

INSTITUT DE PHYSIQUE DES HAUTES ENERGIES  
SERPUKHOV, 1968

CERN LIBRARIES, GENEVA

IFVE  
SKU 68-48K



CM-P00100564

SYSTEME D'INJECTION DES PARTICULES  
DU SYNCHROTRON A PROTONS DE 70 GEV DE L'IFVE

par

S.N. Bojko, V.I. Zajtsev, E.A. Mayae,  
I.M. Rojfe, B.A. Stekol'nikov  
Serpukhov, 1968

Traduit au CERN par A. Golovanoff  
(Original : russe)

(CERN Trans. 69-6)

Genève  
Février 1969

## INTRODUCTION

Dans les synchrotrons à protons à focalisation forte on effectue l'injection des particules soit en un seul tour, soit en un petit nombre de tours. Cela s'explique parce que, du fait des faibles dimensions transversales de la chambre à vide, l'acceptance de l'accélérateur est, au mieux, fort peu supérieure à l'émittance du faisceau de l'injecteur.

Dans l'injection à un tour, le faisceau est injecté au moment voulu au centre de la chambre à vide sur une orbite d'équilibre à l'aide des dispositifs de déflexion magnétiques ou électriques. Une fois que les particules ont accompli le premier tour, les dispositifs de déflexion que traverse l'orbite d'équilibre doivent être arrêtés, afin de ne plus perturber le mouvement des particules. De plus, pour que le coefficient de capture soit suffisamment élevé, le temps de déclenchement de ces dispositifs doit être sensiblement inférieur à la durée de révolution.

L'injection en plusieurs tours dans les accélérateurs à focalisation forte ne peut être accomplie simplement en injectant des particules dans la chambre pendant plusieurs tours. Par suite du faible déplacement par tour de l'orbite (valeur peu élevée du coefficient d'élargissement de l'orbite  $\alpha = \frac{dr}{dt} \cdot \frac{p}{r}$ ), les particules se perdraient sur le dispositif d'injection. Dans ce cas, on produit une déformation locale non stationnaire de l'orbite d'équilibre, à l'aide de dispositifs de déflexion disposés avant

et après le point d'injection du faisceau. L'intensité de la perturbation varie dans le temps de façon à ce que l'orbite traverse le dispositif d'injection au début de l'injection et qu'elle coïncide avec l'orbite centrale à la fin de l'injection.

Les considérations relatives à l'organisation du système d'injection du synchrotron à protons de 70 GeV ont été examinées dans le travail de D.G. Koshkarov <sup>/1/</sup> dans le cadre de la variante préliminaire du projet d'accélérateur d'une énergie de 50 GeV <sup>/2/</sup>. Depuis, le projet ayant été considérablement modifié, il a paru utile de produire certaines données calculées relatives à la variante définitive du système d'injection.

La figure 1 représente le schéma de distribution des équipements d'injection du faisceau. L'injection du faisceau sur l'orbite d'équilibre se fait à l'aide de dispositifs électrostatiques de type condensateur. L'injection des particules à l'intérieur de la chambre à vide du synchrotron est assurée à l'aide du champ électrique constant du condensateur  $E_1$  (voir figure 1), placé dans la section droite à l'extérieur de l'ouverture active de la chambre à vide. La déformation de l'orbite du faisceau est corrigée au moyen des champs électriques des condensateurs pulsés  $E_2$  et  $E_3$ , disposés respectivement entre les unités 7-8 et 9-10 et contenant l'orbite du faisceau. Les condensateurs  $E_4$  et  $E_5$  sont destinés à réaliser, en conjonction avec  $E_2$  et  $E_3$ , l'injection "multitours".

\*

\* \*

1. Calcul des paramètres de l'injection en un tour

Dans le choix des paramètres de l'injection, il convient de prendre pour point de départ la condition de l'introduction dans la chambre d'un nombre maximal de particules. A cet effet, le faisceau doit passer le plus possible au centre entre les plateaux de  $E_1$  et l'amplitude de ses oscillations dans la chambre de l'accélérateur (avant de sortir de  $E_3$ ) ne doit pas dépasser les dimensions de l'ouverture active du champ magnétique. De plus, il faut respecter la condition évidente selon laquelle la tension sur les plateaux ne peut dépasser la limite technique du système d'alimentation. En outre, il est souhaitable que les orbites des particules à impulsions différentes se séparent.

On peut montrer que la coordonnée transversale et l'angle d'une particule chargée, se déplaçant entre les plateaux d'un condensateur plan, sont de la forme :

$$\begin{aligned} r &= \frac{eUl^2}{2\beta^2 c^2 \gamma m_0 d} + r'_{en} l + r_{en} \\ r' &= \frac{eUl}{\beta^2 c^2 \gamma m_0 d} + r'_{en} \end{aligned} \quad (1)$$

où  $e$  - charge de la particule,  $\beta c$  - sa vitesse longitudinale,  $m_0$  - masse au repos,  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ,  $d$  - résistance entre les plateaux,  $l$  - distance de l'entrée des plateaux,  $U$  - tension sur les plateaux,  $r_{en}$  et  $r'_{en}$  - coordonnées et angle d'incidence des particules dans les plateaux.

Dans notre cas,  $l_{E_1} = 3$  m,  $l_{E_2 + E_5} = 1,25$  m,  $d_{E_1} = 0,05$  m,  $d_{E_1 + E_5} = 0,175$  m, et nous aurons pour des protons d'une énergie de 100 MeV une variation de la coordonnée de l'angle à la sortie, sous l'action du champ des plateaux :

$$\begin{aligned} \Delta r_{E_1} &= 4,71 \cdot 10^{-7} U_{E_1}; & \Delta r_{E_2 + E_5} &= 2,34 \cdot 10^{-8} U_{E_2 + E_5} \\ \Delta r'_{E_1} &= 3,14 \cdot 10^{-7} U_{E_1}; & \Delta r'_{E_2 + E_5} &= 3,74 \cdot 10^{-8} U_{E_2 + E_5} \end{aligned}$$

où  $\Delta r_E$  sont exprimés en mètres,  $\Delta r'_E$  - en radians, et  $U_E$  - en volts. Le calcul de la trajectoire d'injection est donné dans l'annexe 1. La figure 2 (droite, a et b) donne les valeurs, tirées de (4) des tensions sur les plateaux  $E_2$ ,  $E_3$ , assurant la mise en orbite d'équilibre du faisceau, en fonction de l'angle de sortie des particules des plateaux  $E_1$ . Il est clair que l'on peut installer le faisceau sur l'orbite d'équilibre à l'aide d'une seule paire de plateaux pulsés. Alors,  $U_{E_2} = 115$  KV et  $r'_{E_1 \text{ sor}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  rad. Il est clair que dans ce cas nous avons des conditions de zéro à la sortie de  $E_2$ , c'est-à-dire  $r_{E_2 \text{ sor}} = 0$ ,  $r'_{E_2 \text{ sor}} = 0$ . Dans chaque cas, il est nécessaire que la valeur du plus grand écart de la trajectoire d'orbite d'équilibre ne sorte pas de la zone active du champ magnétique. Cela peut se produire le plus probablement dans la première unité focalisant radialement, qui suit les plateaux  $E_1$  (unité 6), puisque la position calculée du point de sortie du faisceau  $E_1$  (milieu de l'intervalle entre les plateaux) est distante de l'orbite d'équilibre de 10 cm, tandis que la zone de champ magnétique à forte non-linéarité commence à 12,5 cm. Les valeurs de la

déviations maximales de la trajectoire d'injection en fonction de l'angle de sortie des plateaux  $E_1$  sont données par la courbe de la figure 2. Il convient de remarquer que la paroi externe de la chambre à vide dans cette unité est distante de 14 cm de l'orbite d'équilibre. Les courbes d et e (Fig. 2) indiquent les valeurs de l'angle d'entrée de la particule centrale du faisceau et les tensions appliquées au condensateur statiques  $E_1$ , qui assure l'angle de sortie du condensateur nécessaire pour la mise en orbite d'équilibre pour  $r_{E_1 \text{ en}} = 12,8 \cdot 10^{-2}$  m et  $r_{E_2 \text{ sor}} = 10 \cdot 10^{-2}$  m.

La trajectoire d'injection du faisceau dans la chambre, dans le cas où les plateaux  $E_3$  sont déconnectés, est représentée sur la figure 3. Sur la base de ces données, on a choisi lors du lancement de l'accélérateur la variante d'injection à un tour, avec utilisation d'une seule paire de plateaux pulsés. Dans ce cas, la déviation de la trajectoire d'injection par rapport à l'orbite d'équilibre est voisine de la valeur minimale et, comme une seule unité d'alimentation de plateaux pulsés travaille, les influences des instabilités des sources d'alimentation diminuent et la fiabilité du système dans son ensemble augmente. Ce dernier élément a joué un rôle important au cours de la période de mise en marche de l'accélérateur et pendant les premiers temps de son fonctionnement.

## 2. Caractéristiques requises du système

Les paramètres du dispositif d'injection, déterminant la trajectoire du faisceau : tension sur les plateaux des condensateurs et position des condensateurs par rapport à l'orbite d'équilibre, peuvent être exprimés avec une précision finie. Les erreurs sur les grandeurs indiquées entraînent des déformations de l'orbite, qui occupent une partie de l'ouverture active de la chambre à vide de l'accélérateur. C'est pourquoi lors de l'installation et de l'ajustage de l'injection du faisceau, on respectait certaines tolérances suffisamment sévères pour ne pas introduire de déformations importantes de l'orbite. On a pris en considération les paramètres suivants :

- 1) le temps de descente de la tension des plateaux des condensateurs pulsés, puisque ce temps de descente fini entraîne un remplissage azimutal incomplet de l'anneau par les particules. Pour une durée de révolution des particules au moment de l'injection  $\tau_{\text{rev}} = 11,5 \mu\text{sec}$ , si l'on admet la perte d'un bunch sur 30, il faut avoir  $\tau_{\text{des}} < 0,4 \mu\text{sec}$ .
- 2) la tension résiduelle sur les inflecteurs pulsés après la chute de la tension qui déforme l'orbite. Dans le processus d'accélération, la tolérance pour la tension résiduelle devient moins sévère et, au bout d'un certain temps, la tension totale peut être admise sur les plateaux.

- 3) la stabilité des sources d'alimentation, compte tenu de la somme des drifts et des pulsations de tension à la sortie des sources d'alimentation.
- 4) la direction verticale des plateaux de condensateurs. Une disposition non verticale des plateaux provoque l'apparition d'une composante  $Z$  du champ électrique et donc une déflexion verticale non compensée du faisceau.

L'estimation de l'influence des facteurs indiqués est donnée dans l'annexe II. Dans l'hypothèse où l'influence des écarts des paramètres du système d'injection de leur valeur nominale ne doit pas introduire de déformations d'orbite supérieures à  $\pm 1$  mm, les exigences suivantes sont posées aux paramètres du système :

- 1) stabilité des sources d'alimentation des condensateurs, compte tenu de la pulsation  $\frac{\Delta U_{E_1}}{U_{E_1}} \cong 10^{-3}$ ;  $\frac{\Delta U_{E_2 \div E_5}}{U_{E_2 \div E_5}} \cong 3 \cdot 10^{-3}$ .
- 2) précision de la position verticale des condensateurs  $\Delta \theta_{E_1} \cong \pm 10^{-3}$  rad;  $\Delta \theta_{E_2 \div E_5} \cong \pm 4 \cdot 10^{-3}$  rad.
- 3) tension résiduelle sur les plateaux pulsés après descente  $\Delta U_{E_2 \div E_5} = \pm 190$  V.

La relation entre la tension résiduelle admissible en fonction du

temps est donnée par la formule (10). Après  $t = 1,6$  sec,  
 $\Delta U_{E_2 \div E_5} = \pm 60$  kV et les condensateurs peuvent recevoir la tension maximale des alimentations, sans provoquer de déviation du faisceau de l'orbite d'équilibre. Les tolérances pour la position verticale des plateaux ont été respectées lors de l'installation des condensateurs. Les tolérances sur le temps de descente de la tension, la stabilité des sources d'alimentation et la tension résiduelle étaient contrôlées dans le processus d'ajustement de l'appareillage.

### 3. Description des systèmes d'injection du faisceau

#### 1) Condensateur statique

Le condensateur statique  $E_1$  est destiné à modifier les conditions initiales d'injection, de telle sorte que :

- i) la trajectoire du faisceau ne sorte pas des limites de la chambre élargie radialement de l'unité 6;
- ii) la perturbation initiale de l'orbite puisse être compensée par les condensateurs  $E_2$  ,  $E_3$ .

Ces conditions ont déterminé la longueur efficace et l'intensité du champ électrique du condensateur. La construction du condensateur\* doit satisfaire à plusieurs exigences :

---

\*

La construction du condensateur d'injection et le système d'alimentation ont été réalisés par le NIIEFA (Léningrad). La mise au point du système a été assurée conjointement par les collaborateurs du NIIEFA et de l'IFVE.

- i) le champ électrique doit être homogène suivant  $Z$  avec une précision de  $0,1 \%$  dans la zone de passage du faisceau;
- ii) les plateaux doivent être disposés à l'extérieur de la zone active de la chambre à vide;
- iii) pour réaliser une injection multitours efficace, l'épaisseur du plateau interne, qui détermine <sup>l'écart</sup> ~~le~~ du faisceau, doit satisfaire à la condition  $d \ll \frac{\Delta r}{N}$ , où  $\Delta r$  - ouverture radiale de la chambre à l'endroit où le condensateur est disposé,  $N$  nombre de tours de l'injection. Dans notre cas,  $\Delta r = 75 \text{ mm}$ ,  $N = 3$  et l'on pourra adopter  $d \sim 1 \text{ mm}$ ;
- iv) Lors de la mise au point du système d'injection, il est souhaitable de pouvoir varier la position des plateaux dans la chambre sans altérer le vide. Ce dernier fait n'a pas été prévu dans le projet préliminaire et la construction des plateaux d'injection a été modifiée\*. Le plan schématique du condensateur  $E_1$  est représenté sur la figure 4. Les plateaux du condensateur (1), (2) sont liés rigidement entre eux et sont fixés à la chambre à vide (3) par des tiges (4) qui sortent par l'intermédiaire de boudins (5) à l'extérieur.

Cette construction permet de modifier la position radiale de chaque point de la suspension de  $\pm 15 \text{ mm}$  sans altérer le vide. Comme il apparaît sur la figure 4, l'épaisseur du plateau inférieur

---

\* L'élaboration a été effectuée au bureau d'étude de l'IEVE.

n'est pas uniforme suivant la longueur et atteint 1 mm à l'extrémité. Cela permet d'exposer le condensateur dans l'enveloppe des oscillations bétatroniques avec une perte minimale de faisceau. L'alimentation du condensateur est assurée par un redresseur haute tension IKU 110/1 de 100 kV de tension, ensemble avec un générateur HF stabilisé USN 110/3. L'utilisation d'un générateur à fréquence élevée a permis de recourir à un transformateur de petites dimensions, à noyau de ferrite, réduisant ainsi considérablement les difficultés de filtrage de la haute tension et permettant aussi de réaliser tous les dispositifs d'alimentation sous une forme compacte. Le schéma de l'alimentation et des circuits de mesure est représenté sur la figure 5. La mesure de la stabilité de tension dans les conditions de service (variation de la température ambiante  $\pm 2^\circ$ , stabilité du réseau d'alimentation  $\pm 0,5 \%$ ) était réalisée à l'aide d'un diviseur à huile à résistance élevée, monté à partir de résistances MGP et d'un voltmètre numérique DM 2022. Les mesures ont montré qu'au bout de  $1\frac{1}{2}$  heure de chauffage, les écarts de tension se rangeaient à l'intérieur des tolérances indiquées plus haut. Les pertes de faisceau sur les plateaux étaient enregistrées d'après la chute de tension dans les résistances  $R_3$ ,  $R_4$  et étaient représentées par un oscillogramme.

## 2) Condensateur pulsé d'injection

Les plateaux des condensateurs d'injection  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$ ,  $E_5$ , sont placés dans les intervalles entre les unités de l'électroaimant annulaire dans des sections de chambre à vide de diamètre

augmenté spécialement. Le schéma de l'alimentation des plateaux d'injection est représenté sur la figure 6. L'alimentation de chaque paire de plateaux inflecteurs est assurée selon un schéma symétrique à partir des redresseurs V-100-20 (1) et la tension maximale appliquée aux condensateurs est égale à 120 kV. La tension est stable à  $\pm 0,2 \%$  près. Le schéma de stabilisation de la haute tension fonctionne selon le principe suivant : le signal prélevé à la partie inférieure des diviseurs haute tension ( $\beta = 500$ ) est comparé à une tension de référence. Le signal "d'erreur" résultant parvient à l'entrée des unités amplificatrices-transformatrices (3), où il est amplifié, et module la grille de commande du générateur de haute fréquence. Le signal amplifié sur la fréquence porteuse de 1 MHz est envoyé aux transformateurs HF à noyau de ferrite (5), puis il est détecté et arrive à la grille d'une lampe de transmission G65/300. La bande de la caractéristique de fréquence de la contre-réaction est  $\Delta f = 0 + 1$  kHz. Le coefficient d'amplification de tension du circuit de contre-réaction seul est  $K\beta = 40$ . La tension de référence pour le système de stabilisation  $\pm 120$  V est engendrée par un redresseur (2), dont la source de tension primaire du transformateur à noyau de ferrite est constituée par un générateur HF stabilisé en amplitude. Pour des variations du réseau d'alimentation de  $\pm 10 \%$ , la tension de sortie de l'unité varie de  $\pm 0,1 \%$ . Les pertes de tension sur les plateaux étaient mesurées par une méthode de compensation à l'aide d'un potentiomètre R-317 et d'un élément normal, branchés en série à la partie inférieure d'un diviseur de tension de  $60 M\Omega$ . La stabilité dans le temps de la tension est de  $\pm 0,3 \%$  pour une tension nominale de  $\pm 60$  kV.

Grâce à un blindage spécial des circuits connectant les éléments de contre-réaction, on est parvenu à abaisser considérablement le fond de la fréquence 50 Hz à la sortie des blocs de tension de référence, des amplificateurs-transformateurs et des détecteurs. Le niveau total du fond sur la grille de G65/300 ne dépasse pas 1 V, ce qui correspond à des pulsations de haute tension inférieures à  $\pm 40$  V. La chute de tension des plateaux est réalisée par une lampe de modulation GI/2A. Les régimes de variation de la tension sur les plateaux et de travail des différentes unités de schéma sont montrés sur le diagramme de la figure 7. La mesure des fronts de descente de la tension des condensateurs a été effectuée à l'aide de diviseurs capacitifs, dont le signal était transmis par des résistances d'accord à l'entrée à haute impédance d'un oscillogramme. Le niveau inférieur du diviseur était choisi à partir de la condition  $C_2 \ll \sum C_u$ , où  $C_u$  - capacité des circuits de mesure, ce qui évitait l'altération du front du signal par des capacités parasites. L'oscillogramme des fronts de chute de tension est donné sur la figure 8. La durée du front de chute est assez voisine d'un quart de période d'oscillation des circuits  $L_n C_n$ , qui, compte tenu de la capacité du diviseur de mesure, sont égaux à  $\tau_{n+} = 0,1 \mu\text{sec}$ ,  $\tau_{n-} = 0,12 \mu\text{sec}$ , ce qui témoigne d'une rapidité suffisante de l'élément de commutation. La résistance variable de haute tension  $R_3$  sert à prolonger le front de chute de tension dans le cas de l'injection multitours; elle est hors circuit pour l'injection à un seul tour. Le début de la chute de tension de chaque plateau est synchronisé à l'aide de lignes de retard à  $0,02 \mu\text{sec}$

près. La tension résiduelle après la chute de la haute tension des plateaux fut mesurée à l'aide d'un schéma à limiteur à diode /3/. La valeur de la tension résiduelle au cours des 600 premières  $\mu$ sec après la chute ne dépasse pas 40 V, puis augmente progressivement et atteint, au bout de 150 msec, des valeurs de 1 à 3 kV, selon l'exemplaire de la lampe G65/300; ce qui reste dans les limites admissibles de la tension résiduelle déterminée par la formule (10). L'utilisation de lampes haute tension pulsée GI-2A en qualité de commutateurs, dans le schéma de chute de tension des plateaux, a permis de réduire au minimum la quantité d'éléments haute tension dans les différents circuits et d'utiliser le même schéma en régime d'injection à un ou à plusieurs tours.

4. Quelques résultats de travail avec le faisceau

Lors de la mise en route de l'accélérateur et dans les travaux ultérieurs, on a utilisé l'injection à un tour. En règle générale, on a mis en oeuvre la variante utilisant une seule paire de plateaux pulsés. Le régime typique de la tension sur les condensateurs d'injection était  $U_{E_1} = 70$  kV et  $U_{E_2} = 115$  kV, valeurs qui coïncident assez bien avec le calcul.

Dans la préparation de la mise en route de l'accélérateur, on a prévu la possibilité d'observer des pertes de particules sur les plateaux du condensateur  $E_1$

à l'injection et au cours des révolutions suivantes. Le schéma de l'indication est donné sur la figure 5, et l'oscillogramme type des pertes sur les deux plateaux est représenté à la figure 9. Il était très difficile de tenir compte de l'influence des particules secondaires dans les conditions concrètes, lorsqu'un des plateaux du condensateur  $E_1$  était porté à un potentiel élevé. Toutefois, comme la distance entre les plateaux était faible, on peut considérer qu'il ne se produit pas de "fuite" des particules des deux plateaux considérés dans leur ensemble, c'est-à-dire que la charge totale des deux plateaux est égale à la charge des particules qui s'y sont perdues. Les conditions d'injection dans  $E_1$  étaient choisies de telle sorte que le courant total dans le circuit de mesure des deux plateaux soit minimal. Avec un courant du linac injecteur de 50 mA, les pertes de faisceau sur les plateaux  $E_1$  ne dépassent pas 0,5 mA. Il ne se produit pas de perte de particules au cours des révolutions suivantes sur le plateau "de terre" du condensateur  $E_1$  avec le réglage standard du régime d'injection. Les figures 10 et 11 donnent les courbes expérimentales montrant la variation de l'intensité du faisceau accéléré, en fonction de la tension appliquée aux plateaux d'injection. La figure 10 illustre la relation entre l'intensité et l'importance de l'écart de la tension sur  $E_1$  par rapport à la valeur optimale; la figure 11 indique la même relation pour le condensateur pulsé  $E_2$ . On voit que si dans le premier cas une variation de tension de 1 % entraîne une variation de l'intensité de 10 %, dans le second cas cette même variation de l'intensité est provoquée par une varia-

tion de seulement 6 à 7 % de la tension sur  $E_2$ . Il est intéressant d'examiner aussi la grandeur "effective" du front de descente de la tension des plateaux pulsés d'après les données du faisceau, qui montre que des particules existent (figure 12) dans toutes les 30 zones de stabilité de la haute fréquence (la multiplicité de la fréquence de la tension accélératrice est égale à 30). A son tour, cela indique que le temps de descente de la tension ne dépasse pas 0,3  $\mu$ sec.

\*  
\*       \*  
\*

#### CONCLUSION

Le démarrage du synchrotron à protons de l'IFVE et son fonctionnement au cours des premiers mois ont montré que les systèmes d'injection en régime d'injection à un tour présentent les caractéristiques qui assurent le fonctionnement normal de l'accélérateur. On prévoit d'effectuer l'injection multitours ultérieurement.

Il appartient aux auteurs de remercier les collaborateurs du NIEFA - D.V. Efremov (Léningrad): Y.I. Ro, O.M. Zajcev, A.S. Berdov, A.S. Gerasimov, S.V. Semenov, qui ont apporté une importante contribution à l'élaboration et à la mise au point des différents éléments du système d'injection, ainsi que les collaborateurs de l'IFVE : V.N. Andrejchuk, A.I. Grigor'ev, V.P. Sidorov, A.I. Gurov, A.A. Aseev pour leur participation à l'ajustement de l'ensemble du système. Les auteurs remercient Y.M. Ado et A.A. Zhuralev pour leur prévenance.

CALCUL DE LA TRAJECTOIRE D'INJECTION DU FAISCEAU

Pour calculer la trajectoire d'injection, divisons en deux parties la zone de l'électro-aimant annulaire située entre les plateaux  $E_1$  et  $E_3$  :

- 1) de la sortie de  $E_1$  à l'entrée de  $E_2$  et
- 2) de la sortie de  $E_2$  à l'entrée de  $E_3$ .

A partir des matrices des unités magnétiques de /4/, on peut obtenir les matrices des deux parties, qui sont de la forme suivante :

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{vmatrix} -0,535; & 22,3 \\ -0,096; & 2,098 \end{vmatrix} \\ M_2 &= \begin{vmatrix} -0,8335; & 21,485 \\ -0,124; & 1,98 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

A l'aide de (2) et (3), on peut obtenir l'expression des coordonnées du faisceau aux différents points de la trajectoire d'injection en fonction des coordonnées de la sortie des plateaux  $E_1$ . A l'entrée des plateaux  $E_2$  :

$$\begin{aligned} r_{E_2 \text{ en}} &= -0,535 \cdot r_{E_1 \text{ sor}} + 22,3 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} \\ r'_{E_2 \text{ en}} &= -0,096 \cdot r_{E_1 \text{ sor}} + 2,098 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} \end{aligned}$$

A la sortie de  $E_2$  :

$$\begin{aligned} r_{E_2 \text{ sor}} &= -0,655 \cdot r_{E_1 \text{ sor}} + 24,955 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} + 2,34 \cdot 10^{-8} \cdot U_{E_2} \\ r'_{E_2 \text{ sor}} &= -0,096 \cdot r_{E_1 \text{ sor}} + 2,098 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} + 3,74 \cdot 10^{-8} \cdot U_{E_2} \end{aligned}$$

A l'entrée de  $E_3$  :

$$\begin{aligned} r_{E_3 \text{ en}} &= -1,515 \cdot r_{E_1 \text{ sor}} + 24,37 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} + 78,5 \cdot 10^{-8} U_{E_2} \\ &= -0,109 \cdot r_{E_1 \text{ sor}} + 1,067 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} + 7,10 \cdot 10^{-8} U_{E_2} \end{aligned}$$

La tension sur les plateaux  $E_2$  et  $E_3$  doit être choisie de telle façon que les coordonnées du faisceau à la sortie de  $E_3$  soient nulles. Donc on peut écrire :

$$\begin{aligned} -1,65 r_{E_1 \text{ sor}} + 25,703 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} + 87,37 \cdot 10^{-8} U_{E_2} + 2,34 \cdot 10^{-8} U_{E_3} &= 0 \\ -0,109 r_{E_1 \text{ sor}} + 1,067 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} + 7,1 \cdot 10^{-8} U_{E_2} + 3,74 \cdot 10^{-8} U_{E_3} &= 0 \quad (4) \end{aligned}$$

En résolvant (4) par rapport à  $U_{E_2}$ ,  $U_{E_3}$  pour différents  $r_{E_1 \text{ sor}}$ ,  $r'_{E_1 \text{ sor}}$ , nous déterminons les conditions de mise en orbite d'équilibre du faisceau.

Cherchons l'écart maximal de la trajectoire des particules injectées par rapport à l'orbite d'équilibre dans l'unité 6. Sous forme matricielle, nous aurons :

$$\begin{vmatrix} r_{\delta \text{ max}} \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \omega l_m & \frac{\sin \omega l_m}{\omega} \\ -\omega \sin \omega l_m & \cos \omega l_m \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0,9 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} r_{E_1 \text{ sor}} \\ r'_{E_1 \text{ sor}} \end{vmatrix} \quad (5)$$

Pour une unité focalisante  $w = 0,1085$  m et  $l_m$  - distance de l'extrémité de l'unité au point où la trajectoire présente un maximum. On peut tirer de (5) les expressions suivantes, qui s'appliquent dans notre cas avec une bonne précision :

$$\begin{aligned} r_{\mathbf{6} \max} &= r_{E_1 \text{ sor}} \cdot \cos w l_m + 9,22 \cdot r'_{E_1 \text{ sor}} \cdot \sin w l_m \\ 0 &= r'_{E_1 \text{ sor}} \cdot \cos w l_m - 10,85 \cdot 10^{-2} \cdot r_{E_1 \text{ sor}} \cdot \sin w l_m \end{aligned} \quad (6)$$

En particulier, en résolvant (6) avec  $r_{E_1 \text{ sor}} = 10 \cdot 10^{-2}$  m et  $r'_{E_1 \text{ sor}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  rad, nous aurons  $r_{\mathbf{6} \max} = 10,27 \cdot 10^{-2}$  m pour  $l_m = 2,09$  m. A l'aide des formules (2) nous déterminons les paramètres d'entrée du faisceau et la tension sur les plateaux du condensateur statique  $E_1$ . Compte tenu de ce que la position raidale prévue du point d'entrée du faisceau dans les plateaux  $E_1$   $r_{E_1 \text{ en}} = 12,8 \cdot 10^{-2}$  m, nous trouvons la valeur de la tension appliquée au condensateur statique et l'angle d'entrée des particules dans  $E_1$ .

CALCUL DES TOLERANCES SUR LES PARAMETRES DU SYSTEME D'INJECTION

Utilisons l'équation du mouvement des particules sous la forme

$$X_{r,z} = 2 \cdot |a| \cdot r_{r,z} |\varphi|_{r,z} \cdot \cos(\psi_{r,z} + \alpha_{r,z}),$$

où  $|\varphi|, \psi$  - module et phase de la fonction de Floquet pour la structure magnétique considérée,  $|a|, \alpha$  - constantes déterminées par les conditions initiales.

Dans un système d'injection parfaitement accordé, la condition  $|a|_{r,z} = 0$  doit être remplie pour une particule centrale du faisceau après traversée des condensateurs de déflexion.

L'influence des tolérances peut être considérée comme une variation des conditions initiales, entraînant l'apparition d'oscillations cohérentes du faisceau au voisinage de l'orbite d'équilibre. Le maximum de l'enveloppe des oscillations sera :

$$2 \cdot |a|_{r,z} \cdot |\varphi|_{\max r,z}$$

Pour la constante  $2 |a|$ , nous avons /5/ :

$$2 |a| = \frac{1}{|\varphi|_i} \left[ X_i^2 + \frac{1}{V_0^2} (X_i' |\varphi|^2 - X_i |\varphi|_i' |\varphi|_{i1})^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

où  $\chi_i, \chi'_i$  - déflexion et angle par rapport à l'orbite d'équilibre en un certain point,  $|\varphi|_i$  - valeur du module de la fonction de Floquet au même point. Les conditions normatives suivantes correspondent à la fonction de Floquet :

$$\begin{vmatrix} \varphi_i & \varphi_i^* \\ \varphi'_i & \varphi_i'^* \end{vmatrix} = -2j V_0$$

$V_0$  - volume des phases unitaire.

Par suite de la linéarité des oscillations bétatroniques une déviation de la trajectoire des particules de  $\Delta\chi_i, \Delta\chi'_i$  provoquera un accroissement de l'enveloppe des oscillations d'une valeur

$$\Delta X_{\max} = \frac{|\varphi|_{\max}}{|\varphi|_i} \left[ \Delta\chi_i^2 + \frac{1}{V_0} (\Delta\chi'_i |\varphi|_i^2 - \Delta\chi_i |\varphi|_i' |\varphi|_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Lors d'une variation de la tension des condensateurs de  $\Delta U$ , la déflexion complémentaire des particules est exprimée par les formules (1), où l'on substitue  $U$  par  $\Delta U$ . Les estimations montrent qu'avec la structure magnétique et les condensateurs considérés, l'accroissement de l'enveloppe sera principalement déterminé par la variation de l'angle  $\Delta\chi'_i$ , c'est-à-dire

$$\Delta X_{\max} = |\varphi|_{\max} \cdot |\varphi|_i \Delta\chi'_i \quad (7)$$

Pour évaluer quantitativement les tolérances, fondons-nous sur la déformation d'orbite admissible. Comme les déformations doivent être beaucoup plus petites que l'ouverture de la chambre,

prenons  $\Delta X_{r,Z} = \pm 1 \text{ mm}$ . Il résulte de (1) et (7) que :

$$\Delta U_{r,Z} = \pm \frac{\Delta X \cdot d \cdot \beta^2 \cdot C^2 \cdot \gamma \cdot m_0}{|\varphi|_{\max} \cdot |\varphi|_i \cdot \ell} \quad (8)$$

En portant les paramètres du condensateur  $E_1$  et les valeurs des modules des fonctions de Floquet tirées de /4/ :

$$\begin{aligned} |\varphi|_{Z_{\max}} &\cong |\varphi|_{r_{\max}} = 6,6 \text{ m} \\ |\varphi|_{Z_{E_1}} &\cong |\varphi|_{r_{E_1}} = 5,5 \text{ m} \end{aligned}$$

nous obtenons pour l'écart admissible de la tension du condensateur  $E_1$  de la valeur nominale

$$\Delta U_{ZE_1} = \Delta U_{ZE_1} \cong \pm 100 \text{ v}$$

La non-verticalité admissible des plateaux sera déterminée par l'angle

$$\Delta \theta_{E_1} = \pm \frac{\Delta U_{ZE_1}}{U_{E_1}} \cong \pm 10^{-3} \text{ rad.}$$

Pour estimer les tolérances sur les paramètres des condensateurs  $E_2, E_3$ , exprimons  $\beta^2 C^2 \gamma m_0$  dans (8) en fonction du champ H et du rayon de courbure R :

$$\Delta U_{E_2 \div E_3} = \pm \frac{\Delta X \cdot d \cdot (300 \text{ HR})^2}{|\varphi|_{\max} \cdot |\varphi|_{E_2 \div E_3} \cdot \ell \cdot \sqrt{(300 \text{ HR})^2 + E_0^2}} \quad (9)$$

Comme dans l'injection à un tour opérant dans le cas général 4 systèmes d'alimentation pulsés dont les écarts de tension peuvent être en phase, de telle sorte qu'ils provoqueront des déformations de l'orbite de même sens, les tolérances sur la stabilité de chacun des systèmes d'alimentation sont quatre fois plus sévères. Ainsi, l'écart admissible de la tension sur les plateaux des condensateurs  $E_3$ ,  $E_2$  par rapport à la valeur nominale aux différents moments est de la forme :

$$\Delta U_{E_1 \div E_5} = \pm 58 \frac{(76 + 6500 t)^2}{\sqrt{(76 + 6500 t)^2 + 2,6 \cdot 10^4}} \text{ volt} \quad (10)$$

où l'on a substitué dans (9)  $R = 194 \text{ m}$ ,  $H = H_{inj} + \dot{H}t$  et  $|\varphi|_{rE_3} = 4,9 \text{ m}$ . Pour le moment d'injection, en posant  $t = 0$ , nous aurons la tolérance sur la stabilité des sources d'alimentation et la tension résiduelle après l'impulsion :

$$\Delta U_{E_2 \div E_5} \pm 190 \text{ V.}$$

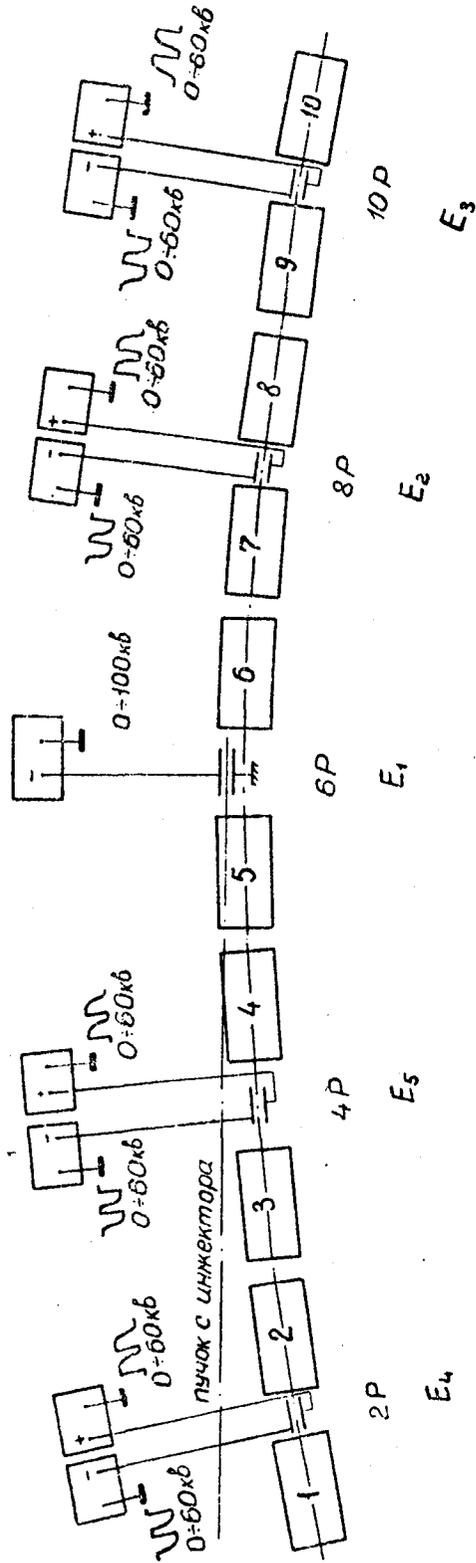
La tolérance sur la verticalité des plateaux sera :

$$\Delta \theta_{E_2 \div E_5} = \pm \frac{2 \cdot \Delta U_{E_2 \div E_5}}{U_{E_2 \div E_5}} \cong 4 \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$$

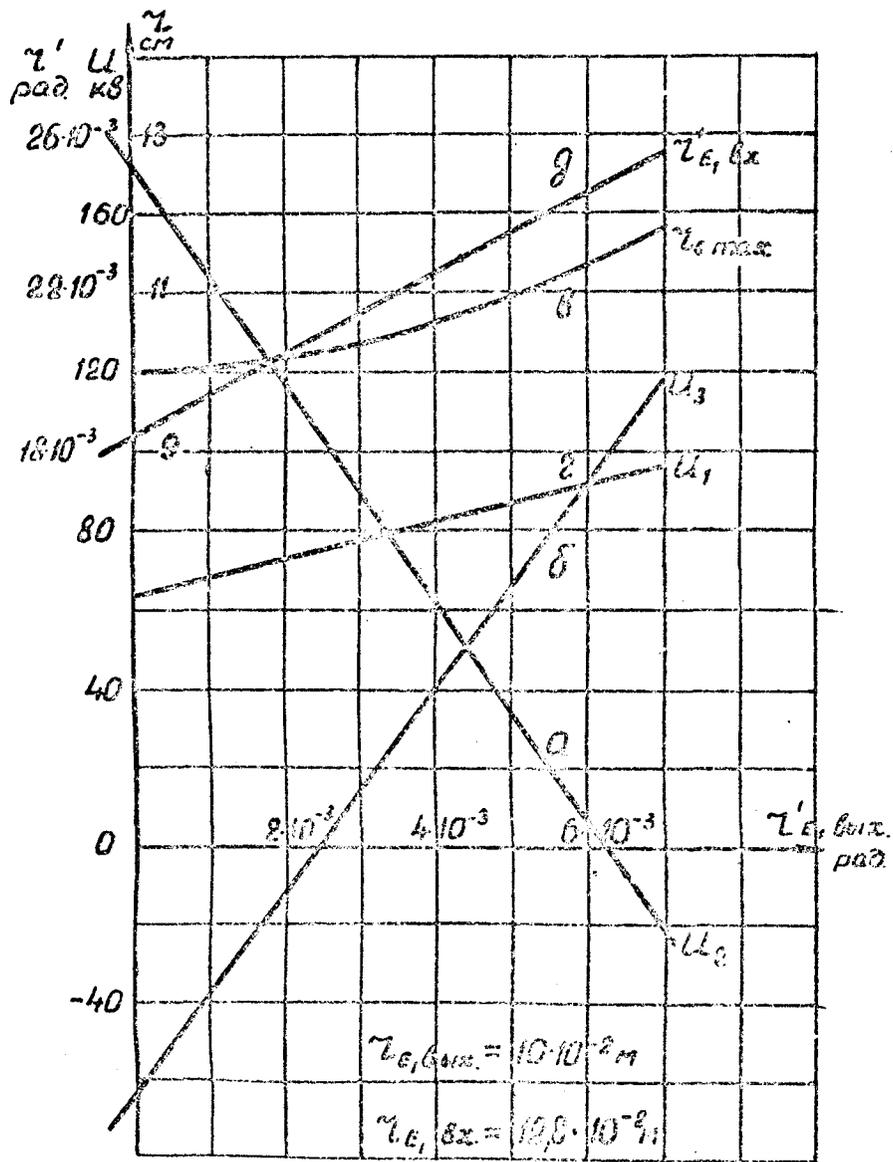
\*  
\*       \*

REFERENCES

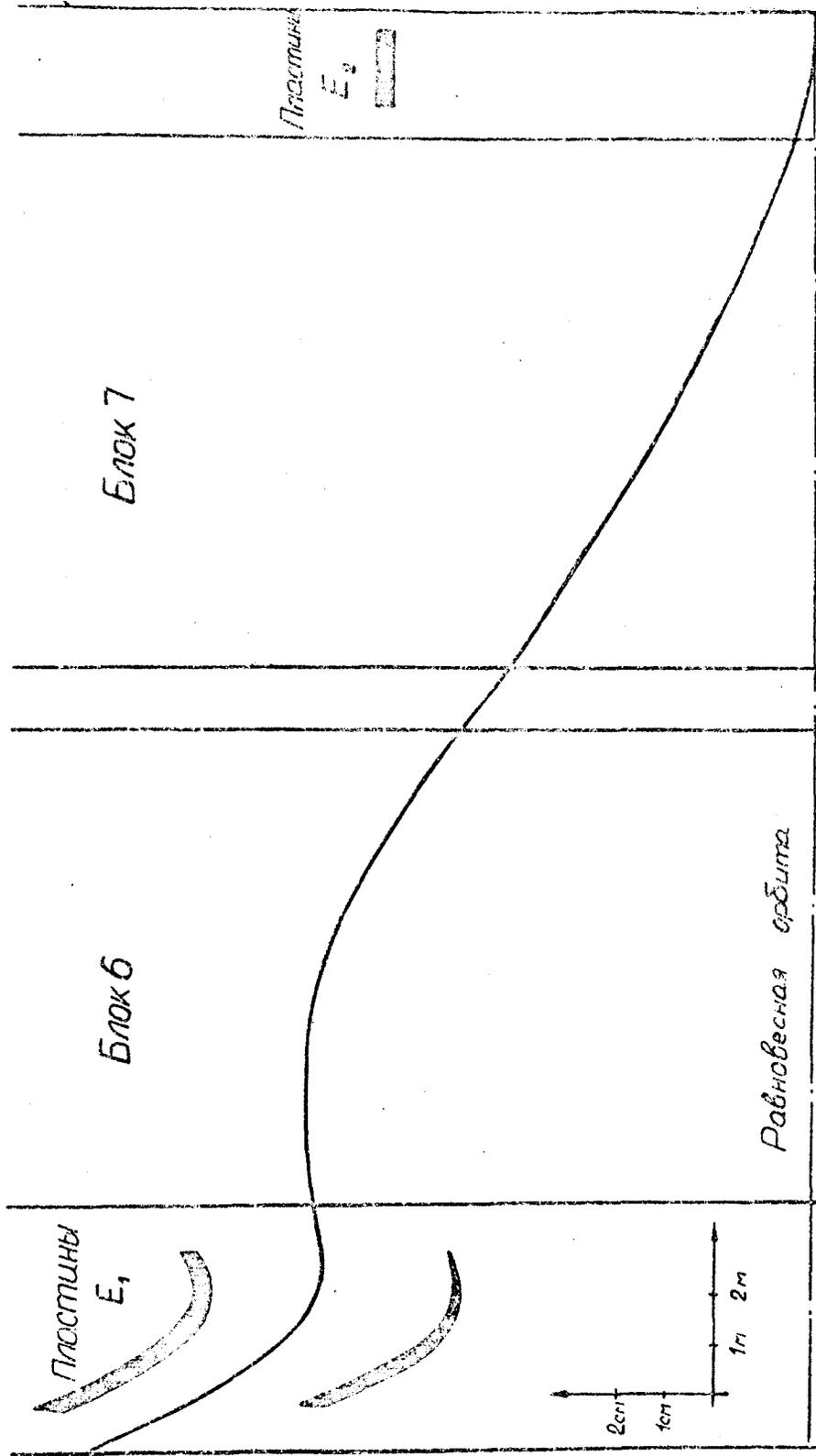
1. D.G. Koshkarev. Beam Injection into a 50 GeV Strong-Focusing Proton Synchrotron. International Conference on High-Energy Accelerators and Instrumentation. CERN, 1959.
2. V.V. Vladimirkij, E.G. Komar and A.L. Mints. Main Characteristics of a Projected Strong-Focusing 50-60 GeV Proton Accelerator. CERN Symp. 1, 124 (1956).
3. S.N. Bojko, L.Z. Barabash, A.B. Gerasimov, S.P. Dimitriev, V.G. Zherarov, I.M. Rojfe, B.N. Stekol'nikov. PTE N° 4 (1962)
4. E.E. Tarasov, V.V. Vladimirkij, D.G. Koshkarev: Caractéristiques prévues du synchrotron à protons de 60-70 GeV. Preprint ITRF, N° 232 (1964). Traduit au CERN.
5. A.A. Kolomenskij, A.N. Lebedev: Théorie des accélérateurs cycliques. M., 1962.



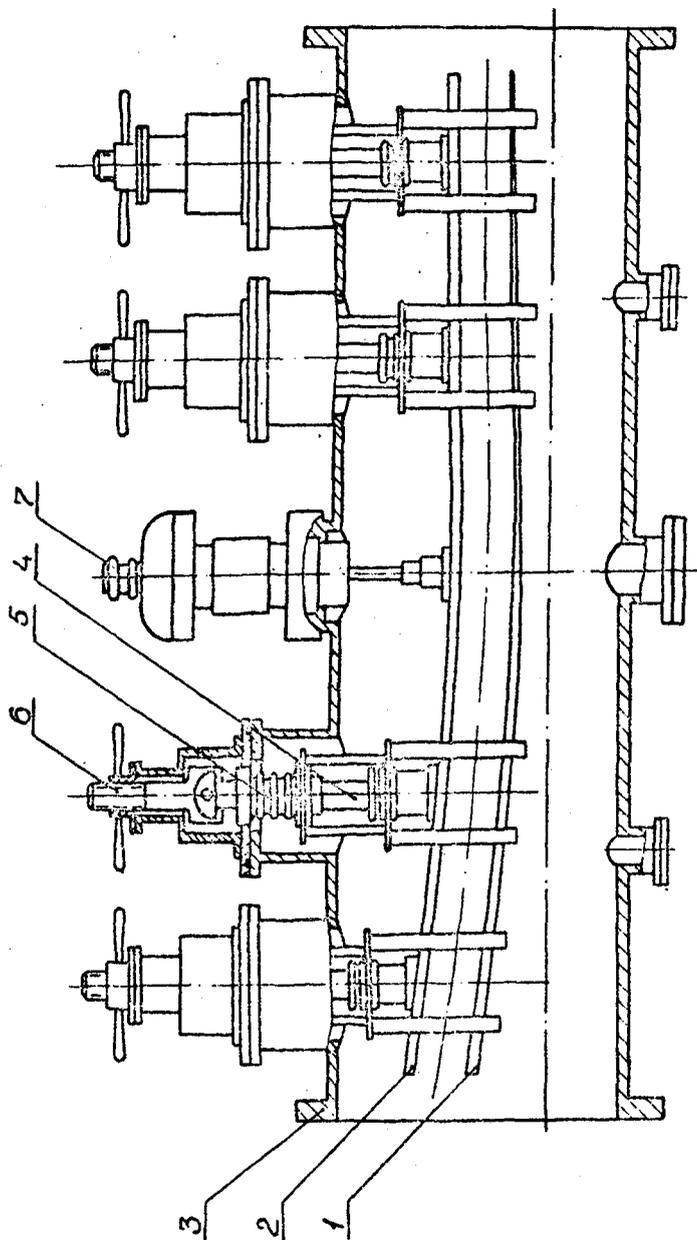
1. Schéma d'implantation des équipements d'injection de faisceau dans le synchrotron à protons de 70 GeV.



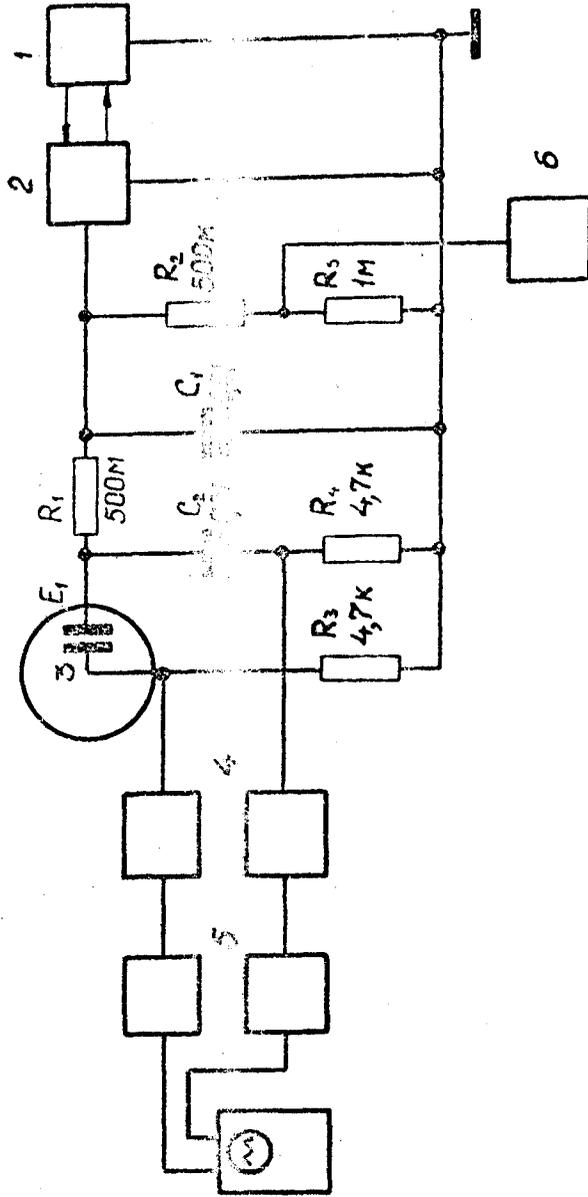
2. Paramètres de calcul des systèmes d'injection pour différents angles de sortie du condensateur  $E_1$ .  $U_1$  - tension sur le condensateur  $E_1$ ;  $U_2$  - tension sur le condensateur  $E_2$ ;  $U_3$  - tension sur le condensateur  $E_3$ ;  $r_{6 \max}$  - déflexion maximale de la trajectoire d'injection par rapport à l'orbite centrale dans l'unité  $\delta$ ;  $r'_{E_1 \text{ en}}$  - angle d'entrée dans le condensateur  $E_1$ .



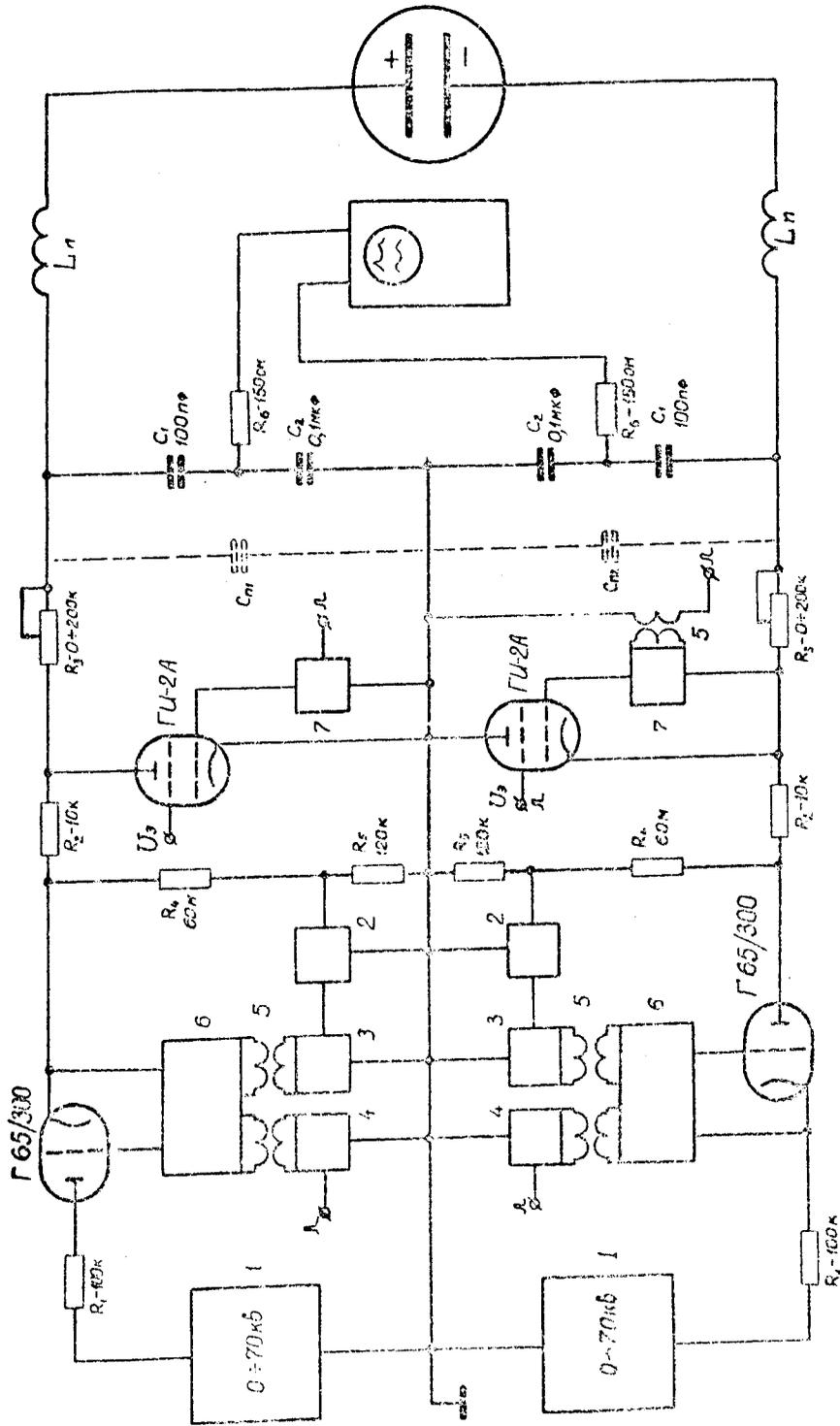
3. Trajectoire du faisceau dans la section d'injection avec une seule paire de plateaux pulsés en fonctionnement.



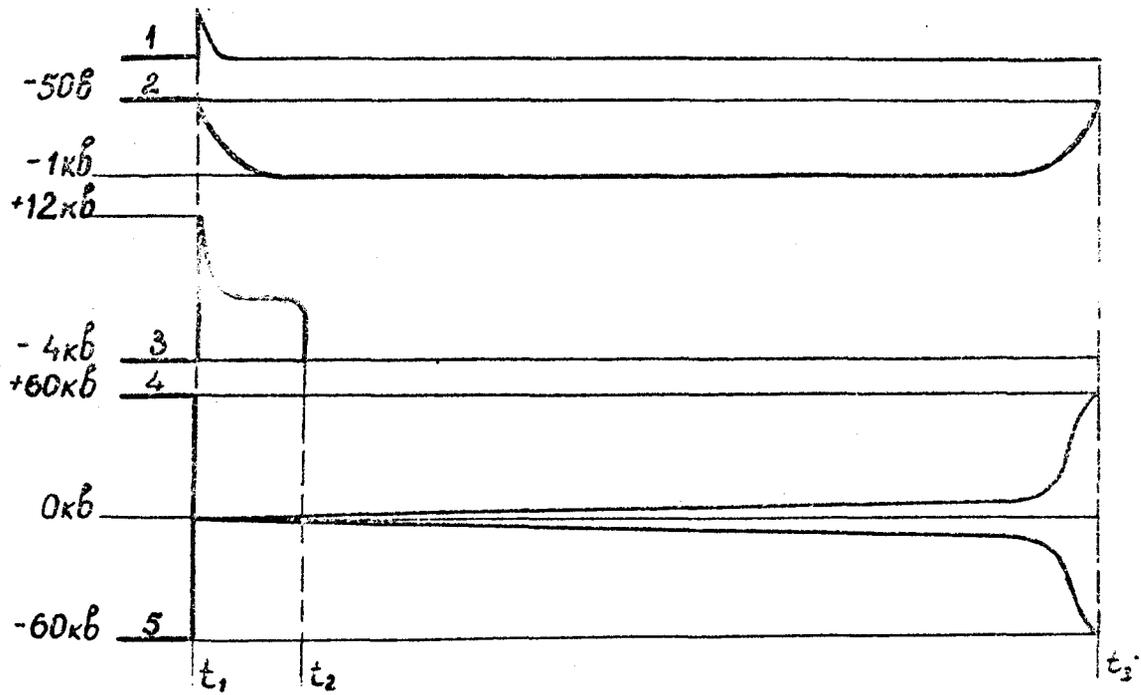
4. Condensateur statique  $E_1$ . 1,2 - plateaux du condensateur;  
3 - chambre à vide; 4 - tige de fixation; 5 - boudin à vide;  
6 - entraînement manuel; 7 - isolateur d'amenée de la haute  
tension.



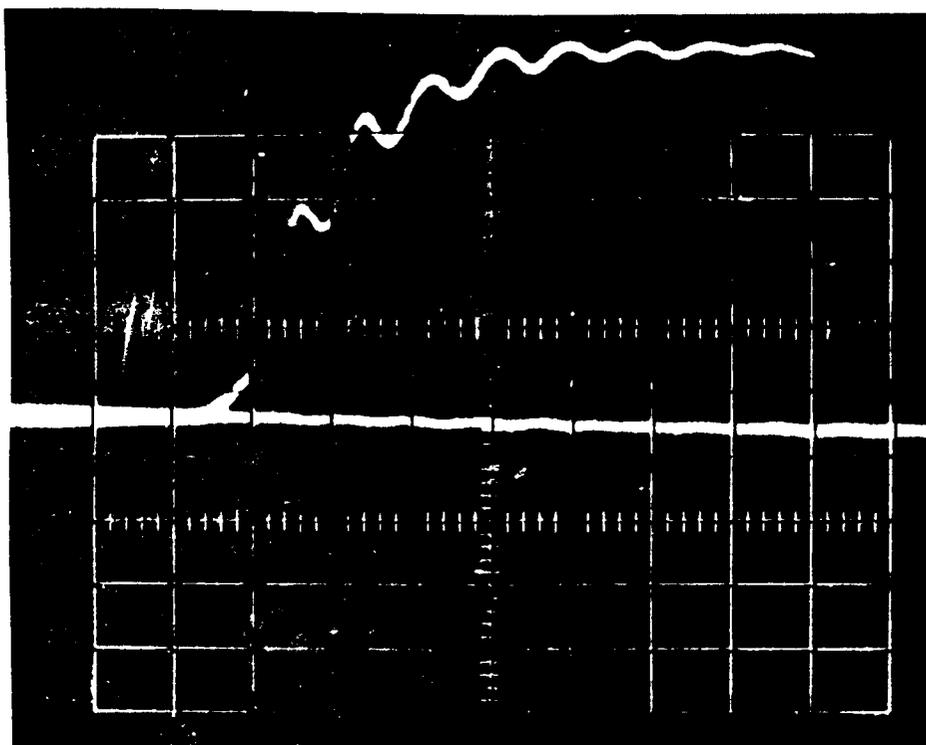
5. Schéma de l'alimentation du condensateur  $E_1$ . 1 - générateur haute fréquence USN 110/3; 2 - redresseur haute tension IKU 110/1; 3 - plateau du condensateur  $E_1$ ; 4 - amplificateur; 5 - répétiteur cathode; 6 - voltmètre numérique.



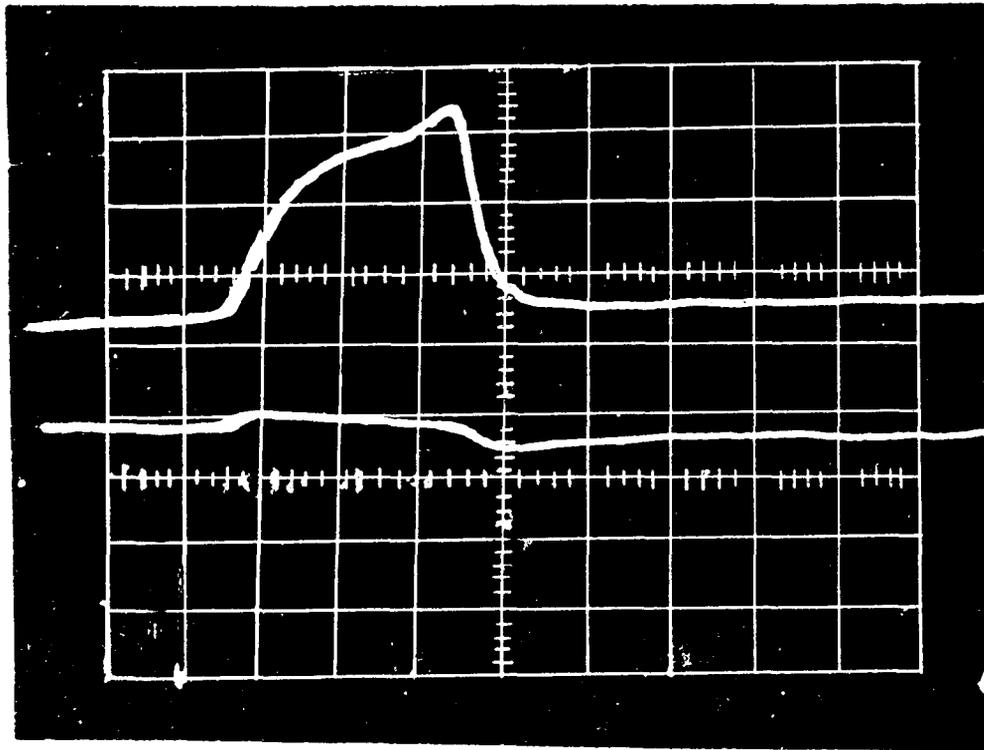
6. Schéma d'alimentation des condensateurs pulsés. 1 - redresseur haute tension; 2 - unité de tension de référence; 3 - amplificateur-transformateur; 4 - unité de formation des impulsions de verrouillage; 5 - transformateurs pulsés III; 6 - détecteur; 7 - unités d'allumage.



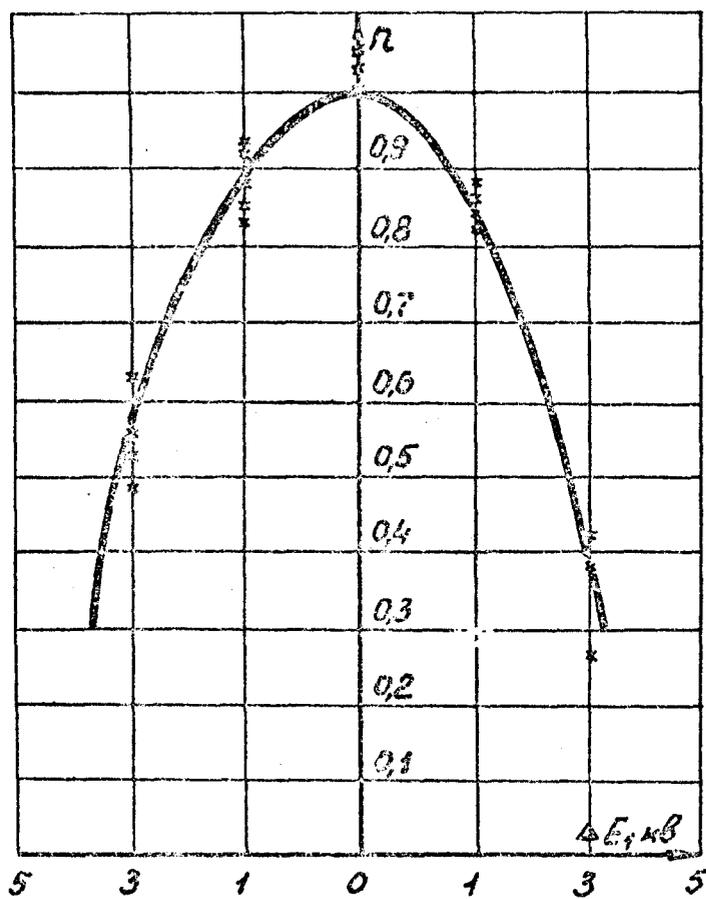
7. Courbes des tensions dans le temps du schéma d'alimentation des condensateurs pulsés. 1 - impulsion d'allumage; 2 - tension sur les grilles des lampes G 65/300; 3 - tension sur les grilles des lampes IG-2A; 4,5 - tensions sur les plateaux des condensateurs;  $t_2 = 600 \mu\text{sec}$ ,  $t_3 = 1,6 \text{ sec}$ .



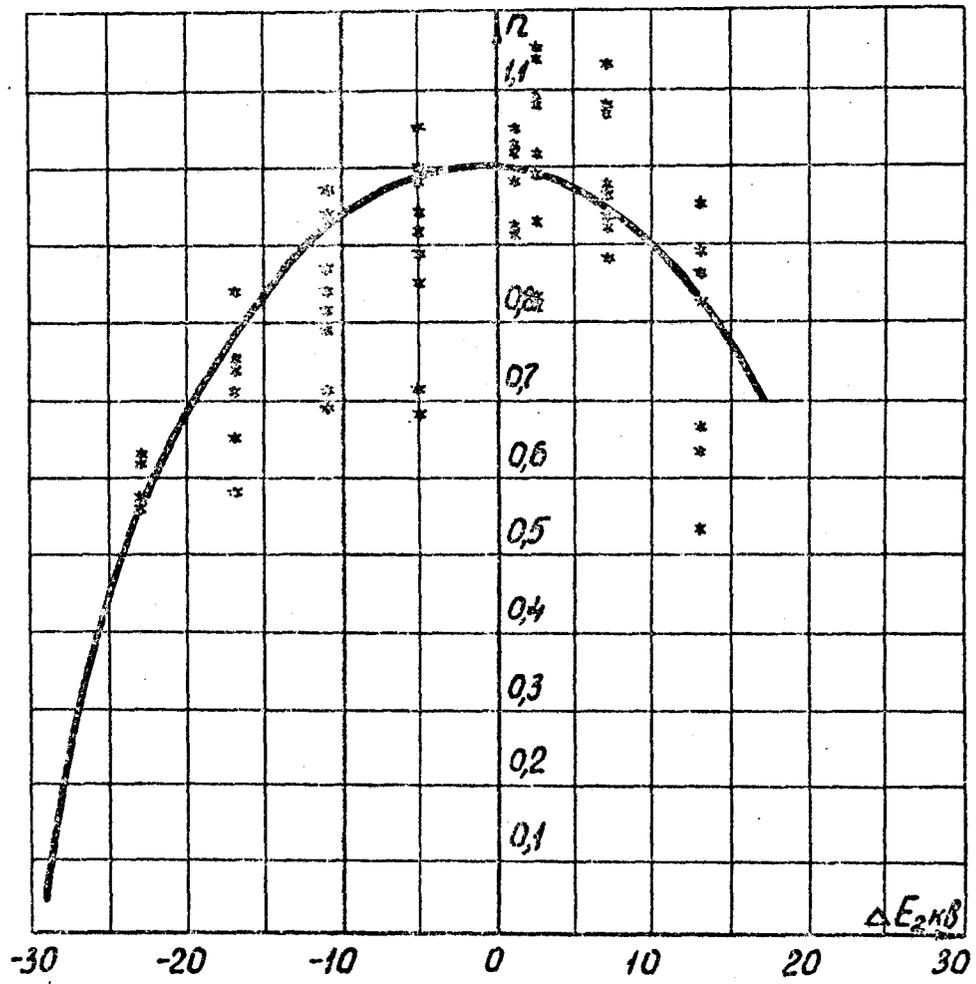
8. Oscillogramme de l'impulsion de la chute de tension des plateaux des condensateurs pulsés. Les signaux des diviseurs de mesure étaient transmis aux entrées différentielles de l'amplificateur de l'oscillographe S-1-42. Sensibilité 0,2  $\mu$ sec/div.



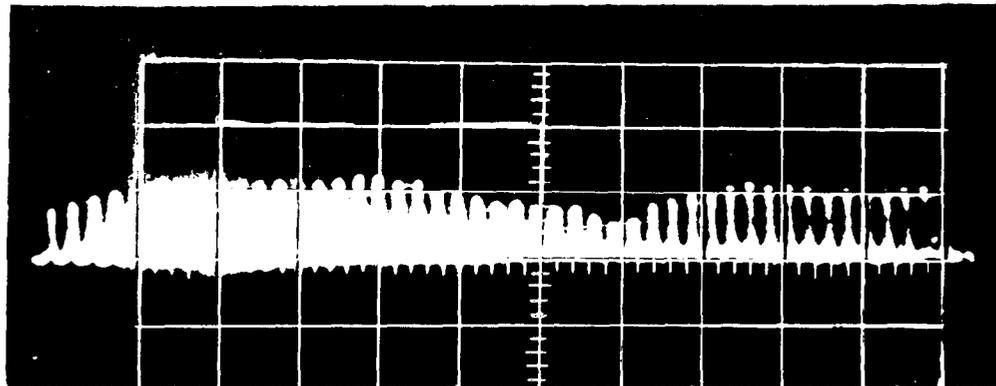
9. Oscillogramme du courant dans les circuits des plateaux du condensateur  $E_1$  au moment de l'injection.  
Trace supérieure - courant dans le circuit du plateau externe.  
Trace inférieure - courant dans le circuit du plateau interne.  
Sensibilité : 5  $\mu$ sec/div.



10. Variation de l'intensité du faisceau accéléré en unité conventionnelle, en fonction du désaccord de tension du condensateur  $E_1$ .



11. Variation de l'intensité du faisceau accéléré en unité conventionnelle en fonction du désaccord de tension du condensateur  $E_2$ .



12. Oscillogramme de l'intensité du faisceau accéléré.  
Sensibilité 1  $\mu$ sec/div.