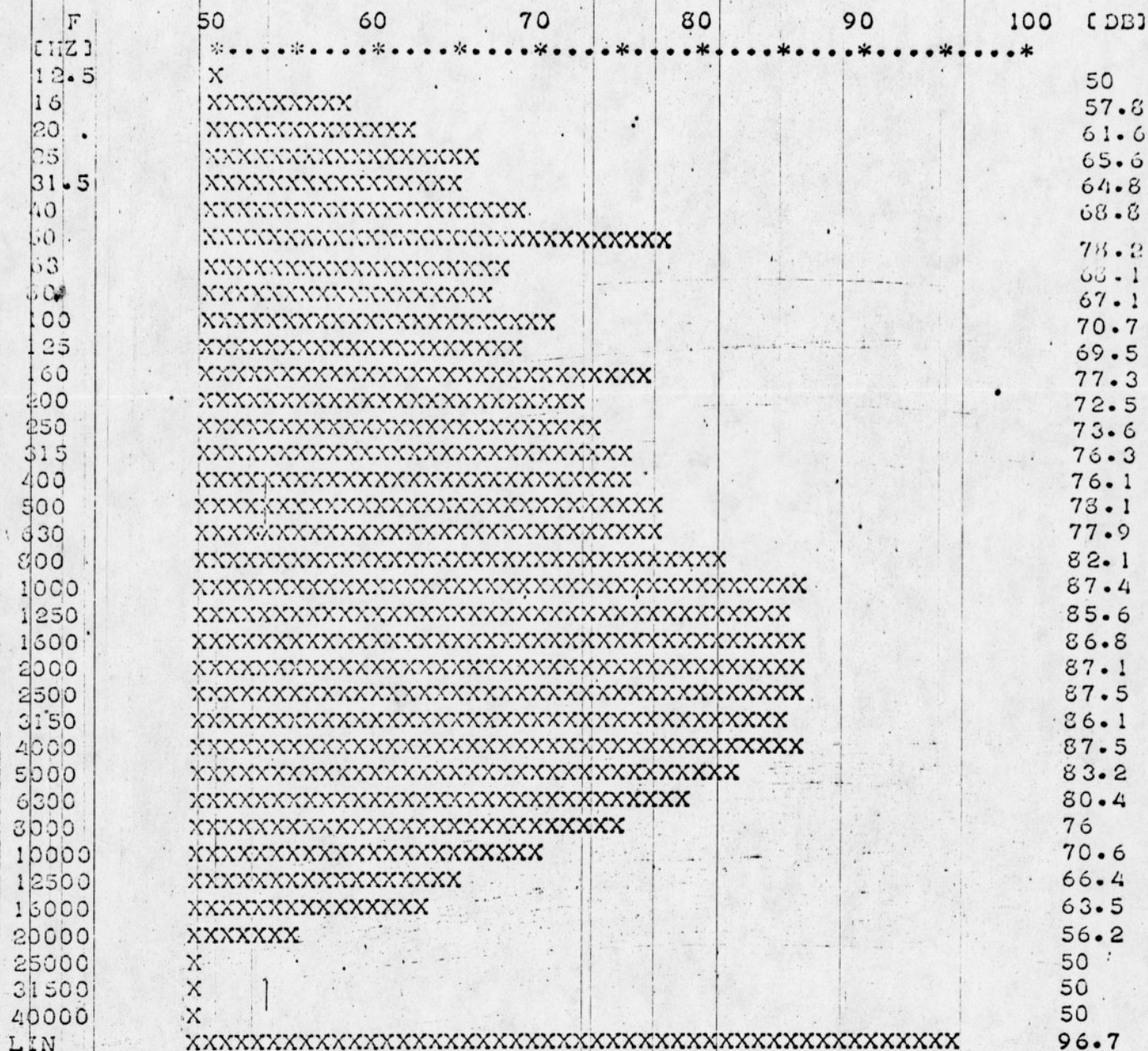


RY. 4. ROZKLAD WIDMOWY SKŁADOWEJ PRĄDU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIĄZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : MIEDZ M1-G

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 837.5 [MA] V = 170 [CM/MIN]



RYS. 5. ROZKLAD WIDMOWYSKLADOWEJ PRADU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : MIEDZ M1-G

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 350 [MA] V = 170 [CM/MIN]

F [MHz]	50	60	70	80	90	100 [dB]
12.5	*.....*					
16	X					50
20	XXXXXXXXXX					56.1
25	XXXXXXXXXXXXXX					61.4
31.5	XXXXXXXXXXXXXX					62.5
40	XXXXXXXXXXXXXX					62.3
50	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					67.1
63	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					82.5
80	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					67.2
100	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					65.9
125	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					76
160	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					70.8
200	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					31.2
250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					71.2
315	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					71.1
400	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					73.8
500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					75.4
630	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					77.6
800	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					80.3
1000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					83
1250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					88.2
1600	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					84.6
2000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					84.4
2500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					85
3150	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					83.2
4000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					82.4
5000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					85.2
6300	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					79.9
8000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					76
10000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					72.7
12500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					66.5
16000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					64.9
20000	XXXX					62.7
25000	X					52.8
31500	X					50
40000	X					50
LIN	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					50
						95.3

RYC. 6. ROZKLAD WIDMOWY SKLADOWEJ PRADU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : MIEDZ, M1-G

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 862.5 [MA] V = 170 [CM/MIN]

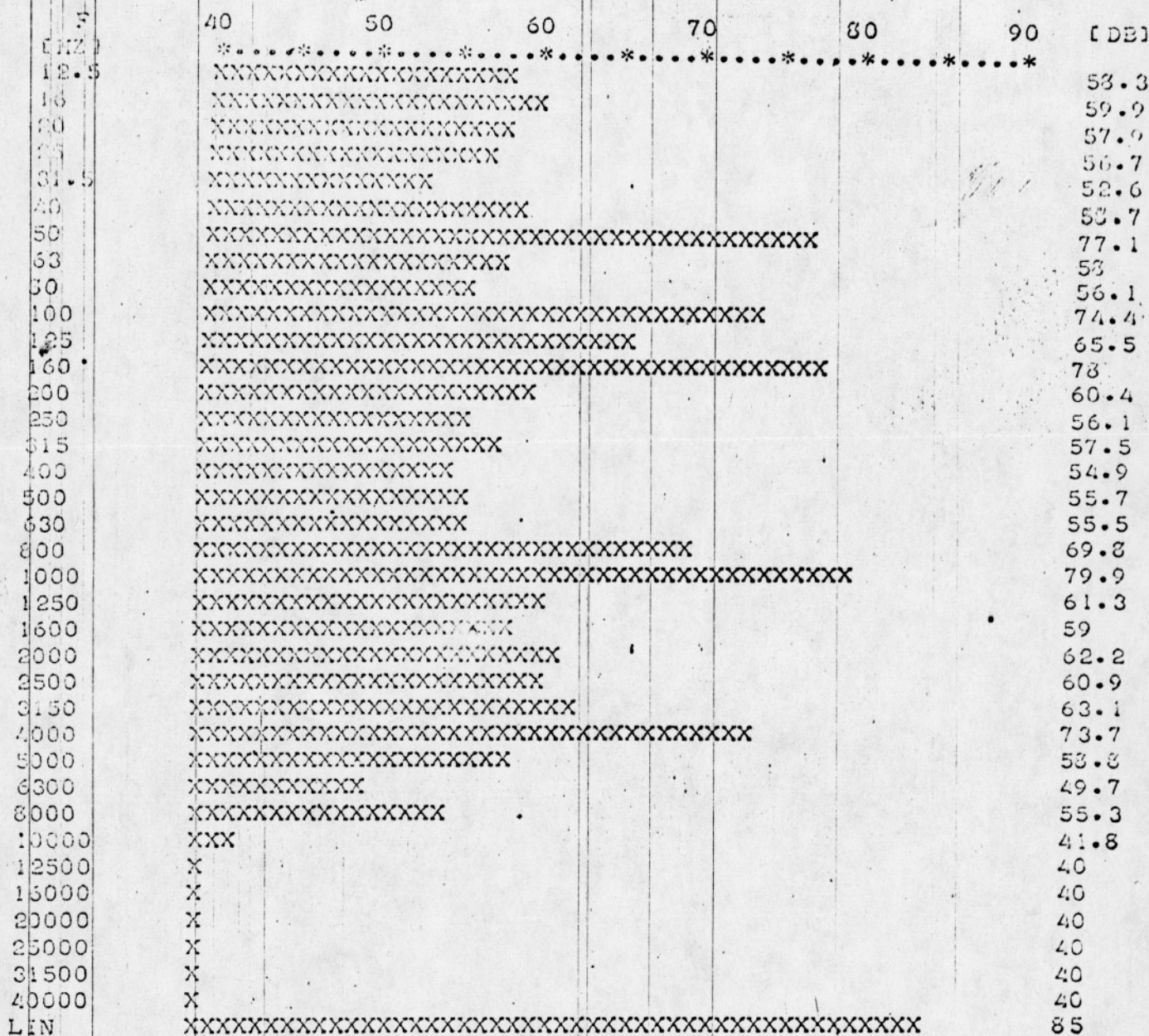


RYS. 8. ROZKLAD WIDMOWSKLADOWEJ PRADU KOLEKTORA ELEKTRONOW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : ALUMINIUM PA-1

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 890 [MA] V = 170 [CM/MIN]



RY. 9. ROZKLAD WIDMOWYSKLADOWEJ PRADU KOLEKTORA ELEKTRONOW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : ALUMINIUM PA1

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 902.5 [MA] V = 170 [CM/MIN]

F [HZ]	50	60	70	80	90	100	[DB]
						
12.5	XXXXXXXX						56.8
16	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						67.1
20	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						71
25	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						76.1
31.5	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.7
40	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						74.1
50	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						87.5
63	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						72
80	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						72.6
100	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						92.3
125	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79.6
160	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						92
200	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79.2
250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						75.3
315	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						77.1
400	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.1
500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						69.8
630	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						71
800	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						82.6
1000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						92.4
1250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						74.9
1600	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						71.6
2000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						75.4
2500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						73.4
3150	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						74.4
4000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						81.9
5000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						68.3
6300	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						63.8
8000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						66.4
10000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						64.5
12500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						62.9
16000	XXXXXXXXXXXX						59.1
20000	XXX						51.9
25000	X						50
31500	X						50
40000	X						50
LIN	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						98

RYS. 10. ROZKLAD WIDMOWSKLADOWEJ PRADU KOLEKTORA ELEKTRONOW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : WOLFRAM

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I 877.5 [MA] V = 0 [CM/MIN]

F [Hz]	50	60	70	80	90	100	[dB]	
12.5	*.....*							
16	X						50	
20	XXXXXXXXXX						53.8	
25	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						66.4	
31.5	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						70.6	
40	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						73.1	
50	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						76	
63	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79	
80	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.9	
100	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.3	
125	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						82.6	
160	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.6	
200	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79.2	
250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						78.5	
315	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79.1	
400	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.3	
500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						81.3	
630	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						81.2	
800	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.6	
1000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.9	
1250	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						83.1	
1600	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						80.1	
2000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79.1	
2500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						79	
3150	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						76.8	
4000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						76.1	
5000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						75.1	
6300	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						72.6	
8000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						69.5	
10000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						66.7	
12500	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						62.3	
16000	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						60.8	
20000	XX						60.2	
25000	X						50.3	
31500	X						50	
40000	X						50	
LIN	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX						93.6	

RY. 11. ROZKLAD WIDMOWY SKŁADOWEJ PRĄDU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

MATERIAL : WOLFRAM

PARAMETRY SPAWANIA

U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 890.0 [MA] V = 0 [CM/MIN]

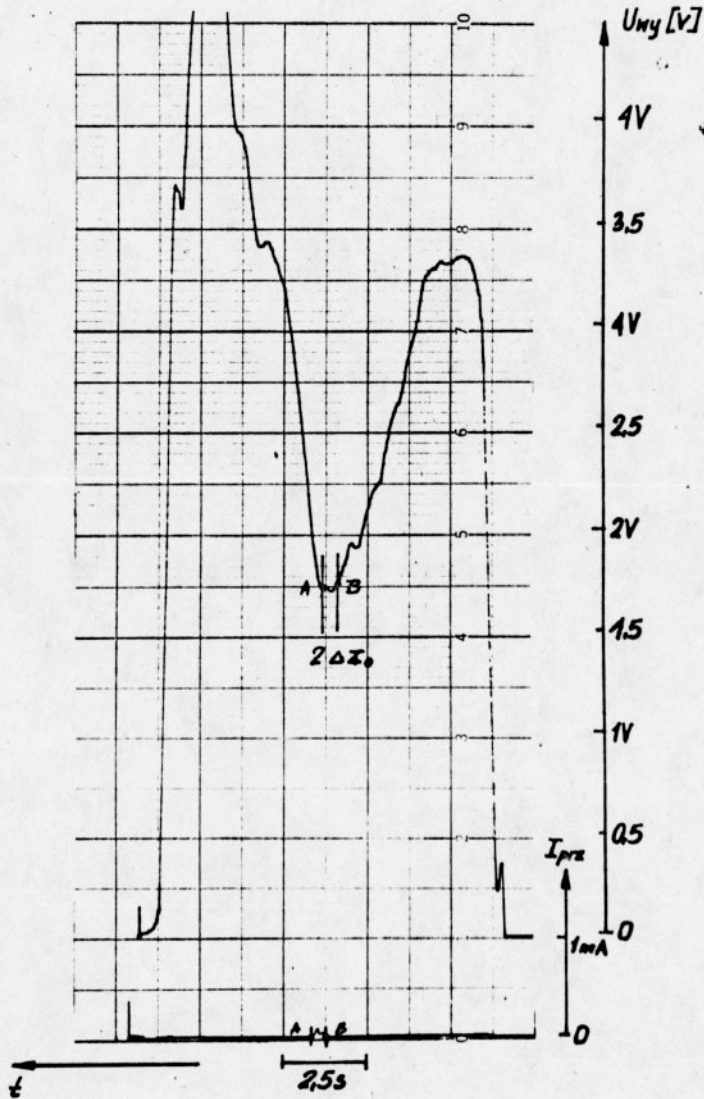


RYŚ. 12. ROZKLAD WIDMOWYSKŁADOWEJ PRĄDU KOLEKTORA ELEKTRONÓW, PODCZAS SPAWANIA WIAZKA ELEKTRONOWA.

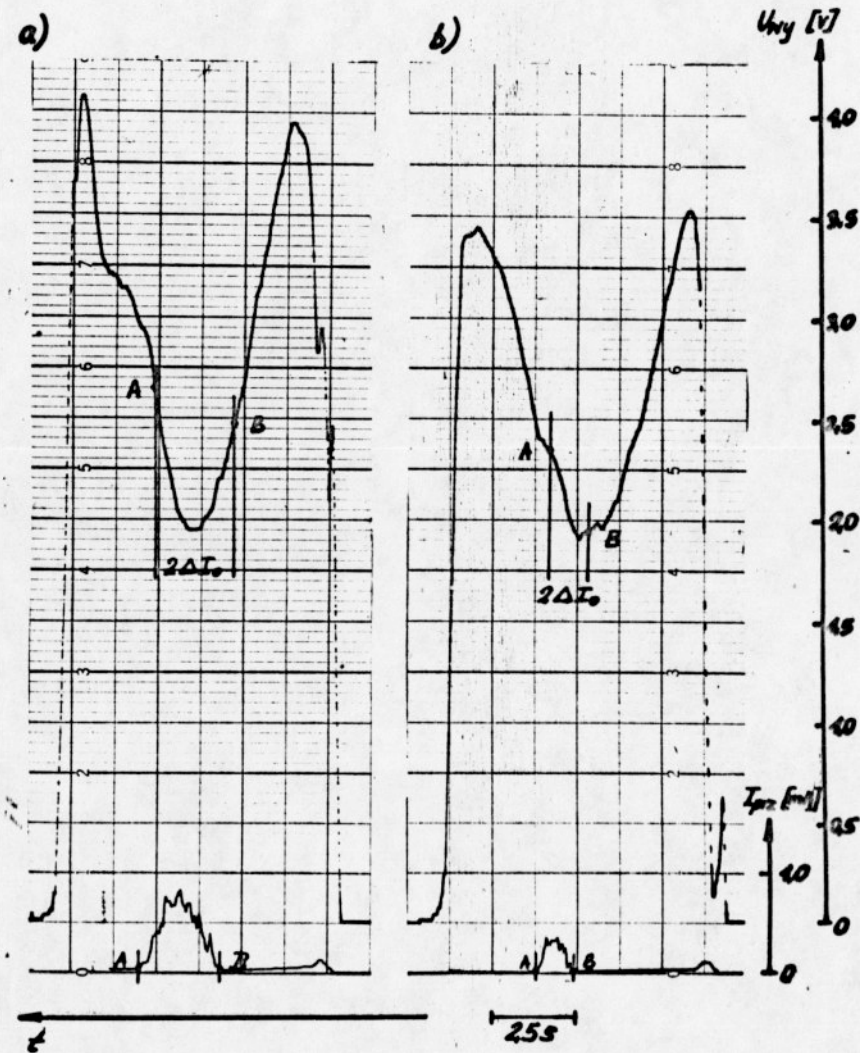
MATERIAL : WOLFRAM

PARAMETRY SPAWANIA

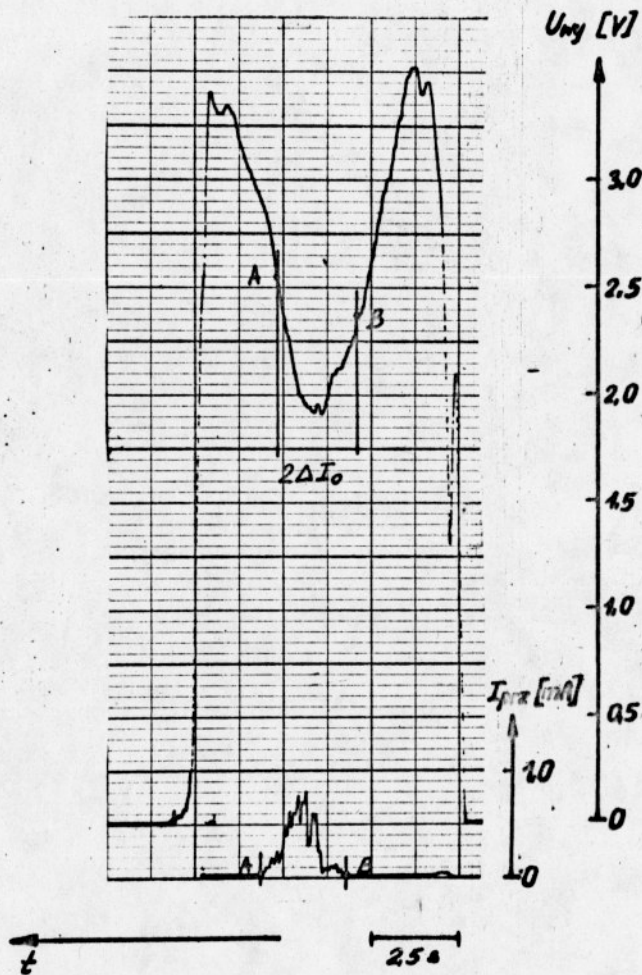
U = 25 [KV] I(A) = 60 [MA] I = 902.5 [MA] V = 0 [CM/MIN]



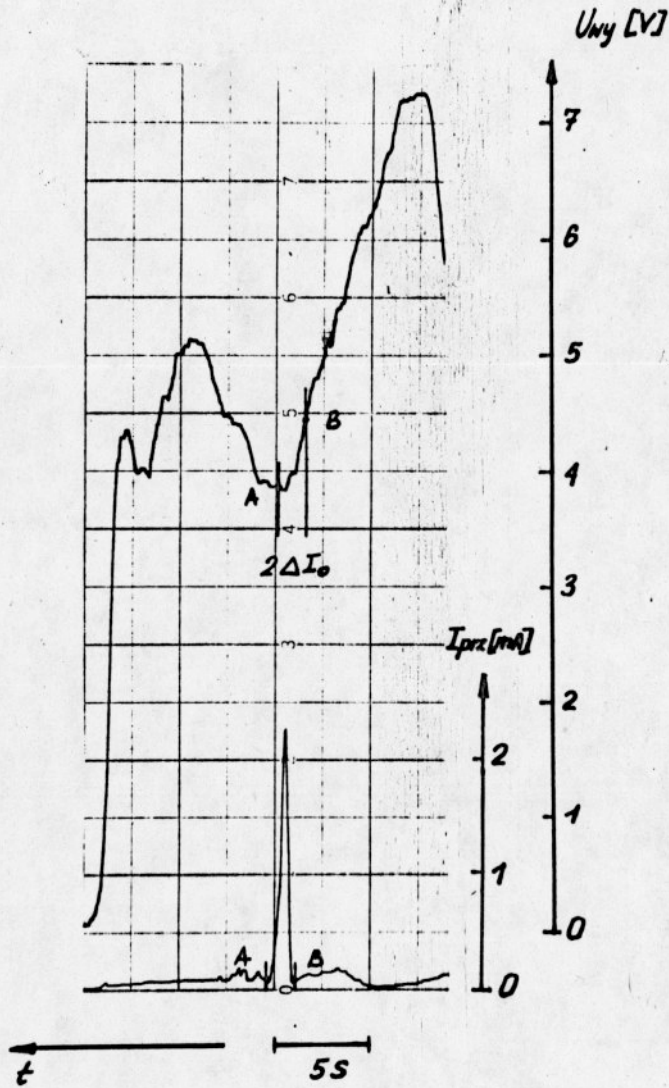
Rys. 13. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: $U = 25 \text{ kV}$, $I = 80 \text{ mA}$, $V_s = 40 \text{ cm/min}$, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{60} \text{ A/sek}$, stal 1H18N9T o grubości 8 mm; $\delta_I = 0,74\%$, $\delta_p = 0,0\%$.



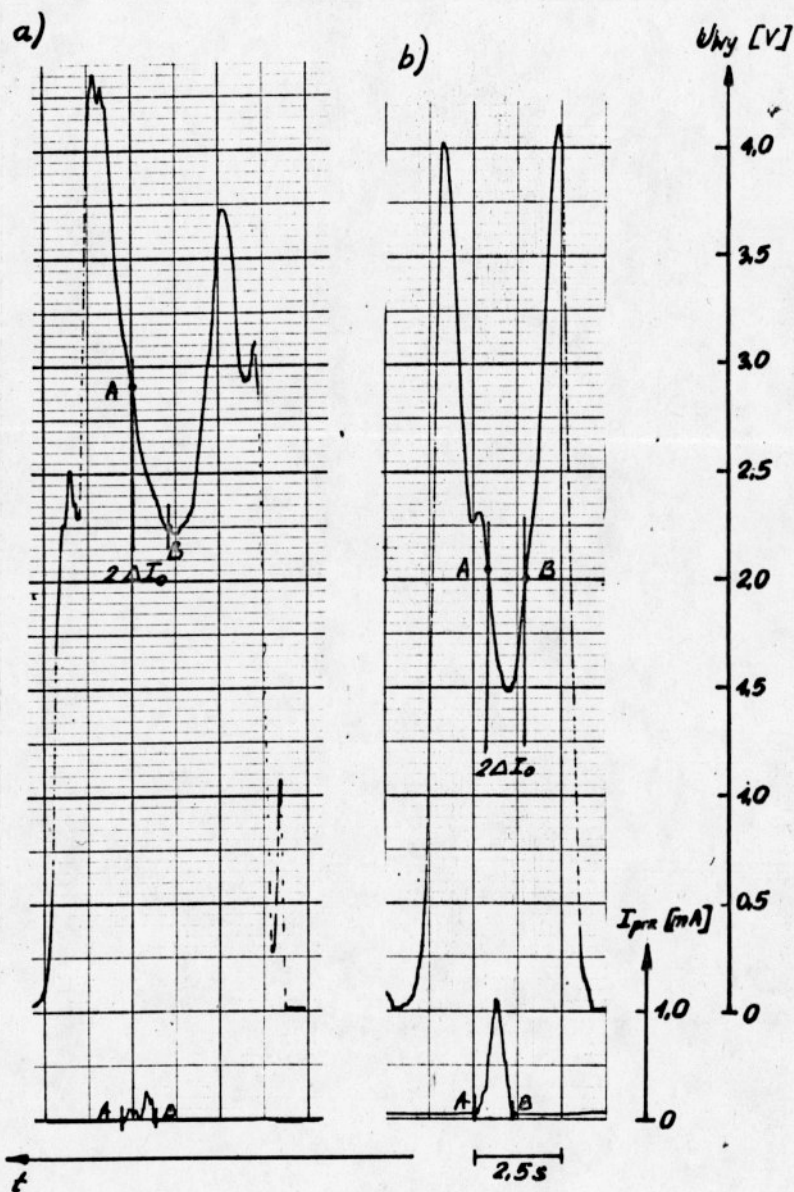
Rys. 14. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: a/ $U = 25$ kV, $I = 26$ mA, $V_s = 80$ cm/min, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{60}$ A/sek, stal 1H18N9T o grubości 2 mm; $\delta_I = 4,8\%$, $\delta_p = +0,15\%$; b/ $U = 25$ kV, $I = 30$ mA, $V_s = 20$ cm/min, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{60}$ A/sek, stal 1H18N9T o grubości 3 mm; $\delta_I = 2,2\%$, $\delta_p = -0,55\%$.



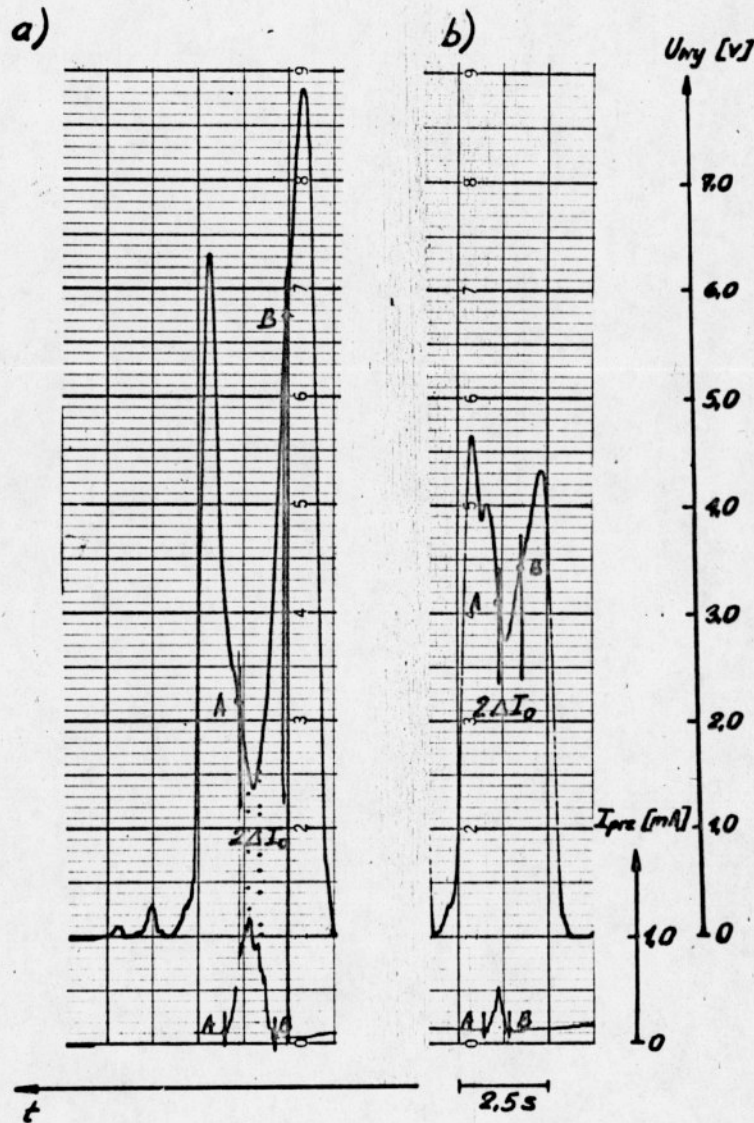
Rys. 15. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: $U=25$ kV, $I=27$ mA, $V_s=100$ cm/min, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{60}$ A/sek, stal o grubości 2 mm. $\delta_I = 4,6\%$, $\delta_p = +0,02\%$.



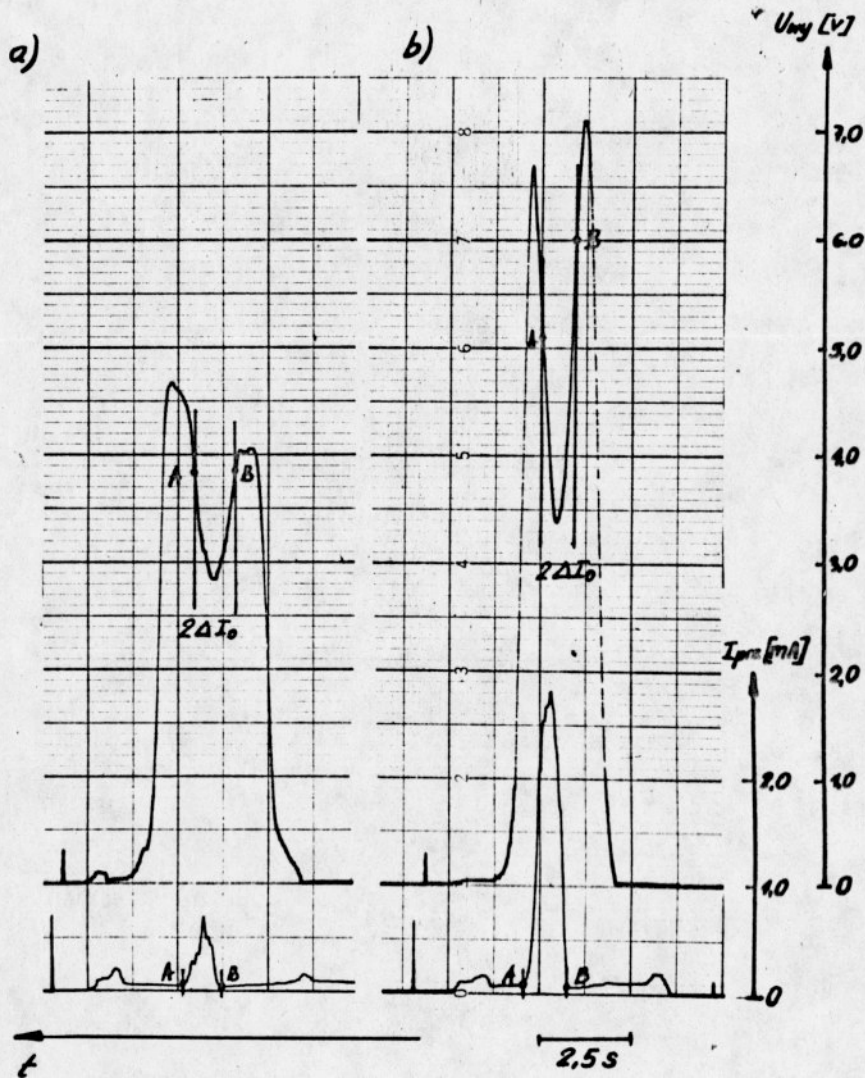
Rys. 16. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: $U=25$ kV, $I=80$ mA, $V_s=80$ om/min, $\frac{dI_o}{dt} = \frac{1}{150}$ A/sek, aluminium PA1 o grubości 8 mm. $\delta_I = 2,0\%$, $\delta_p = +0,5\%$.



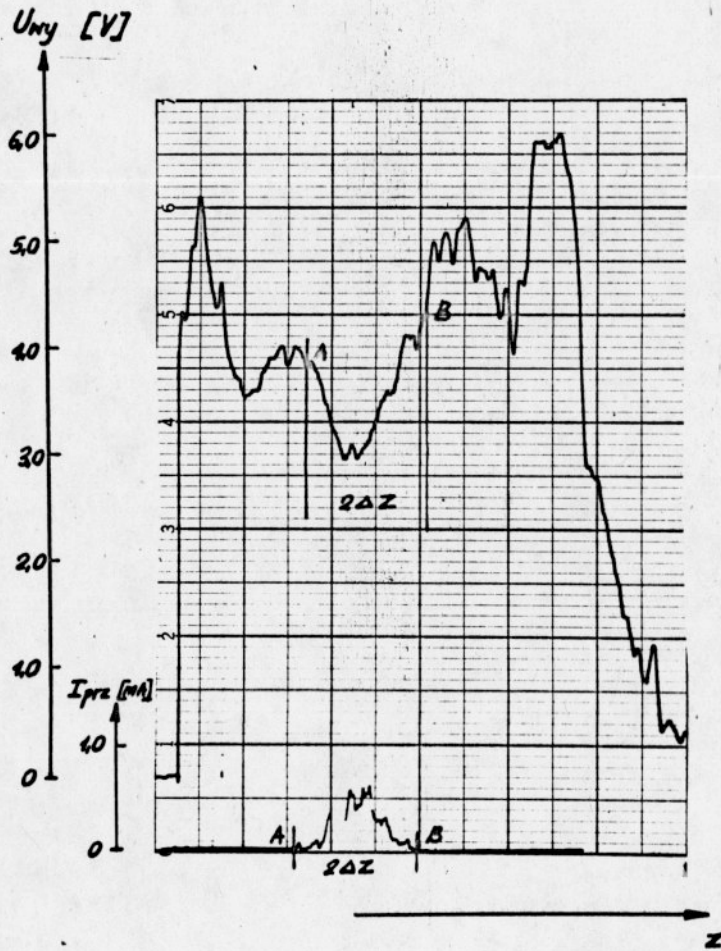
Rys. 17. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: a/ $U = 25$ kV, $I = 35$ mA, $V_s = 60$ cm/min, $\frac{dI_o}{dt} = \frac{1}{60}$ A/sek, aluminium PA4 o grubości 3 mm, $\delta_I = 1,7\%$, $\delta_p = -1,50\%$; b/ $U = 25$ kV, $I = 60$ mA, $V_s = 60$ cm/min, $\frac{dI_o}{dt} = \frac{1}{60}$ A/sek, aluminium PA6 o grubości 5 mm, $\delta_I = 2,0\%$, $\delta_p = -0,15\%$.



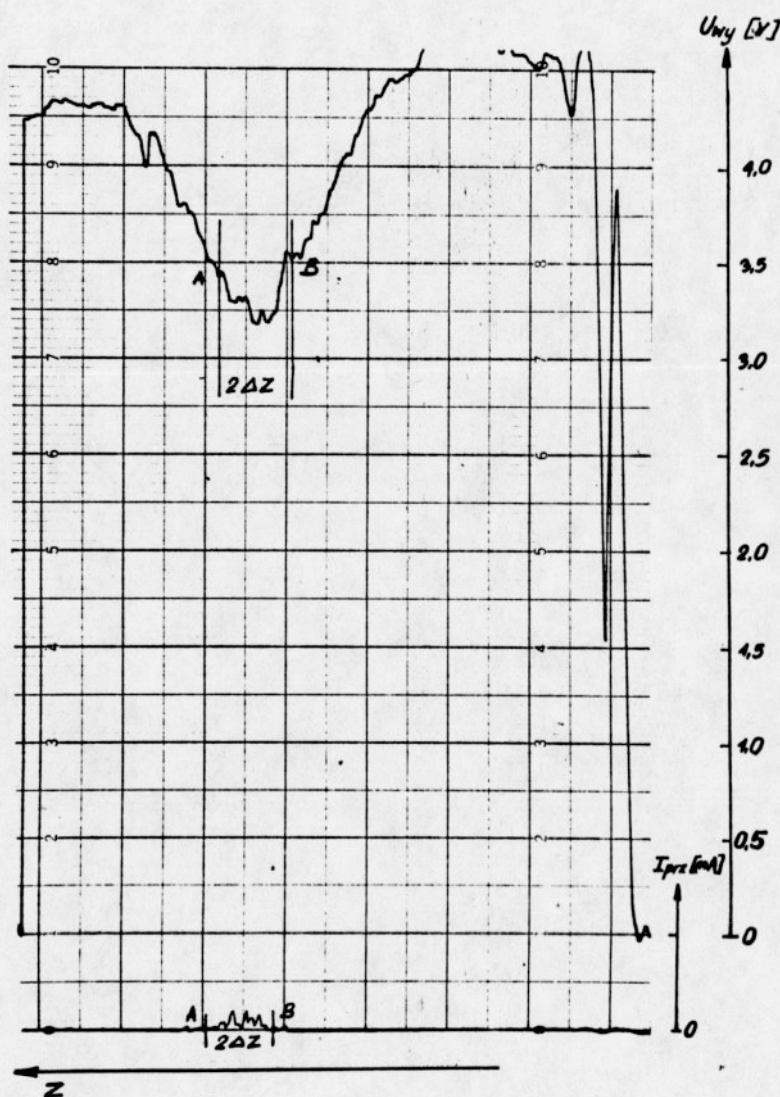
Rys. 18. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: a/ $U = 25 \text{ kV}$, $I = 80 \text{ mA}$, $V_s = 80 \text{ cm/min}$, $\frac{dI_o}{dt} = \frac{1}{60} \text{ A/sek}$, miedź M1G o grubości 3,5 mm; $\delta_I = 2,8\%$, $\delta_p = +0,54\%$; b/ $U = 25 \text{ kV}$, $I = 55 \text{ mA}$, $V_s = 60 \text{ cm/min}$, $\frac{dI_o}{dt} = \frac{1}{60} \text{ A/sek}$, miedź M1G o grubości 2 mm, $\delta_I = 1,2\%$, $\delta_p = +0,32\%$.



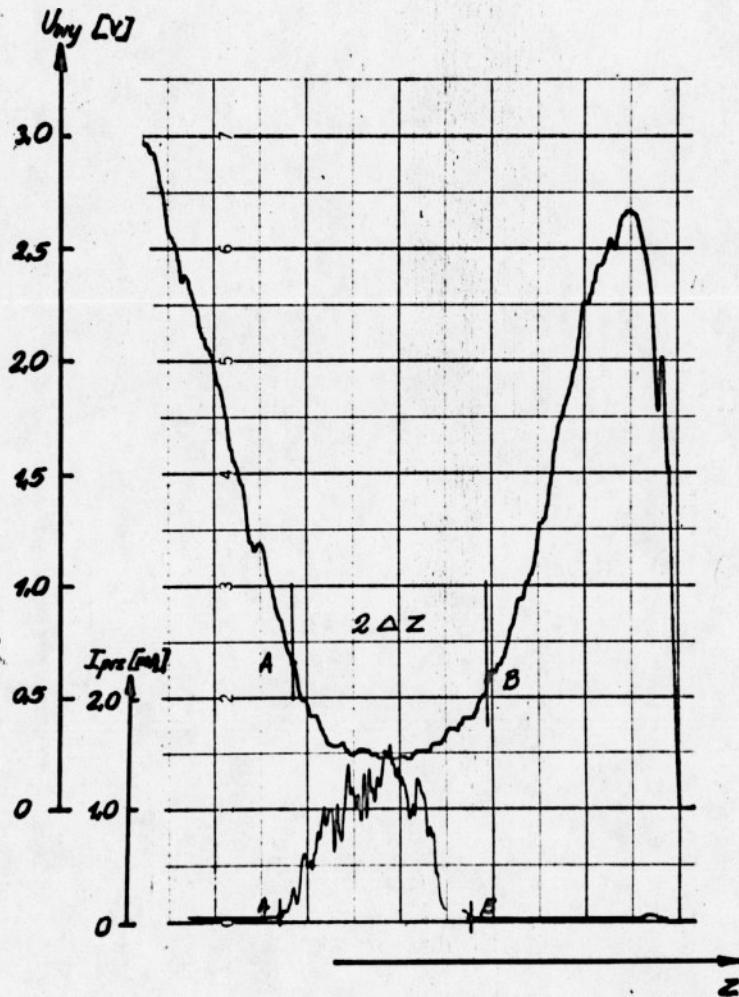
Rys. 19., Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę w funkcji czasu. Parametry spawania: a/ $U = 25$ kV, $I = 40$ mA, $V_s = 60$ cm/min, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{60}$ A/sek, miedź MIG o grubości 1,5 mm; $\delta_I = 2\%$, $\delta_p = 0,0\%$; b/ $U = 25$ kV, $I = 36$ mA, $V_s = 100$ cm/min, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{30}$ A/sek, miedź MIG o grubości 1,0 mm, $\delta_I = 4,8\%$, $\delta_p = +0,12\%$.



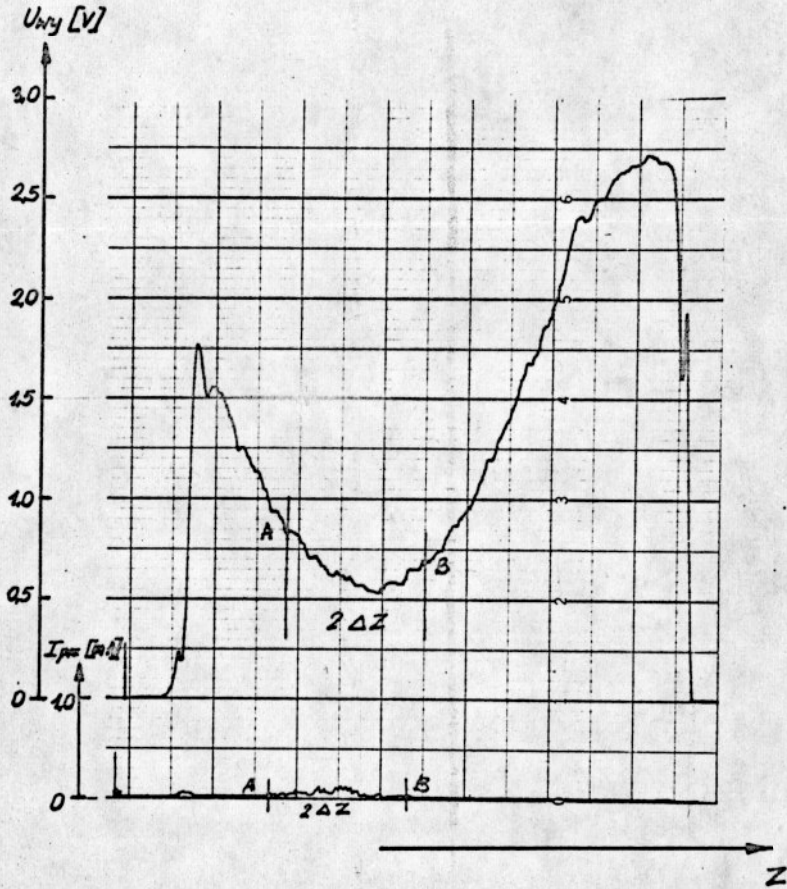
Rys. 20. Zależność napięcia wyjściowego z przetwornika i prądu przechodzącego przez próbkę od położenia próbki względem wiązki elektronów. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $I = 80$ mA, $V_s = 40$ cm/min, kąt pochylenia próbki 30° , stal 1H18N9T o grubości 8 mm; $2\Delta z = 11$ mm.



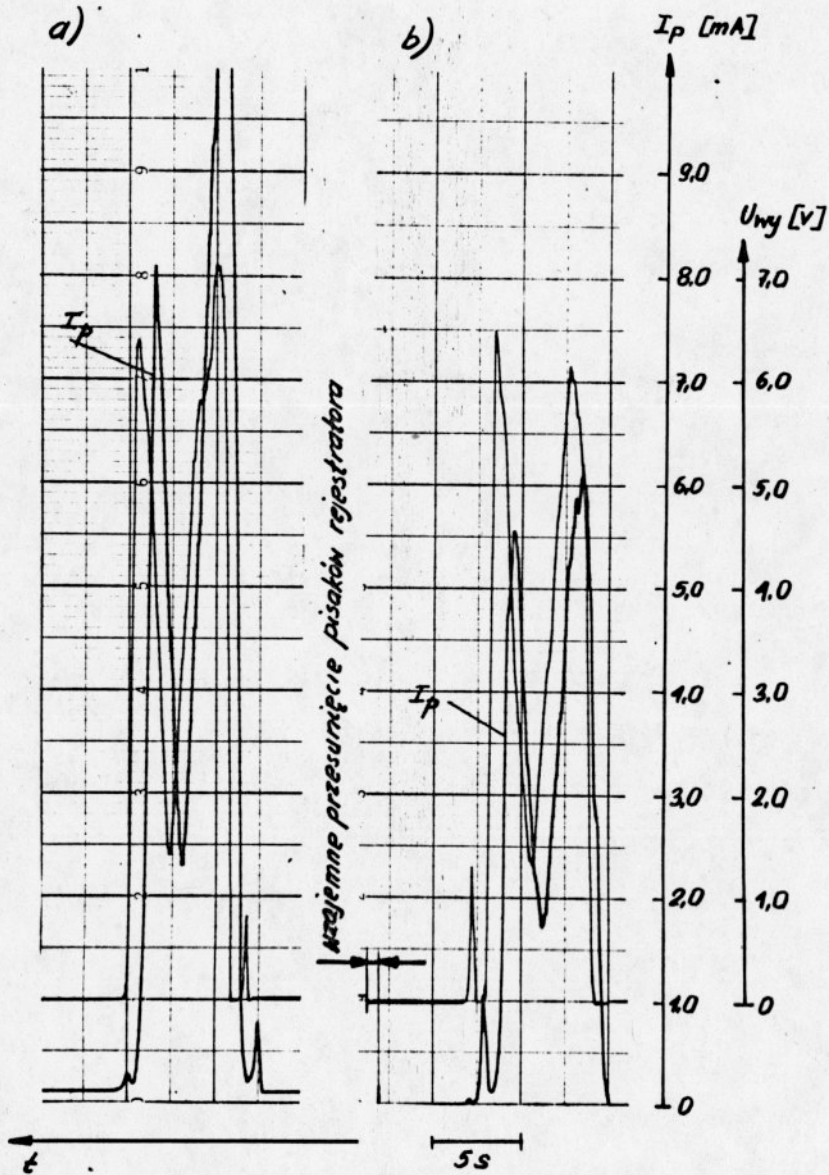
Rys. 21. Zależność napięcia wyjściowego z przetwornika $f-U$ i prądu przechodzącego przez próbkę od położenia próbki względem wiązki elektronów. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $I = 60$ mA, $V_s = 60$ cm/min, kąt pochylecia próbki 30° , miedź M1G o grubości 2 mm; $2\Delta z = 12,2$ mm.



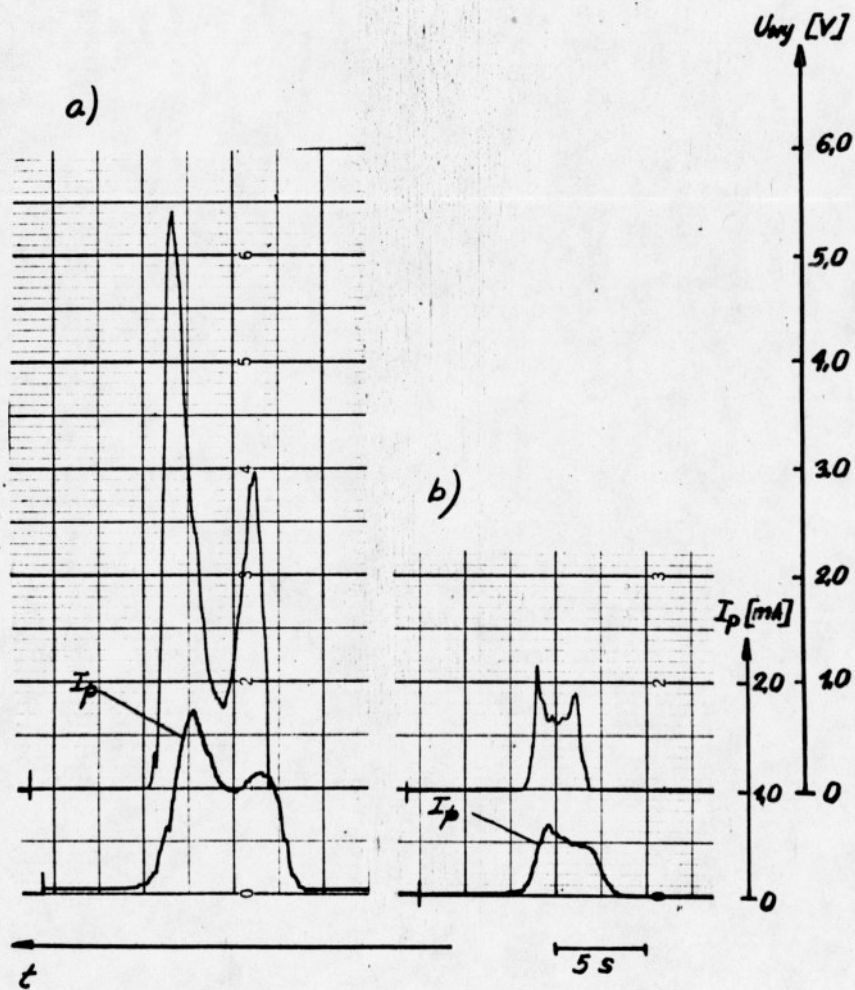
Rys. 22. Zależność napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu przechodzącego przez próbkę od położenia próbki względem wiązki elektronów. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $I = 45$ mA, $V_s = 60$ cm/min, kąt pochylenia próbki 30° , stal 1H18N9T o grubości 3 mm; $2\Delta z = 38,8$ mm.



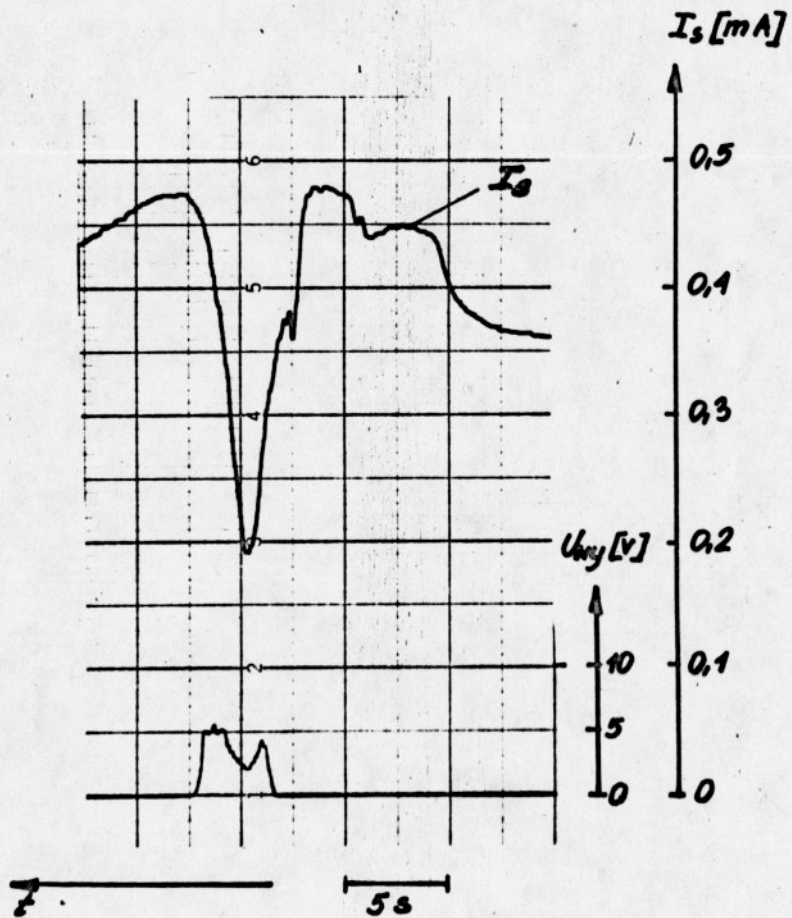
Rys. 23. Zależność napięcia wyjściowego z przetwornika f - U i prądu przechodzącego przez próbkę od położenia próbki względem wiązki elektronów. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $I = 35$ mA, $V_s = 100$ cm/min, stal 1H18N9T o grubości 2 mm, kąt pochylenia próbki 30° ; $2\Delta z = 51$ mm.



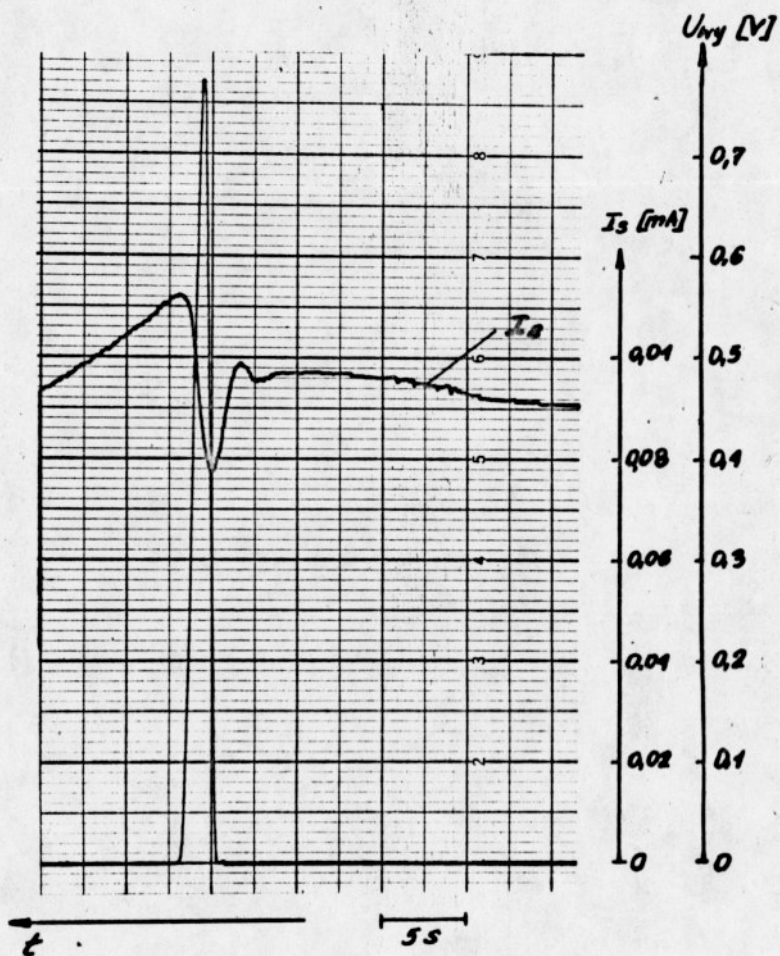
Rys. 24. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu elektronów powolnych w funkcji czasu. Parametry spawania: $U = 25 \text{ kV}$, $V_B = 0$ $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{30} \text{ A/Bok}$; a/ $I = 60 \text{ mA}$, b/ $I = 40 \text{ mA}$, stal 1H18N9T o grubości 25 mm.



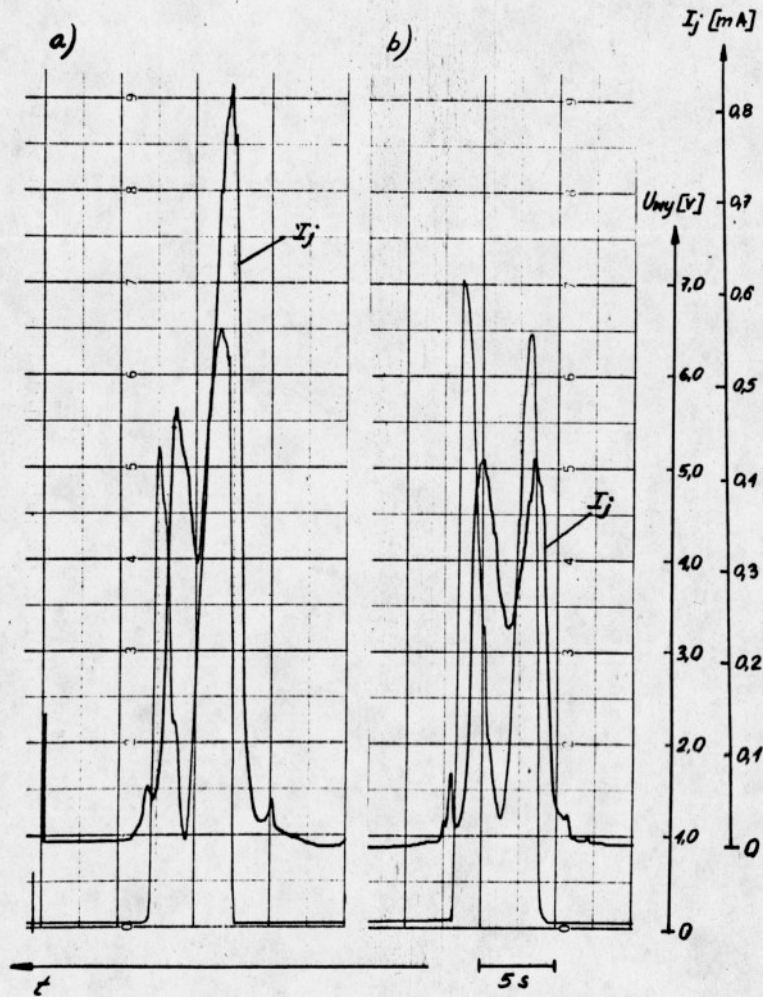
Rys. 25. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika $f-U$ i prądu elektronów powolnych w funkcji czasu.
Parametry spawania: $U = 25 \text{ kV}$, $V_{II} = 0$, $\frac{dI}{dt} = \frac{1}{30} \text{ A/nsek}$;
a/ $I = 20 \text{ mA}$; b/ $I = 15 \text{ mA}$, stal 1H18N9T o grubości 25 mm.



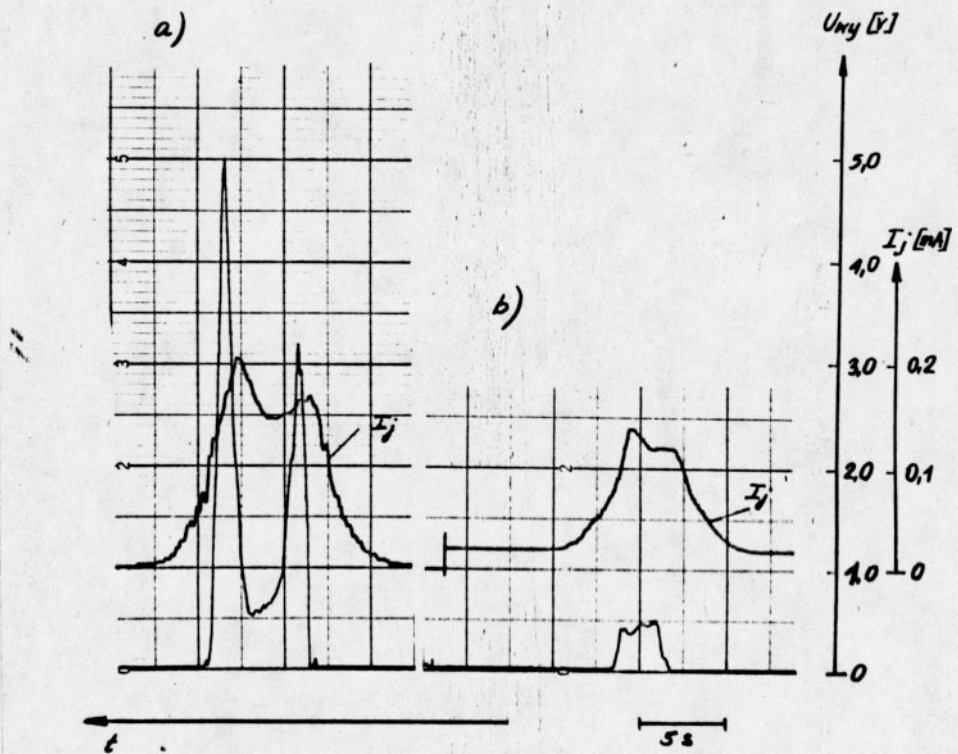
Rys. 26. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu elektronów szybkich w funkcji czasu. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $I = 60$ mA, $V_g = 0$, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{30}$ A/sek, stal 1H18N9T o grubości 25 mm.



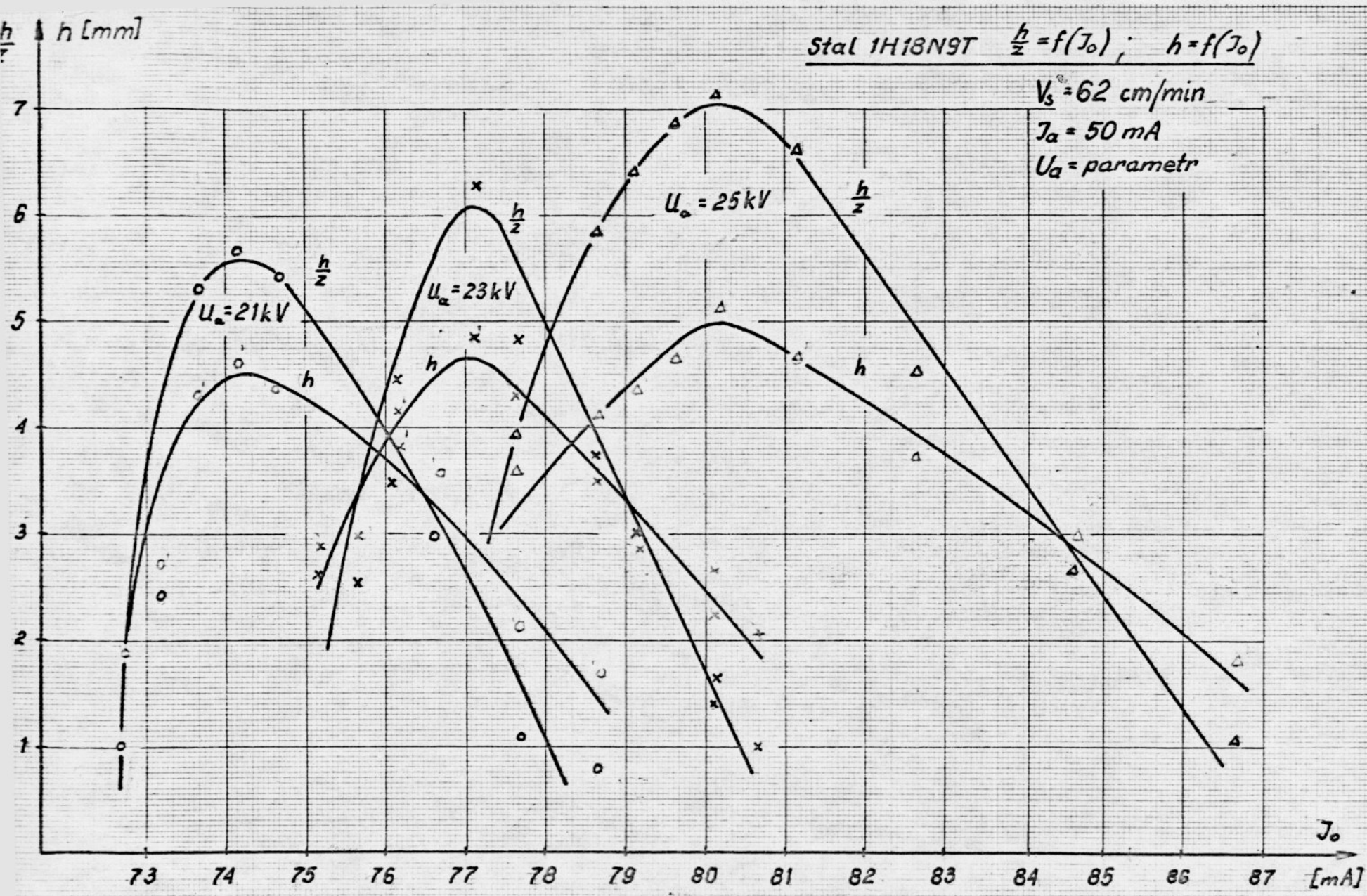
Rys. 27. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu elektronów szybkich w funkcji czasu. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $I = 10$ mA, $V_H = 0$, $\frac{dI_0}{dt} = \frac{1}{30}$ A/sek, stal 1H18N9T o grubości 25 mm.



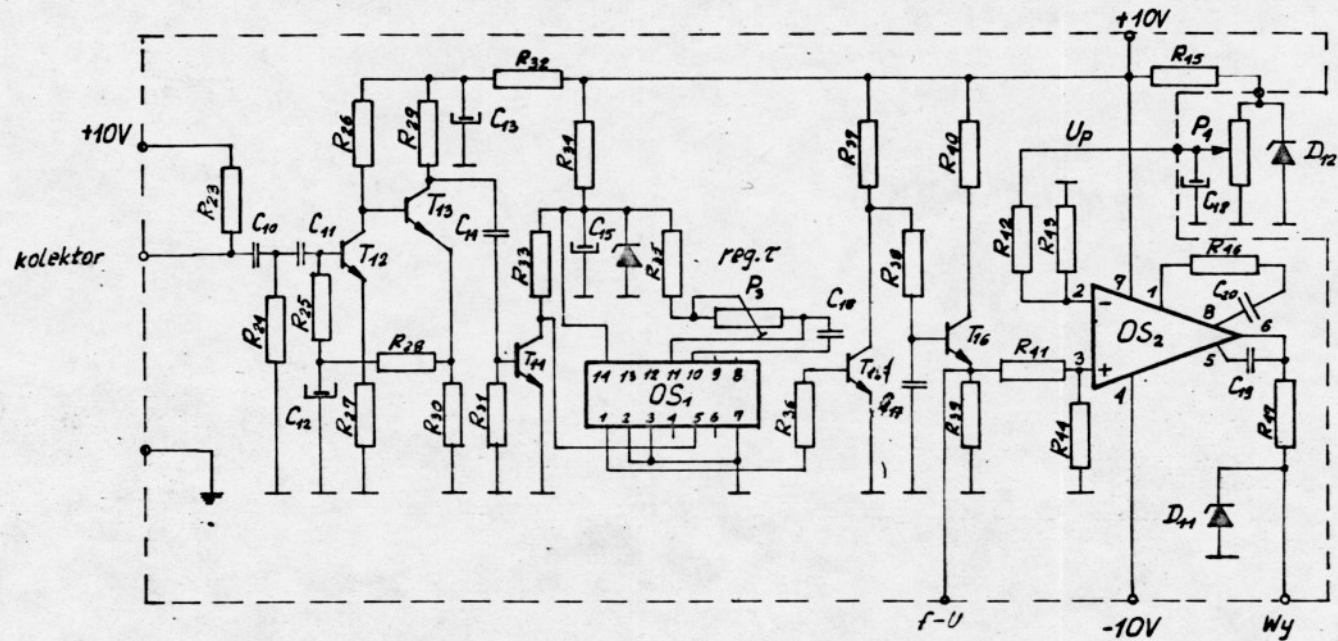
Rys. 28. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu jonów w funkcji czasu. Parametry spawania: $U = 25$ kV, $V_s = 0$, $\frac{dI}{dt} = \frac{1}{30}$ A/sok, stal 1H18N9T o grubości 25 mm, a/ $I = 60$ mA, b/ $I = 40$ mA.



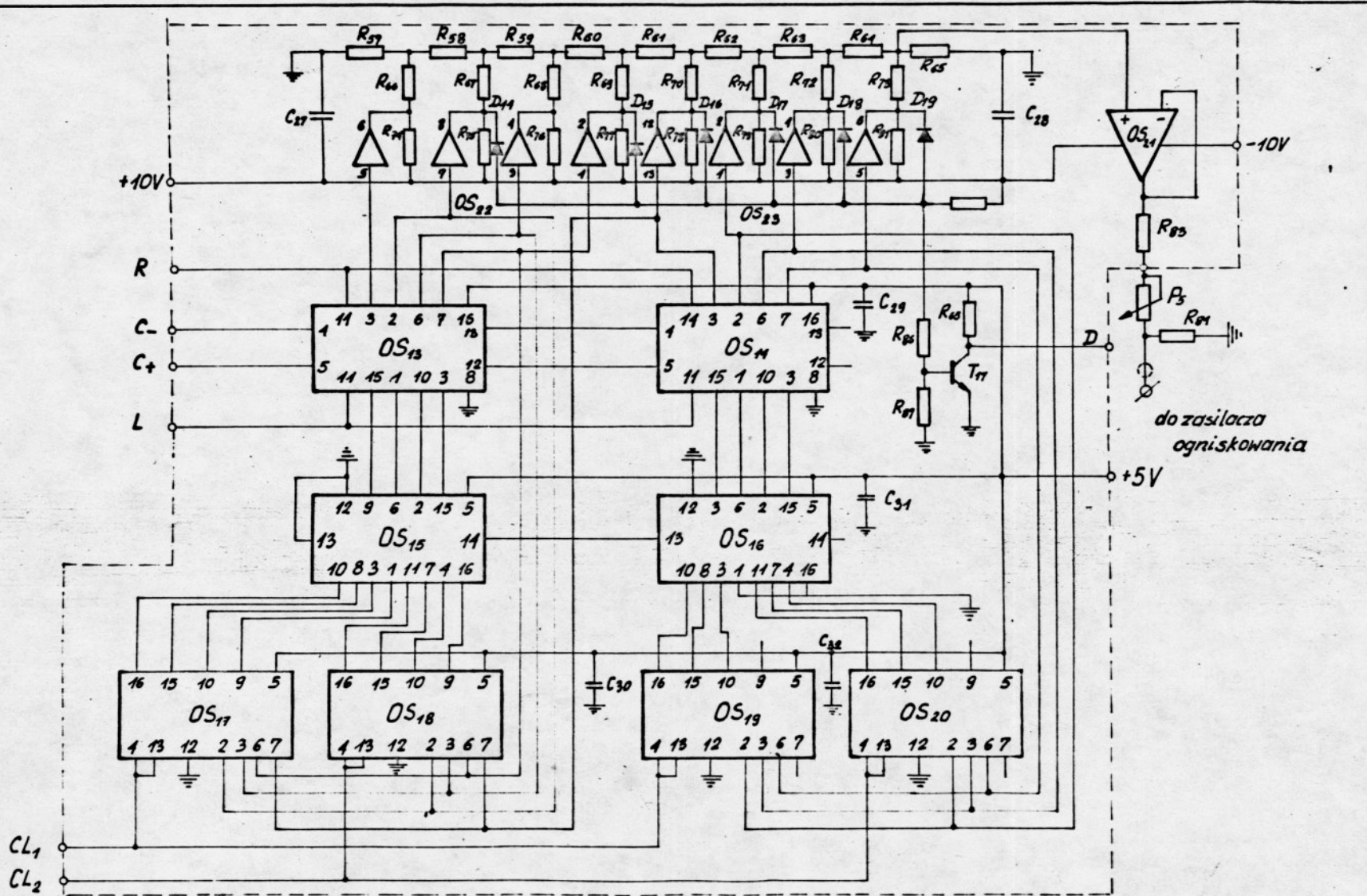
Rys. 29. Przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika f-U i prądu jonów w funkcji czasu. Parametry spawania: $U = 25 \text{ kV}$, $V_H = 0$, $\frac{dI}{dt} = \frac{1}{30} \text{ A/nsek}$, stal HILANOT o grubości 25 mm; a/ $I = 20 \text{ mA}$, b/ $I = 15 \text{ mA}$.



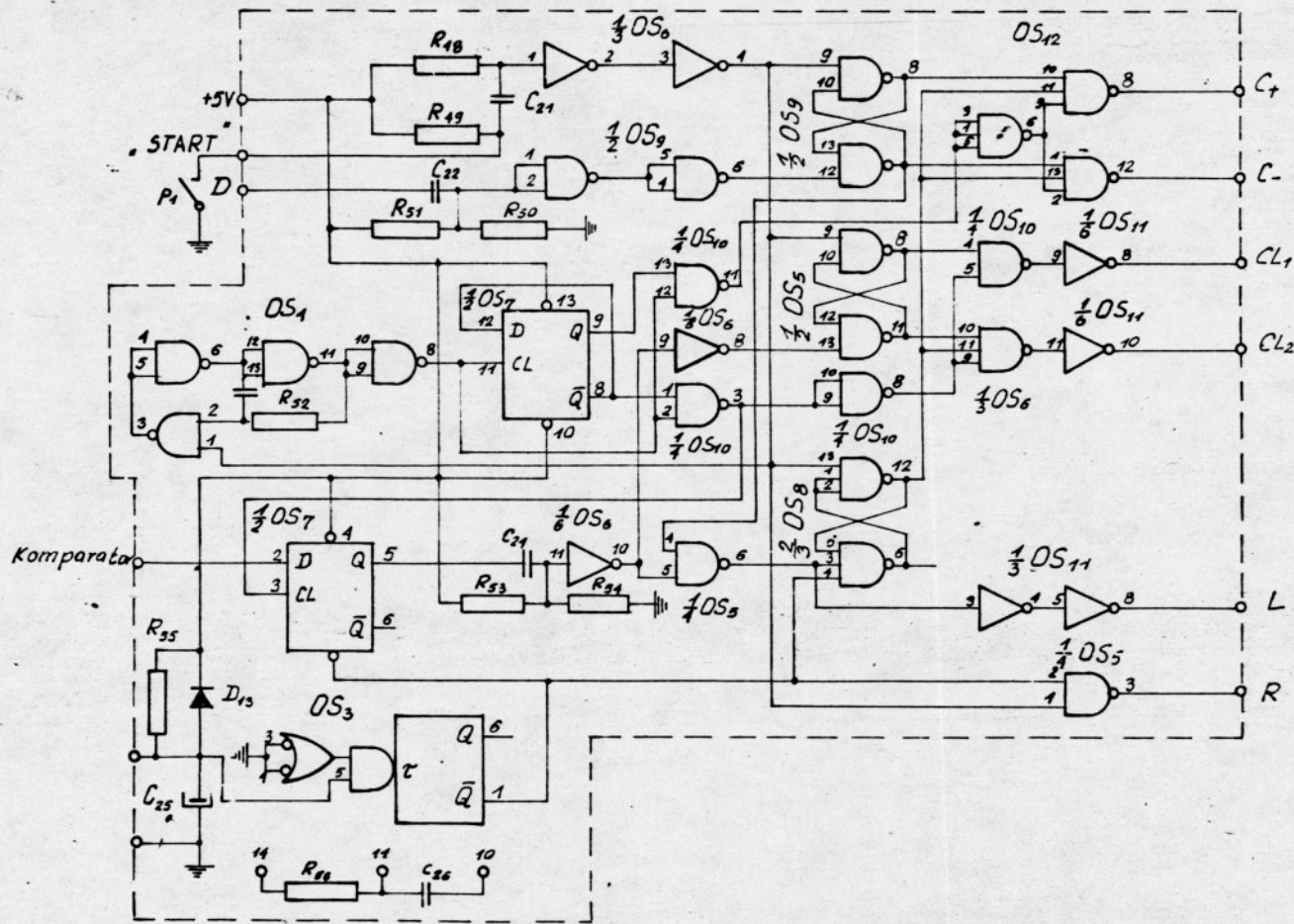
Rys. 30. Zależność głębokości przetopu i stosunku głębokości do szerokości przetopu od prądu soczewki ogniskującej.



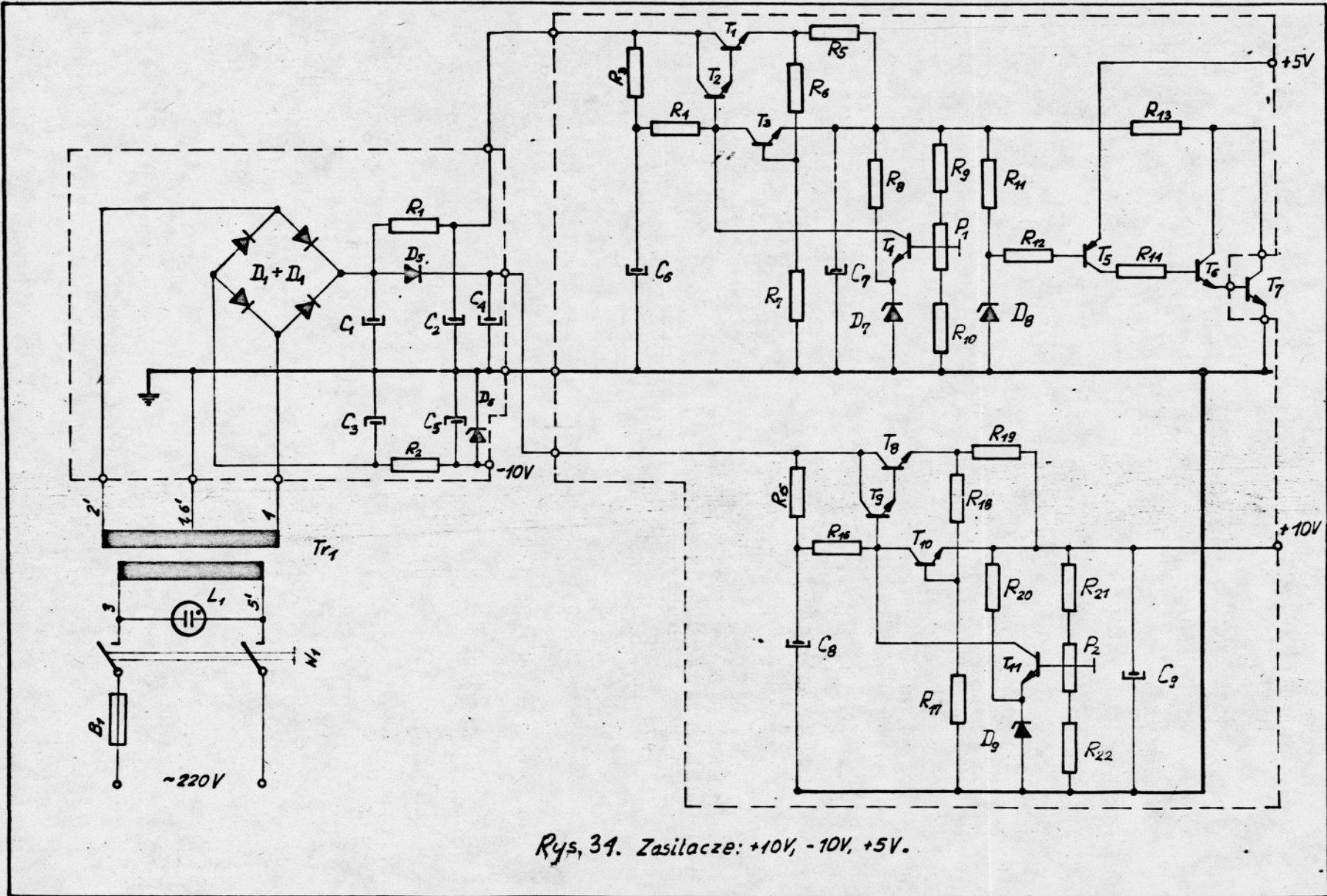
Rys. 31. Przetwornik f-U z komparatorem.



Rys.32. Licznik z pamięcią i sumatorem.



Rys. 33. Układ sterujący.



Rys. 34. Zasilacze: +10V, -10V, +5V.

Wykaz elementów

Diody półprzewodnikowe

$D_1 + D_5$	-	BYP 680 - 50R
D_6	-	BZP 611 - D10
D_7	-	BZP 611 - C3V3
D_8	-	BZP 611 - C5V6
D_9, D_{10}	-	BZP 611 - C5V1
D_{11}, D_{12}	-	BZP 611 - C4V7
$D_{13} \div D_{19}$	-	BAP 795

Tranzystory

T_1	-	2N3055
T_2	-	BC 211-16
T_3	-	BFP 519 VI
T_4	-	BC 107 C
T_5	-	BD 254 B
T_6	-	BD 255 B
T_7, T_8	-	2N 3055
T_9	-	BC 211-16
T_{10}	-	BFP 519 VI
T_{11}	-	BC 107 C
T_{12}, T_{13}	-	BC 107 B
$T_{14} \div T_{17}$	-	BFP 519 VI

Układy scalone

OS_1	-	UCY 74121
OS_2	-	MAA 502
OS_3	-	UCY 74121

OS ₄ , OS ₅	- UCY 7400
OS ₆	- UCY 7400
OS ₇	- UCY 7474
OS ₈ ÷OS ₁₀	- UCY 7400
OS ₁₁	- UCY 7404
OS ₁₂	- UCY 7410
OS ₁₃ , OS ₁₄	- SN 74193
OS ₁₅ , OS ₁₆	- UCY 7483
OS ₁₇ ÷OS ₂₀	- UCY 7475
OS ₂₁	- ML 741 CP
OS ₂₂ , OS ₂₃	- UCY 7404

Oporniki

R ₁ -drutowy	- 2Ω - 10 W
R ₂	- MLT - 220Ω - 1W
R ₃	- MLT - 5,1kΩ - 0,5W
R ₄	- MLT - 5,1kΩ - 0,5W
R ₅	- drutowy - 1,5Ω - 5W
R ₆	- MLT - 2kΩ - 0,5W
R ₇	- MLT - 10kΩ - 0,5W
R ₈	- MLT - 330Ω - 0,5W
R ₉	- MLT - 100Ω - 0,5W
R ₁₀	- MLT - 1,0kΩ - 0,5W
R ₁₁	- MLT - 220Ω - 0,5 W
R ₁₂	- MLT - 22Ω - 0,5W
R ₁₃ -drutowy	- 0,2Ω - 5W
R ₁₄ -RMB	- 10Ω - 0,5W

- R₁₅, R₁₆ - MLT - 5,1kΩ - 0,5W
- R₁₇ - MLT - 2kΩ - 0,5W
- R₁₈ - MLT - 10kΩ - 0,5W
- R₁₉ - drutowy - 1,5Ω - 5W
- R₂₀ - MLT - 510Ω - 0,5W
- R₂₁ - MLT - 620Ω - 0,5W
- R₂₂ - MLT - 1kΩ - 0,5W
- R₂₃ - MLT - 150Ω - 2W
- R₂₄ - MLT - 2kΩ - 0,5W
- R₂₅ - MLT - 100kΩ - 0,25W
- R₂₆ - MLT - 47kΩ - 0,25W
- R₂₇ - MLT - 750Ω - 0,5W
- R₂₈ - MLT - 100kΩ - 0,25W
- R₂₉ - MLT - 4,7kΩ - 0,5W
- R₃₀ - MLT - 750Ω - 0,5W
- R₃₁ - MLT - 30kΩ - 0,5W
- R₃₂ - MLT - 510kΩ - 0,5W
- R₃₃ - MLT - 1,2kΩ - 0,5W
- R₃₄ - MLT - 120Ω - 1W
- R₃₅ - MLT - 1,2kΩ - 0,5W
- R₃₆ - MLT - 1,0kΩ - 0,5W
- R₃₇ - MLT - 1,2kΩ - 0,5W
- R₃₈ - MLT - 27kΩ - 0,5W
- R₃₉ - MLT - 6,8kΩ - 0,5W
- R₄₀ - MLT - 220Ω - 0,5W
- R₄₁, R₄₂ - MLT - 47kΩ - 0,25W
- R₄₃, R₄₄ - MLT - 20kΩ - 0,25W
- R₄₅ - MLT - 220Ω - 1W

- R₄₆ - MLT - 20kΩ - 0,5W
- R₄₇ - MLT - 1,0kΩ - 0,5W
- R₄₈ - MLT - 100Ω - 0,5W
- R₄₉ - MLT - 2,2MΩ - 0,25W
- R₅₀, R₅₁ - MLT - 5,1kΩ - 0,5W
- R₅₂ - MLT - 1,5kΩ - 0,5W
- R₅₃, R₅₄ - MLT - 5,1kΩ - 0,5W
- R₅₅ - MLT - 1,5kΩ - 0,5W
- R₅₆ - MLT - 4,5kΩ - 0,5W
- R₅₇ - RGM - 20kΩ - 0,25W - 0,1%
- R₅₈-R₆₄ - RGM - 10kΩ - 0,25W - 0,1%
- R₆₅÷R₇₃ - RGM - 20kΩ - 0,25W - 0,1%
- R₇₄÷R₈₁ - RGM - 500Ω - 0,5W - 1%
- R₈₂ - MLT - 20kΩ - 0,5W
- R₈₃ - MLT - 470Ω - 0,5W
- R₈₄ - MLT - 120Ω - 0,5W
- R₈₅ - MLT - 1,0kΩ - 0,5W
- R₈₆ - MLT - 20kΩ - 0,5W
- R₈₇ - MLT - 39kΩ - 0,5W

Potencjometry

- P₁ - TVP - 117 - 500Ω - 0,1W - liniowy
- P₂ - TVP - 117 - 250Ω - 0,1W - liniowy
- P₃ - TVP - 117 - 25kΩ - 0,1W - liniowy
- P₄ - PA 26 - 1kΩ - 0,25W - liniowy
- P₅ - DM 102 - 10kΩ - 1W - liniowy

Kondensatory

- C₁, C₂, C₃ - KED - 1000 μ F/25V
- C₄ - KED - 100 μ F/63V
- C₅ - KED - 1000 μ F/25V
- C₆ - elektrolityczny typu II - 02E - 100 μ F/25V
- C₇ - elektrolityczny - 02E - 470 μ F/25V
- C₈ - elektrolityczny - 02E - 100 μ F/25V
- C₉ - elektrolityczny - 02E - 470 μ F/25V
- C₁₀, C₁₁ - MKSE-011 - 33nF/250V
- C₁₂ - elektrolityczny - 02E - 10 μ F/25V
- C₁₃ - elektrolityczny - 02E - 470 μ F/25V
- C₁₄ - MKSE-012 - 3,3 μ F/100V
- C₁₅ - elektrolityczny - 02E - 10 μ F/25V
- C₁₆ - MKSE-011 - 10 nF/160V
- C₁₇ - MKSE-012 - 3,3 μ F/100V
- C₁₈ - elektrolityczny - 02E - 10 μ F/25V
- C₁₉ - KSF-020 - 220pF/63V
- C₂₀ - KSF-020 - 2200pF/63V
- C₂₁ - MKSE-011 - 10 nF/160V
- C₂₂ - KSF-020 - 200pF/63V
- C₂₃ - MKSE-011 - 0,68 μ F/160V
- C₂₄ - KSF-020 - 200 pF/63V
- C₂₅ - elektrolityczny KED - 100 μ F/25V
- C₂₆ - MKSE-011 - 47 nF/160V
- C₂₇ - KFPm - 0,1 μ F/63V
- C₂₈ - KFPm - 0,1 μ F/63V

$C_{31}-C_{32}$ - KFPm - 47nF/63V

Tr_1 - Transformator TS 40/44/676

B_1 - bezpiecznik topikowy 0,5 A/250V

Uzupełnienie

Rozważania przedstawione w rozdziale 1.1 niniejszej pracy nie wyjaśniają całkowicie pewnych prawidłowości występujących na zmierzonych rozkładach widmowych składowej zmiennej prądu cząstek emitowanych przez spawane detale w warunkach optymalnego zogniskowania wiązki elektronów.

W rozważaniach tych przyjęto daleko idące założenia upraszczające i pominięto fizyczny mechanizm wytwarzania głębokiego przetopu przez wiązkę elektronów o dużej gęstości mocy.

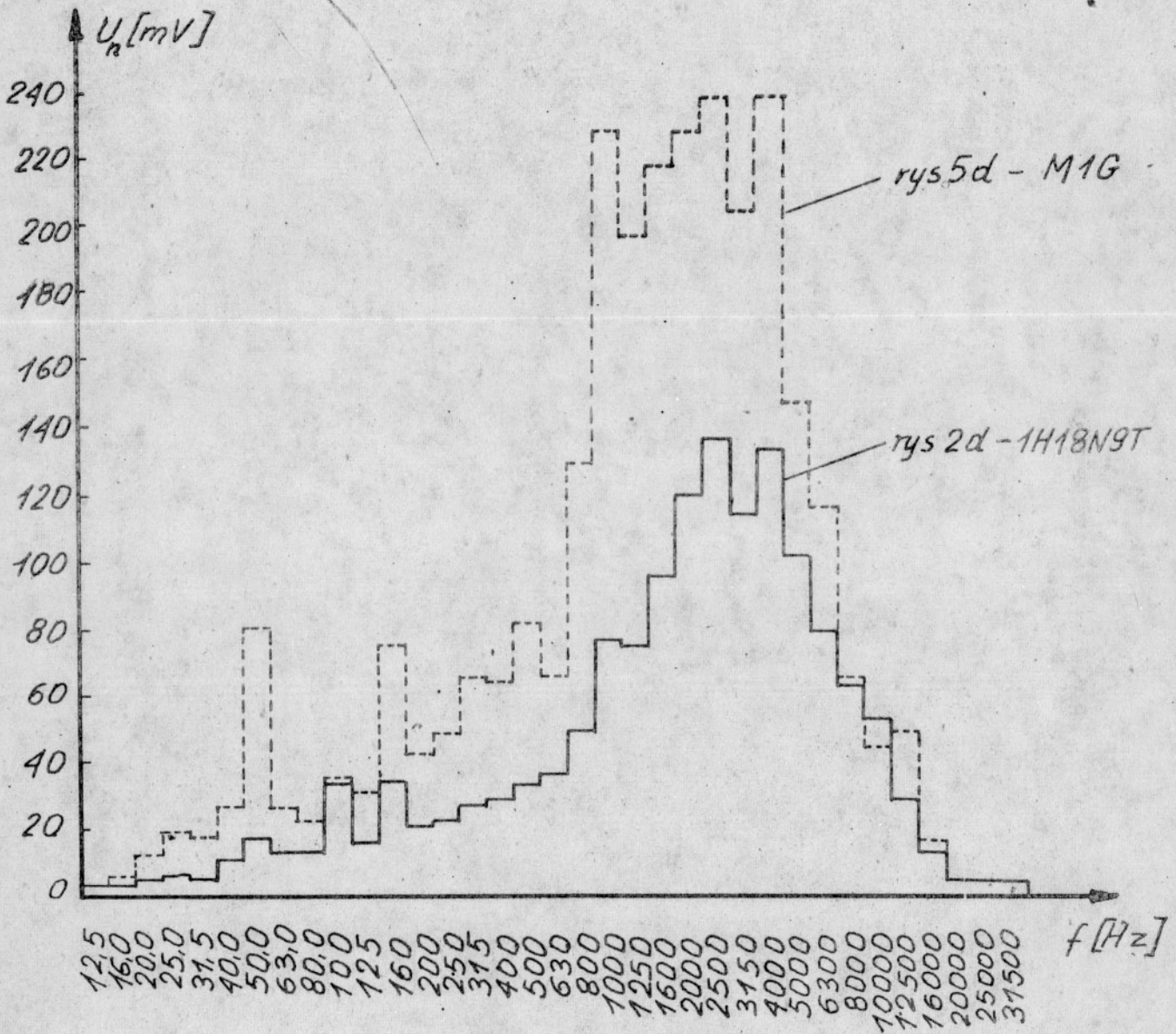
Rozkłady widmowe przedstawione w dodatku na rys. 2d, 5d, 8d prócz lokalnych maksimów odpowiadających występującym częstotliwościom zakłócającym /50Hz i jej harmoniczne oraz 1 kHz i jej harmoniczne/ posiadają wyraźne maksimum leżące w zakresie częstotliwości 500 * 5000 Hz. Efekt ten jest wyraźnie widoczny na zamieszczonych niżej rysunkach, na których wartości bezwzględne napięcia, występującego na wejściu wzmacniacza pomiarowego /rys. 4a/ podano w mV, a nie jak uprzednio w decybelach. Wartości te otrzymano z prostego przeliczenia stosując wzór:

$$U_n = U_0 \cdot 10^{\frac{l_n}{20}}$$

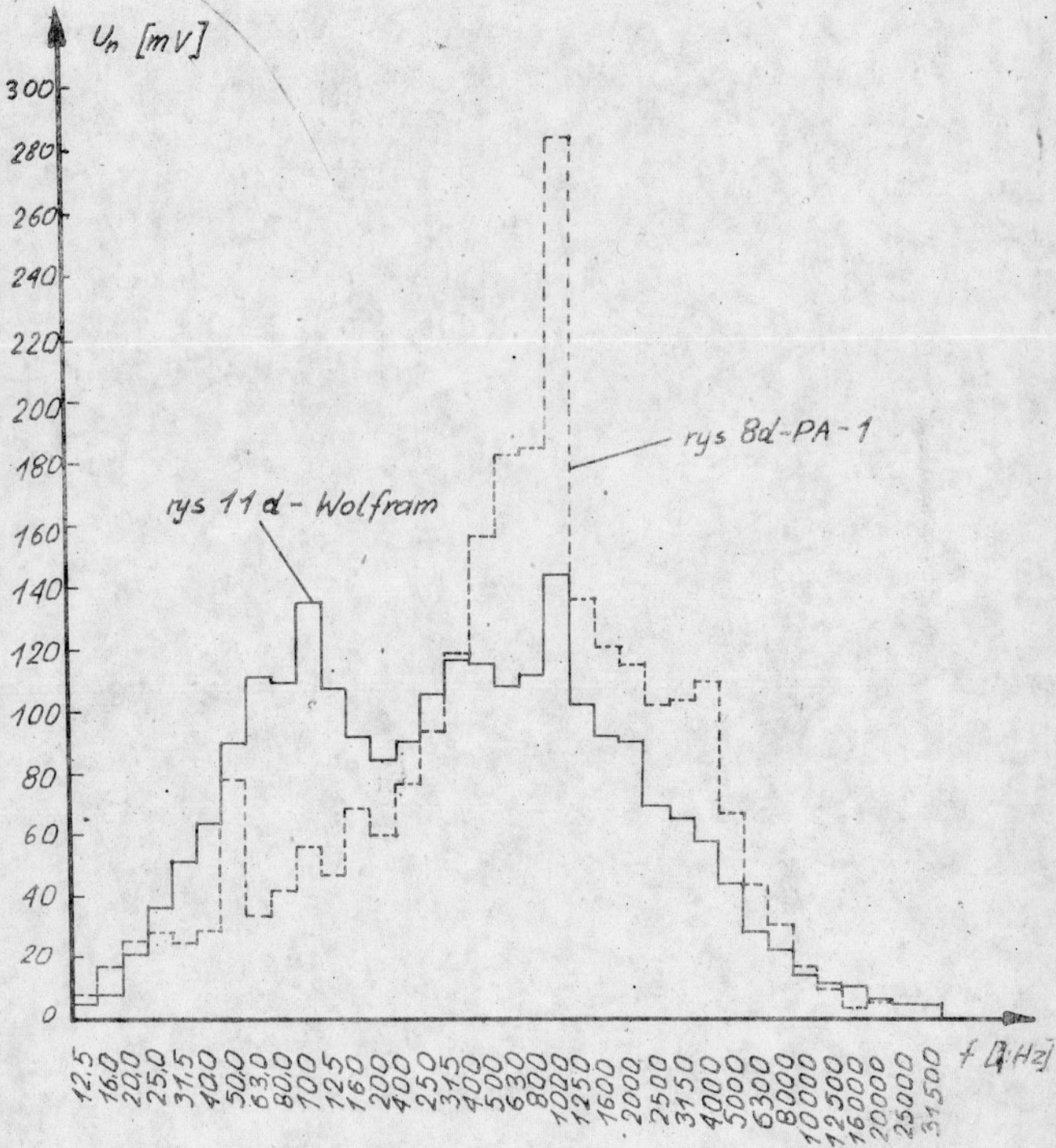
gdzie: U_0 - poziom napięcia odniesienia który wynosił $10^{-5}V$

l_n - poziom napięcia wyrażony w skali decybelowej

Podstawową pracą tłumaczącą mechanizm wytwarzania głębokiego przetopu jest praca Schwartza [38]. Zaproponowany przez niego mechanizm nie został do dziś zakwestionowany, a inne hipotezy wysuwane przez różnych autorów są tylko modyfikacjami jego teorii.



Rys. 35. Rozkłady widmowe składowej zmiennej prądu kolektora elektronów podczas spawania stali 1H18N9T i miedzi M1-G przy optymalnym prądzie soczewki ogniskującej.



Rys. 36. Rozkłady widmowe składowej zmiennej prądu kolektora elektronów podczas spawania stopu aluminium PA-1 i wolframu przy optymalnym prądzie soczewki ogniskującej.

Zakłada się, że wiązka elektronów wytwarza w metalu spawanym pewien rodzaj kanału wypełnionego plazmą i dzięki temu może przekazywać energię kinetyczną głęboko pod powierzchnię metalu.

Fakt istnienia kanału został potwierdzony doświadczalnie [2, 21, 24, 40].

Zgodnie z mechanizmem zaproponowanym przez Schwartza, wiązka elektronów padając na materiał wnika na głębokość od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów /zależnie od rodzaju materiału i napięcia przyspieszającego/. Jeżeli koncentracja energii cieplnej wytwarzanej na drodze wnikania wiązki w materiał jest duża to materiał ulega w obszarze działania wiązki nie tylko stopnieniu lecz przechodzi również częściowo w fazę gazową. Z chwilą gdy ciśnienie wytworzonej pary przekroczy wartość ciśnienia wynikającą z napięcia powierzchniowego stopionego metalu, następuje rozerwanie cienkiej warstwy zamykającej obszar oddziaływania i intensywna erupcja pary wraz ze stopionym metalem. Tym samym zostaje otwarta droga do dalszej penetracji w głąb materiału.

Kanał powstaje więc nie przez zwykłe odparowanie stopionego metalu lecz przez okresowe "mikroeksplozje".

W pracach Zujewa, Rykalina Uglowa ocenia się czas gromadzenia energii niezbędnej do mikroeksplozji* oraz czas ekranowania** wiązki produktami mikroeksplozji.

Czas oddziaływania wiązki można przedstawić jako sumę czasu tworzenia kanału t_1 , a więc czasu w którym zachodzi wzrost głębokości przetopu i czasu ekranowania t_2 , podczas którego wiązka jest rozpraszana przez produkty mikroeksplozji.

$$t = t_1 + t_2, \quad \text{przy czym } t_2 = (0,9 + 0,95) t$$

Średni czas przypadający na jeden "mikrowybuch":

$$\tau_{\text{śr}} = \frac{t_1 + t_2}{n} = \tau_1 + \tau_2$$

gdzie: n - średnia liczba "mikrowybuchów" na drodze wiązki

$$\tau_2 = (0,9 + 0,95) \tau_{\text{śr}} \quad * * - \text{średni czas ekranowania}$$

τ_1 - średni czas gromadzenia energii niezbędnej do mikroeksplozji

Średnia częstotliwość mikroeksplozji wyniesie więc:

$$f_{\text{śr}} = \frac{1}{\tau_{\text{śr}}} = \frac{0,05 + 0,1}{\tau_1}$$

Ponieważ dla stali nierdzewnej czas gromadzenia energii niezbędnej do wybuchowego wrzenia materiału τ_1 jest rzędu 100 μ sek przy napięciu 30 kV i gęstości mocy wiązki równej $8,7 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ otrzymamy więc

$$f_{\text{śr}} = (0,5 + 1) \text{ kHz}$$

Wynik powyższy daje zgodność co do zakresu częstotliwości w którym obserwuje się charakterystyczne maksimum sygnału na rozkładach widmowych.

Ponieważ czas gromadzenia energii niezbędnej do mikroeksplozji maleje ze wzrostem objętościowej gęstości mocy, a głęboki

i wąski kanał jest tworem niestabilnym [1,2,21,41], zatem erupcje z dna kanału będą zachodzić z mniejszą częstotliwością, niż ze strefy przypowierzchniowej z uwagi na rozpraszanie wiązki elektronów w kanale. Czas przypadający na jeden mikrowybuch należy ponadto traktować jako wielkość statystycznie średnią i stąd też nie obserwuje się na zmierzonych rozkładach jednej, stałej częstotliwości, lecz pewne "wyróżnione" pasmo częstotliwości, związane z mechanizmem oddziaływania wiązki elektronów o dużej gęstości mocy ze spawanym materiałem.

Nieco odmienny przebieg rozkładu widmowego składowej zmiennej prądu cząstek emitowanych z wolframu można wytłumaczyć brakiem zjawiska wytwarzania głębokiego przetopu jako, że gęstość mocy wiązki w spawarce WS-2/30 jest niewystarczająca do głębokiego spawania materiałów trudno topliwych takich jak wolfram czy też molibden.

W pracy [36] badano prąd płynący przez spawany detal. Stwierdzono tam, że podczas spawania materiałów na urządzeniu wysokiego napięciowym występują oscylacje tego prądu z częstotliwością (10 ± 25) kHz. W pracy tej zjawisko oscylacji tłumaczy się również formowaniem kanału przez powtarzające się mikroeksplozje z dna kanału. Należy zwrócić uwagę, że gęstości mocy w spawarkach wysokonapięciowych są dużo większe niż w spawarkach niskonapięciowych, zatem czas gromadzenia energii niezbędnej do spowodowania mikroeksplozji τ_1 i czas ekranowania τ_2 są krótsze, stąd zakres częstotliwości obserwowanych oscylacji w pracy [36] był wyższy.

Reasumując można stwierdzić, że wzrost sygnału w pewnym "wyróżnionym" paśmie częstotliwości na rozkładach widmowych pokazanych w dodatku na rysunkach 2d, 5d, 8d, spowodowany jest mechanizmem oddziaływania wiązki elektronów o dużej gęstości mocy z materiałem spawanym.

* Zujew I.W., Rykalin N.N., Ugłow A.A., Ocena krytycznej udzielnej mocy elektronolucowej swarki metali s kinżalnym propławlenijem, Fizika i Chimija Obrabotki Matieriałow, Nr 3, 1970

* * Zujew I.W., Rykalin N.N., Ugłow A.A., Ocena głubiny propławlenija pri elektronolucowej swarkio, Fizika i Chimija Obrabotki Matieriałow, Nr 1, 1972

203

Lista odbiorców

1. Archiwum ITE PWr - 1 egz.

2. Biblioteka - 1 egz.

3. Autor - 2 egz.

Razem: 4 egz.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	* N *	N N S T T A N								1 6 0 8	
	Rozpocz. pr.	Zakończ. pr.	Opubl. pr.		Instytut	Nr tematu.					
	1 6 9 / 7 6	0 5 7 5	0 4 7 9		I 2 5	1 2 3 1 1 ▽ ▽ 0 1					
	Nr zlecenia.		Nr archiwalny								
	1 6 8 / 7 6		I 2 5 / P - 0 1 3 / 7 9 *								
	Symbol UKD.		spawanie elektronowe					79; Inst. Technol. Elektron. PWr			
	621.791.72							MNSzWiT			
								pol.			
<p>Opis bibliograficzny.</p> <p>Kirczuk Czesław</p> <p>Metoda kontroli ogniskowania wiązki elektronowej w procesie spawania elektronowiazkowego.</p> <p>Raporty Inst. Technol. Elektron. PWr 1979 Ser. PRE nr 13</p> <p>126 s., 24 rys., 3 tabl., 41 wyk., 19 fot., bibliogr. 44 poz., /maszyn. powiel./</p> <p>Rozprawa doktorska</p> <p>Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Elektronowej, Wroclaw</p> <p>Promotor: doc. dr inż. Andrzej Hałas</p> <p>Zlec. Inst. Podst. Probl. Techn. Warszawa z dnia 15.05.1976 r.</p>											
Charakter pracy:		stosowany		Rozpowszechnienie: -							
Materiały odpłatne:		A									



L/1

Analiza dokumentacyjna

<D> Stwierdzono, że w czasie spawania wiązką elektronów występują fluktuacje prądu cząstek emitowanych przez spawane detale. Wielkość tych fluktuacji jest tego samego rzędu co składowe stałe poszczególnych prądów. Charakter fluktuacji jak i ich wielkość zależą od warunków ogniskowania wiązki elektronów i występują z chwilą nadtopienia spawanych detali. W pracy przedstawiono metodę kontroli ogniskowania i układ wykorzystujący tę metodę do automatycznego ogniskowania w spawarkach elektronowiazkowych.

Imię i Nazwisko autora analizy

Czesław Kirczuk

Słowa kluczowe

<S> spawanie wiązką elektronów, ogniskowanie wiązki elektronów, sterowanie wiązką elektronów

**0480*00*

<A _____ *B _____ *C _____ *D _____

*E _____ *F _____ *G _____ *H _____ ←

Tylko PRL	CINTE	APW	Podpis red.	Podpis asyst. d/s badań	Potwierdzenie przyjęcia poprawki	Potwierdzenie przyjęcia karty w Oddziale Dokumentacji
NIE	TAK	NIE				
Wpisać TAK lub NIE						