

ՏԽ 8706964

Препринт ЕФН-912(63)-86

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ**  
**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**Г. А. МАРТИРОСЯН, В. Ц. НИКОГОСЯН, С. Н. ОГАНЕСЯН,  
А. А. ПЕТРОВА, К. А. САДЯН**

**РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЕРЕВАНСКОГО  
СИНХРОТРОНА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЦИКЛАХ УСКОРЕНИЯ**

**ЦНИИ Научинформ**

**ЕРЕВАН-1986**

**Հ.Ա.ՍՄՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Վ.Ծ.ՆԻԿՈՂՈՍՅԱՆ, Ս.Ն.ՀՈՎՀԻՆՆԻՍՅԱՆ,  
Ա.Ա.ԳԵՏՐՈՎԱՆ, Կ.Ա.ՍՄԻՐՈՅԱՆ**

**ԵՐԵՎԱՆԻ ՍՈՍՔՐՈՏՐՈՆՈՑԻՆ ՀԱՊՈՒՄՈՐՓՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ  
ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎՈՐԿԸ ԲՐՈՎՈՑՄԱՆ ԲԱՐՁՐ ՊԱՐԲԵՐՈՇՐՁԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Հետազոտված է համահունձյան Բարձրագույն հետազոտողություններ արագազան կրկնվող պարբերաշրջաններում առանց գործող համակարգերի արմատական փոփոխությունների: Բնութագրված են արագազուգի մագնիսական և արագաձուլ համակարգերը, համեմատված են նրանց Բյուրացրերը արագազուգային համահունձյան երկու արժեքների դեպքում՝ 47 և 62,5 Հո: Ցույց է տրված, որ արագաված փնջի միջին հոսանքը աճում է 33 % -ով 62,5 Հո համահունձյան դեպքում, ստանց Բարձր համահունձյան հզորություն աճի՝ ելքի փնջի էներգետիկական զրկածունձյան պահանջաւմ: Այս դեպքում ռեզոնանսային ուղւագծի էլեկտրամագնիսի կոնդենսատորային մարակոցի հզորությունը երկու անգամ կրճատվում է, իսկ էլեկտրամագնիսի գործուն կորուստների աճը չի գերազանցում ներկայիս գործող համակարգերի Ցույլատրելի արժեքները: Անցումը կրկնվող պարբերաշրջանների Բարձրելված համահունձյուններին հանդիսանում է սինքրոտրոնի ,,հարձ գագաթի,, ռեճագրին փոխանգելու սկզբնական փուլը:

**Երեւանի Ֆիզիկայի ինստիտուտ**

**Երեւան 1986**

H.A. MARTIROSYAN, V.Ts. NIKOGOSYAN, S.N. OGANESYAN,  
A.A. PETROVA, K.A. SADOYAN

OPERATION MODES CALCULATION FOR YEREVAN SYNCHROTRON  
SYSTEMS AT INCREASED ACCELERATION CYCLES

A possibility of acceleration cycles frequency increase without basic changes in available systems has been investigated. The accelerating and magnet systems have been studied, their parameters having been compared at two values of accelerating frequency, 47 and 62.5 Hz. It has been shown, that at 62.5 Hz frequency operation, the accelerated beam mean current increases by 33% without any increase in high-frequency power consumption when keeping energy spread of extracted beam. In this operation mode a capacity of condenser battery of electromagnet resonance circuit is reduced by half, while increase in electromagnet active losses does not exceed values permissible for the magnet system available. Operation at increased frequency of acceleration cycles is an initial stage of converting the synchrotron to the "flat-top" operation mode.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1986

УДК 621.3.078:621.615

Г.А.МАРТИРОСЯН, В.Ц.НИКОГОСЯН, С.Н.ОГАНЕСЯН,  
А.А.ПЕТРОВА, К.А.САДОЯН

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЕРЕВАНСКОГО  
СИНХРОТРОНА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЦИКЛАХ УСКОРЕНИЯ

В работе исследована возможность повышения частоты повторения циклов ускорения без коренных перестроек в существующих системах. Рассмотрены ускоряющая и магнитная системы ускорителя, сравнены их параметры при двух значениях ускоряющей частоты 47 и 62,5 Гц. Показано, что при переходе на частоту 62,5 Гц средний ток ускоренного пучка возрастает на 33% без увеличения расхода ВЧ мощности при сохранении величины энергетического разброса выведенного пучка. В этом режиме емкость конденсаторной батареи резонансного контура электромагнита сокращается вдвое, а увеличение активных потерь в электромагните не превышает допустимых величин в существующей магнитной системе. Переход на повышенную частоту повторения циклов является начальным этапом перевода синхротрона в режим работы с "плоской вершиной".

Ереванский физический институт

Ереван 1986

Эффективным способом повышения интегральной интенсивности потоков ускоренных частиц, поступающих на экспериментальные установки, является увеличение количества циклов ускорения в единицу времени.

Повышение частоты циклов ускорения позволит существенно уменьшить причины возникновения нестабильностей интенсивности ускоренного пучка, связанных с колебаниями частоты промышленной сети.

Кроме того, перевод синхротрона на частоту циклов ускорения 62,5 Гц обеспечит более высокие темпы ускорения, повысит устойчивость движения частиц в синхротроне, создаст благоприятные условия при медленном выводе ускоренных частиц, и, вследствие увеличения среднего тока до 1 мкА, приведет к сокращению времени, необходимого для проведения физического эксперимента. В результате эффективность использования синхротрона повысится на 33%, что составляет 1485 ч полезного пучкового времени при годовой норме 4500 ч.

Сначала рассмотрим изменение основных параметров, определяющих цикл ускорения.

Интенсивность электронного пучка — число ускоренных электронов в секунду — есть результат умножения количества электронов

в цикле на частоту повторения циклов, поэтому на частоте 62,5 Гц, как отмечалось выше, интенсивность ускоренного луча возрастет на 33% и составит  $6 \cdot 10^{12}$  электронов/с.

Как известно, магнитное поле синхротрона складывается из постоянной  $H =$  и переменной  $H \sim$  составляющих, причем момент инжекции выбирается в начале возрастающего участка отрицательного полупериода переменной составляющей. Таким образом, для результирующего магнитного поля получаем следующее выражение:

$$H_t = H_+ - \hat{H}_\sim \cos \omega t, \quad (1)$$

которое при равенстве  $H_+ = \hat{H}_\sim$  переходит в известную формулу [1]

$$H_t = \frac{H_m}{2} (1 - \cos \omega t),$$

где  $H_m = H_+ + \hat{H}_\sim$  - максимальное значение магнитного поля, определяется из выражения [1]:

$$E_m = 300 H_m \rho. \quad (2)$$

$E_m$  - максимальная энергия электронов в (эВ),

$\rho$  - радиус кривизны орбиты в (см),

$\omega = 2\pi f$  - циклическая частота.

Из формулы (2), с учетом энергии инжектируемых частиц  $E_i = 50$  МэВ, получаем величину напряженности магнитного поля в момент инжекции  $H_i = 66 \text{ э} (B_i = 0,0066 \text{ Т})$ . В результате многочисленных экспериментов на ереванском синхротроне была определена оптимальная величина темпа нарастания магнитного поля в момент инжекции  $\dot{H}_i = 0,3 \cdot 10^6 \text{ э/с}$  [2]. Это значение определяется условием согласования параметров инжектируемого луча и ускоряющей системы. Значения  $H_i$  и  $\dot{H}_i$  позволяют определить

момент инжекции  $t_i$  :

$$\cos \omega t_1 = \frac{\omega^2 (H_t - H_m)^2 - \dot{H}_t^2}{\omega^2 (H_t - H_m)^2 + \dot{H}_t^2}$$

и коэффициент  $K = \frac{H_{\sim}}{H_{\sim}} = \frac{J_{\sim}}{J_{\sim}}$  , показывающий отношение постоянной и переменной составляющих тока питания электромагнитов:

$$K = \frac{\omega^2 (H_m^2 - H_i^2) - \dot{H}_i^2}{\omega^2 (H_m - H_i)^2 + \dot{H}_i^2} .$$

После определения значения  $K$  можно рассчитать все временные параметры цикла ускорения:

момент инжекции  $t_i$

$$t_i = \frac{1}{\omega} \arccos \left( K - \frac{H_i}{H_{\sim}} \right) ,$$

промежуток времени, в течение которого скорость роста магнитного поля достигает своего максимального значения -  $t_{\dot{H}_m}$

$$t_{\dot{H}_m} = \frac{1}{\omega} \arcsin 1 = \frac{\pi}{2\omega}$$

промежуток времени, в течение которого магнитное поле достигает своего максимума -  $t_{H_m}$

$$t_{H_m} = \frac{\pi}{\omega} ,$$

промежуток времени, в течение которого магнитное поле возрастает от  $H_{\min}$  до 0, -  $t_{H=0}$

$$t_{H=0} = \frac{1}{\omega} \arccos K .$$

В табл. I приведены расчетные значения  $K$  и временных параметров в (мс), определяющих цикл ускорения при двух значениях частоты

$f = 47$  Гц и  $f = 62,5$  Гц и максимальной энергии электронов  
 $E_m = 6$  ГэВ,  $E_m = 4,5$  ГэВ.

Таблица I

f (Гц)	$t_{Hm}$ (мс)	$t_{Hm}$ (мс)	$t_{H=0}$ (мс)		$t_i$ (мс)		K	
			$E_m=6$ ГэВ	$E_m=4,5$ ГэВ	$E_m=6$ ГэВ	$E_m=4,5$ ГэВ	$E_m=6$ ГэВ	$E_m=4,5$ ГэВ
47	5,319	10,638	0,614	0,915	0,871	1,16	0,9836	0,9637
62,5	4	8	0,165	0,381	0,494	0,658	0,9979	0,9888

1. Из табл. I видно, что изменения интервала времени от нулевого значения магнитного поля до момента инжекции при заданном значении роста магнитного поля в момент инжекции не существенны, исходя из чего можно отметить, что условия инжекции при переходе на повышенную частоту повторения циклов ускорения остаются почти неизменными.

2. Если учесть, что стабилизация магнитного поля синхротрона осуществляется путем удержания интервала времени между значениями магнитного поля при спаде и подъеме, то необходимо отметить, что хотя этот интервал, согласно данным табл. I, в несколько раз уменьшается, однако имеется возможность при незначительных переделках в функциональных блоках системы осуществить стабилизацию таких коротких интервалов времени с предусмотренной точностью.

В табл. 2 и на рис. I и 2 приведены рассчитанные значения  $E_t$ ,  $H_t$  и  $\dot{H}_t$  по всему циклу ускорения, включая время вывода пучка при указанных выше значениях частоты и максимальной энергии

электронов. длительность вывода выбрана так, чтобы сохранить существующее значение энергетического разброса  $\Delta E/E$ , возникающего из-за протяженности времени вывода.

Таблица 2

$$f = 62,5 \text{ Гц}$$

t (мс)	$E_m = 6 \text{ ГэВ}$			$E_m = 4,5 \text{ ГэВ}$		
	$E_t(\text{ГэВ})$	$N_t(\text{э})$	$\dot{N}_t(\text{э/с}) \cdot 10^5$	$E_t(\text{ГэВ})$	$N_t(\text{э})$	$\dot{N}_t(\text{э/с}) \cdot 10^5$
инж.	0,05	66	3	0,05	66	3
1	0,222	293,5	5,958	0,147	193,9	4,488
1,5	0,5	659,9	8,65	0,356	469,9	6,516
2	0,873	1153	11,01	0,637	841,4	8,294
2,5	1,328	1754	12,946	0,98	1294	9,753
3	1,847	2439	14,385	1,37	1810	10,837
3,5	2,411	3183	15,271	1,796	2371	11,504
4	2,996	3956	15,57	2,237	2953	11,729
4,5	3,582	4730	15,271	2,678	3536	11,504
5	4,146	5474	14,385	3,103	4097	10,837
5,5	4,665	6159	12,946	3,494	4613	9,753
6	5,12	6760	11,01	3,837	5066	8,294

Таблица 2 (продолжение)

6,5	5,493	7253	8,65	4,118	5437	6,516
7	5,771	7620	5,958	4,327	5713	4,488
7,5	5,942	7845	3,037	4,456	5883	2,288
8	6	7921	0	4,5	5940	0
8,5	5,942	7845		4,456	5883	
8,75	5,87	7751		4,402	5812	

$$f = 47 \text{ Гц}$$

t (мс)	$E_m = 6 \text{ ГэВ}$			$E_m = 4,5 \text{ ГэВ}$		
	$E_t(\text{ГэВ})$	$H_t(\theta)$	$\dot{H}_t(\theta/c) \cdot 10^5$	$E_t(\text{эВ})$	$H_t(\theta)$	$\dot{H}_t(\theta/c) \cdot 10^5$
НКК.	0,05	66	3	0,05	66	3
I	0,081	107,4	3,432	-	-	-
I,5	0,242	320	5,054	0,138	182	3,829
2	0,463	611	6,566	0,305	403	4,974
2,5	0,738	974	7,936	0,513	678	6,011
3	1,06	1401	9,133	0,739	1008	6,92

Таблица 2 (продолжение)

3,5	1,43	1884	10,13	1,035	1367	7,67
4	1,83	2411	10,908	1,34	1766	8,263
4,5	2,25	2871	11,448	1,66	2190	8,762
5	2,69	3552	11,739	1,99	2630	8,893
5,319	2,97	3927	11,792	2,21	2915	8,993
5,5	3,14	4141	11,775	2,33	3077	8,92
6	3,58	4725	11,554	2,66	3519	8,753
6,5	4	5284	11,082	3	3949	8,395
7	4,41	5829	10,368	3,3	4356	7,854
7,5	4,79	6325	9,429	3,58	4731	7,143
8	5,13	6769	8,285	3,84	5067	6,276
8,5	5,41	7150	6,961	4,06	5357	5,273
9	5,65	7462	5,485	4,24	5593	4,155
9,5	5,83	7697	3,889	4,37	5771	2,946
10	5,94	7850	2,209	4,46	5887	1,673

Таблица 2 (продолжение)

10,5	5,99	7917	0,481	4,49	5938	0,364
10,6382	6	7921	0	4,5	5940	0
II	5,98	7898		4,49	5923	
II,5	5,9	7792		4,42	5843	
II,6382	5,87	7748		4,4	5809	

Из рис.1 видно, что максимальные значения энергии и напряженности магнитного поля не изменяются. Однако максимальное значение темпа нарастания магнитного поля на частоте 62,5 Гц на 30% больше, чем на частоте 47 Гц (рис.2). Рассмотрим возможность такого увеличения в магнитной системе. Магниты синхротрона были изготовлены в расчете на ускорение электронов до максимальной энергии 7,5 ГэВ [3]. Соответствующее этой энергии значение максимума темпа нарастания магнитного поля, равное  $1,5 \cdot 10^6$  эВ/с, совпадает с расчетным значением  $\dot{H}_m = 1,5 \cdot 10^6$  эВ/с для энергии 6 ГэВ и частоты 62,5 Гц.

Магнитное поле с темпом нарастания  $\dot{H}_m = 1,5 \cdot 10^6$  эВ/с может удержать на орбите пучок с темпом ускорения

$$\dot{E} = 300 \dot{H}_p \approx 10^{12} \text{ эВ/с} \approx 10^6 \cdot 7 \cdot 10^{-7} \text{ МэВ/сб} = 0,7 \text{ МэВ/сб}$$

С учетом того, что производная магнитного поля достигает максимума на 4-й мс, т.е. при  $E = 3$  ГэВ, можно подсчитать потери на синхротронное излучение по формуле [1]:

$$\Delta E_{\text{изл.}} = \frac{88,5 \cdot E^4}{\rho} = \frac{88,5 \cdot 81}{25,25} = 284 \text{ кэВ/об} \approx 0,3 \text{ МэВ/об}$$

т.е. для создания требуемого расчетом значения темпа нарастания магнитного поля достаточно иметь полный прирост энергии в ускоряющей системе порядка 1 МэВ/оборот, что значительно меньше величины 4,5 МэВ/оборот, соответствующей потерям на синхротронное излучение в существующей системе при максимальной энергии электронов 6 ГэВ.

### Ускоряющая система

Характеристикой ускоряющей системы служит модуляционная кривая, определяющая зависимость амплитуды ВЧ ускоряющего напряжения  $V_0$  от времени  $t$  в процессе ускорения.

В известное выражение модуляционной кривой ереванского синхротрона частота повторения циклов включается в качестве постоянной, поэтому определим здесь модуляционную кривую, выведя ее зависимость от этой частоты.

Используем формулу [4] :

$$eV_0 \cos \varphi_0 = \frac{2\pi R}{c} [\dot{E} + \Delta E_{\text{изл.}}] = \frac{2\pi R}{c} \dot{E} + \frac{2\pi R}{c} \Delta E_{\text{изл.}}, \quad (3)$$

где I-й член

$$\dot{E} = \frac{d \left[ \frac{E_m}{2} (1 - \cos \omega t) \right]}{dt} = \frac{\omega E_m}{2} \sin \omega t$$

- показывает прирост энергии электронов,

$R = 34,49$  м - средний радиус синхротрона,

$\varphi_0 = 45^\circ$  - угол равновесной фазы,

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона,

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света в вакууме,

а второй член определяет энергетические потери электрона на излучение за один оборот, которые по [1] равны:

$$\frac{2\pi R}{c} \Delta E_{\text{изл.}} (\text{кэВ}) = \frac{88,5 \cdot E^4 (\text{ГэВ})}{\rho (\text{м})},$$

Подставляя известные величины в (3) и приводя к одной системе единиц, получим модуляционную кривую

$$V_0(t) = 3210 \cdot f \cdot E_m \sin \omega t + 310 E_m^4 (1 - \cos \omega t)^4, \quad (4)$$

в которой первое слагаемое определяет величину амплитуды напряжения, необходимого для ускорения, а второе - для компенсации потерь на синхротронное излучение. На рис.3 показаны модуляционные кривые, расчет которых произведен на ЭМ ЕС1010. Показано, что максимум модуляционной кривой опережает максимум кривой, описывающей изменение энергии пучка во времени, что связано с падением темпа ускорения к концу цикла. Это опережение различно в каждом конкретном случае и зависит от соотношения величин  $f$  и  $E_m$ . Максимальное значение амплитуды напряжения  $V_m$  определяется только вторым слагаемым и потому не зависит от  $f$ . Значения  $V_m$  для двух значений  $f$  и  $E_m$  приведены в табл.3.

ВЧ-мощность, подводимая к резонатору в течение цикла ускорения, определяется [5] как сумма потерь в стенках резонатора и мощности, потребляемой пучком,  $P_{\Sigma}$ .

$$P_{\text{вч}} = P_R + P_J, \quad P_R = \frac{V_0^2(t)}{2R_{\text{ш}}N}, \quad P_J = J_n V_0(t),$$

где  $J_n = \frac{enC}{2\pi R} = 22 \text{ мА}$  - импульсный ток пучка ереванского синхротрона,

$n = 10^{11}$  - число частиц на орбите,

$R_{\text{ш}} = 3 \text{ МОм}$  - шунтовое сопротивление настроенного резонатора

$N = 20$  - число резонаторов.

$$P_m = \frac{V_m^2}{2R_{\text{ш}}N} + J_n V_m.$$

Максимальные значения ВЧ-мощности  $P_m$ , определяющиеся максимальными значениями  $V_m$  и потому не зависящие от  $f$ , приведены в табл.3. Средние значения вычислим по формулам:

$$\bar{P} = f \int_{t_i}^{t_3} P(t) dt,$$

где  $t_3$  - момент окончания вывода.

Принимая  $t_i = 0$  и подставляя известные параметры получим:

$$\begin{aligned} \bar{P}_J &= J_n f \int_0^{t_3} V_0(t) dt = 3210 J_n f^2 E_m \int_0^{t_3} \sin \omega t dt + \\ &+ 310 \cdot 16 J_n f E_m^4 \int_0^{t_3} \sin^8 \frac{\omega t}{2} dt - \frac{3210}{2\pi} f J_n E_m \cdot \\ &\cdot (1 - \cos \omega t_3) + \frac{310}{2\pi} 16 J_n E_m^4 (0,2734 \omega t_3 - 0,4375 \sin \omega t_3 + \\ &+ 0,1094 \sin 2\omega t_3 - 0,0208 \sin 3\omega t_3 + 0,002 \sin \omega t_3). \end{aligned}$$

Аналогично вычислим  $\bar{P}_R$  :

$$\begin{aligned}
\bar{P}_R &= \frac{f}{2R_{\omega N}} \int_0^{t_3} V_0^2(t) dt = \frac{f}{2R_{\omega N}} \int_0^{t_3} [3210^2 f^2 E_m^2 \sin^2 \omega t + \\
&+ 3210 \cdot 310 \cdot 2f E_m^5 \sin \omega t \cdot (1 - \cos \omega t)^4 + 310 E_m^8 (1 - \cos \omega t)^8] dt = \\
&= \frac{3210^2 f^3 E_m^2}{2R_{\omega N}} \int_0^{t_3} \sin^2 \omega t dt + \frac{16 \cdot 3210 \cdot 310}{2\pi R_{\omega N}} f E_m^5 \sin^2 \frac{\omega t_3}{2} + \\
&+ \frac{64 \cdot 310}{\pi R_{\omega N}} \int_0^{\omega t_3} \sin^2 \frac{\omega t}{2} d\omega t = \frac{3210 f^3 E_m^2}{4\pi R_{\omega N}} t_3 - \frac{3210^2 f^2 E_m^2}{16\pi R_{\omega N}} \sin 2\omega t_3 + \\
&+ f \frac{496 \cdot 3210}{2\pi R_{\omega N}} E_m^5 \sin^2 \frac{\omega t_3}{2} + \frac{64 \cdot 310^2 E_m^8}{\pi R_{\omega N}} (0,1964\omega t_3 - 0,3491 \cdot \\
&\cdot \sin \omega t_3 + 0,1222 \sin 2\omega t_3 - 0,0444 \sin 3\omega t_3 + 0,0139 \sin 4\omega t_3 - \\
&- 0,0034 \sin 5\omega t_3 + 0,0061 \sin 6\omega t_3 - 7 \cdot 10^{-5} \sin 7\omega t_3 + 4 \cdot 10^{-6} \sin 8\omega t_3).
\end{aligned}$$

Вычисленные значения  $\bar{P}_{вч}$ ,  $\bar{P}_g$  и  $\bar{P}_R$  приведены в табл.3

Мощность синхротронного излучения можно вычислить также с помощью модуляционной кривой, учитывая только второе слагаемое, описывающее потери на излучение

$$V_{cu}(t) \cos \varphi_0 = 310 E_m^4 (1 - \cos \omega t)^4.$$

Мощность СИ определим аналогично мощности ВЧ, учитывая только полезные потери.

$$P_{cu} = J_n V_{cu}(t) \cos \varphi_0.$$

$$\bar{P}_{cu} = f \int_0^{t_3} P_{cu}(t) dt = J_n f \cos \varphi_0 \int_0^{t_3} V_{cu}(t) dt =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{310 \cdot 16}{2\pi} J_n E_m^4 \cos \varphi_0 \int_0^{\omega t_3} \sin^8 \frac{\omega t}{2} d\omega t = \\
 &= \frac{310 \cdot 16}{2\pi} J_n E_m^4 \cos \varphi_0 (0,2734 \omega t_3 - 0,4375 \sin \omega t_3 + \\
 &+ 0,1094 \sin 2\omega t_3 - 0,0208 \sin 3\omega t_3 + 0,002 \sin 4\omega t_3).
 \end{aligned}$$

Значения  $\bar{P}_{cu}$  приведены в табл.3

Таблица 3

(ГэВ)	$V_m$ (кВ)	$P_{in}$ (кВт)	$P_{out}$ (кВт)	$P_m$ (кВт)	$f$ (Гц)	$\bar{P}_{cu}$ (кВт)	$\bar{P}_J$ (кВт)	$\bar{P}_R$ (кВт)	$\bar{P}_{cu}$ (кВт)
6	321	343,5	137,3	480,1	62,5	75,145	25,773	49,372	18,2
					47	75,184	25,786	49,398	18,2
4,5	102	34,5	35,2	69,8	62,5	13,1	8,155	4,944	5,8
					47	13,105	8,159	4,946	5,8

Из табл.3 видно, что расход ВЧ-мощности и мощности синхротронного излучения не изменяются при сохранении значения  $\Delta E/E$  энергетического разброса, возникающего из-за протяженности времени вывода.

Для увеличения мощности синхротронного излучения можно увеличить длительность ускорительного цикла на частоте 62,5 Гц так, чтобы сохранить неизменным время вывода на обеих частотах. В этом случае мощность синхротронного излучения возрастает на 37%, также увеличивается расход ВЧ-мощности. При этом энергетический

разброс пучка в конце ускорительного цикла достигает 4%.

Рассмотрим параметры системы питания электромагнита.

Активные потери мощности в системе питания электромагнита по переменному току складываются из потерь в активной стали и потерь в медной обмотке. Потери в меди не зависят от частоты питания и вычисляются по формуле

$$P_M = J^2 R.$$

В стали мощность теряется на гистерезис и токи Фуко

$$P_c = P_r + P_\phi,$$

где

$$P_r = \sigma_r G \frac{f}{100} \left[ 0,4 \frac{B_m}{10^4} + 2,6 \left( \frac{B_m}{10^4} \right)^2 \right].$$

$$P_\phi = \sigma_\phi G \left( \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10^4} \right)^2.$$

$\sigma_r, \sigma_\phi$  - коэффициенты, зависящие от сорта стали и конфигурации магнита,

$G$  - вес стали,

$B_m$  - максимальное значение магнитной индукции в зазоре магнита.

Используя характеристики, приведенные в работе [3] для  $f = 50$  Гц, можно оценить значения коэффициентов  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\phi$  и вычислить потери мощности в стали по формуле:

$$P_c = G \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10^4} \left[ \sigma_r \left( 0,4 + 2,6 \frac{B}{10^4} \right) + \sigma_\phi \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10^4} \right].$$

Результаты вычислений приведены в табл.4.

Перейдем к рассмотрению параметров резонансного контура.

Величина электромагнитной энергии, накапливаемая электромагнитом в конце цикла ускорения  $E_M$ , определяет параметры систе-

мы питания. коэффициент самоиндукции магнита по [1] равен:

$$L = 2E_M / J^2,$$

где  $J = J_0 + \hat{J}_m$  - максимальное значение полного тока.

При резонансной частоте  $f$ , емкость конденсаторной батареи есть

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

Поскольку батарея состоит из 16 последовательно соединенных групп конденсаторов, то емкость каждой ячейки равна

$$C_a = 16C.$$

Индуктивность реактора  $L_p$  на одну ячейку определяет величину  $J_p$  переменного тока, протекающего через цепь реакторов:

$$J_p = \frac{\hat{U}}{\omega L_p},$$

где  $\hat{U} = \omega L_b J_m$  - амплитудное напряжение на ячейке резонансного контура,

$L_b$  - индуктивность блоков на одну ячейку.

Полная емкость батареи составит

$$C_b = \frac{16}{\omega^2 L} + \frac{1}{\omega^2 L_p}.$$

Полная энергия, накапливаемая в конденсаторной батарее, равна

$$E_k = 16 \frac{\hat{U}^2 C_b}{2} = 8 \frac{\omega^2 L_b^2 J_m^2}{\omega^2} \left( \frac{16}{L} + \frac{1}{L_p} \right),$$

где  $L$  - коэффициент самоиндукции магнита.

Полная реактивная мощность резонансного контура  $W$  вычисляется по формуле:

$$W = E_k \omega.$$

Добротность контура равна

$$Q = \frac{W}{P_{\text{акт.}}}$$

где  $P_{\text{акт.}}$  - величина активных потерь в резонансном контуре, не зависящая от частоты питания.

Результаты вычислений  $E_k$ ,  $C_\delta$ ,  $W$ ,  $Q$  приведены в табл.4.

Мощность потерь в диэлектрике конденсатора рассчитывается по формуле:

$$P_k = \omega U_c^2 C \operatorname{tg} \delta,$$

где  $U_c$  - действующее значение напряжения на конденсаторе,

$C$  - емкость конденсатора,

$\operatorname{tg} \delta$  - тангенс угла потерь, зависящий от материала диэлектрика.

Результаты расчета с использованием номинальных данных конденсаторов типа КЛМ-I-50-I приведены в табл.4.

При подсчете расхода постоянного тока подмагничивания необходимо учесть, что полезная работа совершается только в интервале времени от момента инжекции до момента эжекции в каждом цикле ускорения.

$$A = J_{\text{э}}^2 \cdot R \frac{N}{f}, \quad A_{\text{пол.}} = J_{\text{э}}^2 R N (t_3 - t_1),$$

где  $R$  - сопротивление блока электромагнита,

$N$  - число блоков.

Подсчитаем коэффициент полезного действия при использовании постоянного тока:

$$\eta_{\text{п.}} = \frac{A_{\text{пол.}} \cdot 100\%}{A} (t_3 - t_1) \cdot f.$$

Результаты приведены в табл.4.

Таблица 4

$E_m$ (ГэВ)	$E_m$ (кэВ)	$f$ (Гц)	$E_k$ (кэВ)	$J_0$ (А)	$J_{\sim}$ (А)	$U$ (В)	$P_c$ (кВт)	$W$ (кВт)	$Q$	$P_k$ (Вт)	$C_6$ (мкс)	$\eta =$ %
6	710	62,5	230	1215	1215	7157	486	90435	60	51	562	51
		47	235	1202	1228	5440	344	69470	46	32	994	50
4,5	400	62,5	131	916	906	5396	285	51401	70	41	562	50
		47	135	931	891	4124	202	39930	55	18	994	49

Из таблицы видно, что при сохранении величины электромагнитной энергии, накапливаемой в магните, а значит и полного тока, энергия  $E_k$ , накапливаемая в конденсаторной батарее, уменьшается на 2-3% при повышении частоты повторения циклов до 62,5 Гц, что связано с различным соотношением величин постоянного  $J_0$  и переменного  $J_{\sim}$  токов.

При увеличении частоты  $f$  величина полной реактивной мощности  $W$  возрастает на 30%, а мощность активных потерь в стали  $P_c$  на 41%. С учетом того факта, что блоки электромагнита и резонансный контур построены с расчетом на максимальную энергию электронов в 7,5 ГэВ [3], можно показать, что указанное выше увеличение мощности возможно в существующей системе. Так,  $P_c$  при максимальной энергии электронов  $E_m = 7,5$  ГэВ и частоте повторения циклов  $f = 47$  Гц составляет 523 кВт, что значительно больше требуемой расчетом величины в 486 кВт при  $E_m = 6$  ГэВ и  $f = 62,5$  Гц. Реактивная мощность резонансного контура  $W$  пропорциональна квадрату максимальной энергии электронов, значит при  $E_m = 7,5$  ГэВ она будет больше  $10^5$  кВт, что превышает расчетное значение 90435 кВт.

Потери в диэлектрике конденсатора  $P_k$  не превышают паспортных данных на используемые конденсаторы. При увеличении потерь в отдельных конденсаторах, общие потери в батарее значительно уменьшаются, так как при повышении частоты емкость конденсаторной батареи уменьшается на 56%, что сильно сокращает число конденсаторов, тем самым повышая надежность работы батареи и уменьшая ее стоимость.

Резюмируя полученные результаты, можно сказать, что при повышении частоты повторения циклов ускорения до 62,5 Гц средний

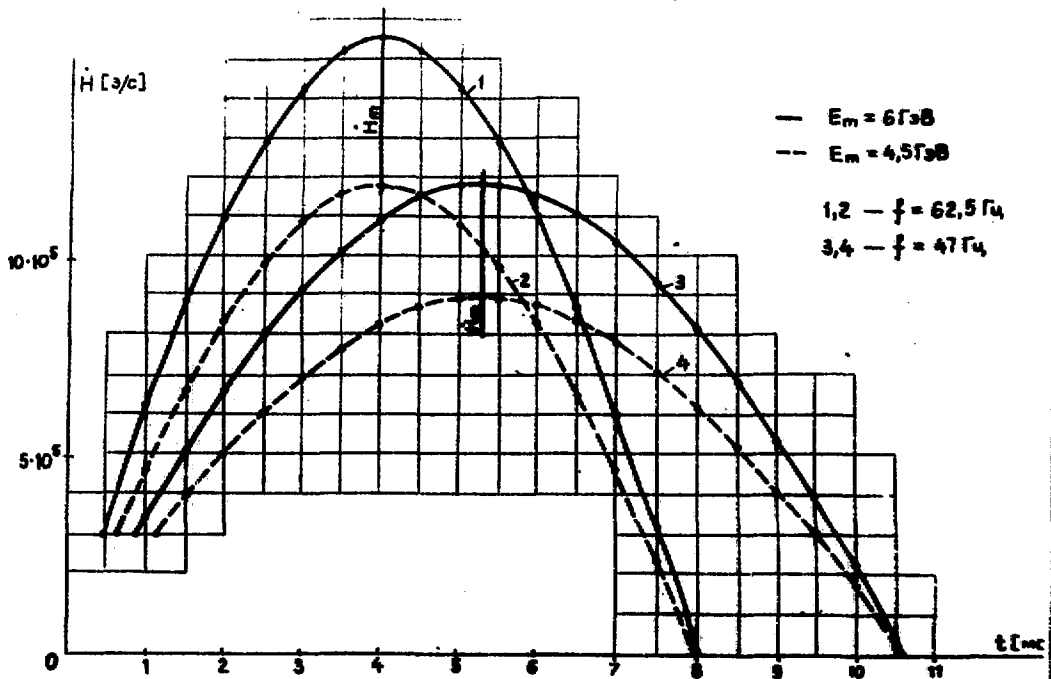
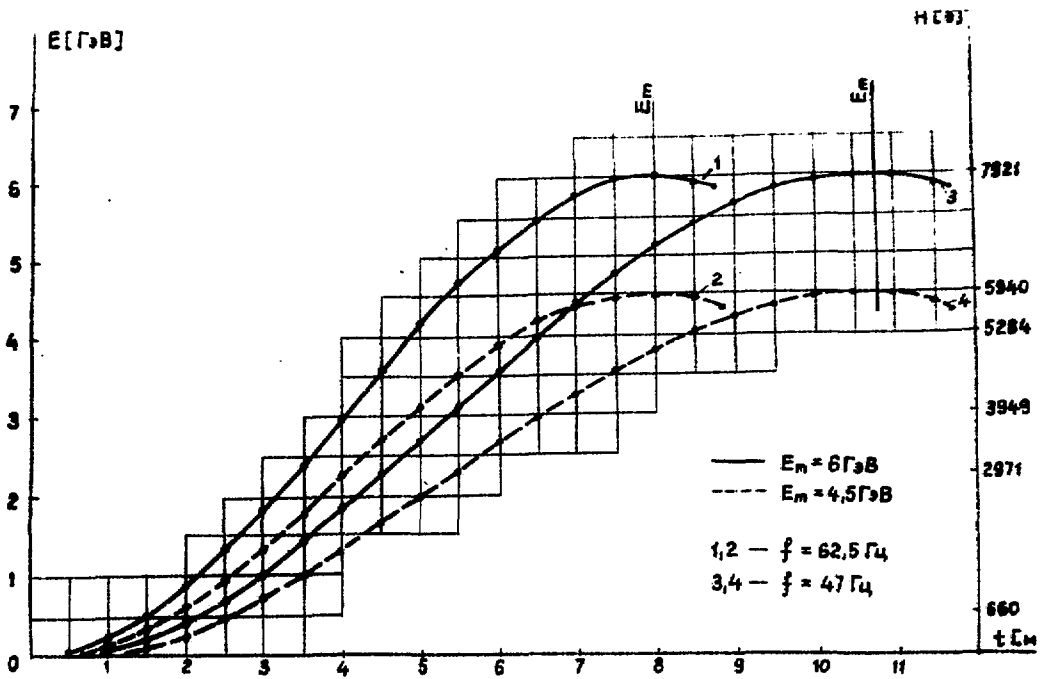
ток ускоренного пучка возрастает на 33% без существенных переделок в ускоряющей и магнитной системах синхротрона.

В заключение отметим, что переход на частоту повторения 62,5 Гц является первым этапом перевода синхротрона в режим работы с "плоской вершиной" при длительности вершины в 4 нс.

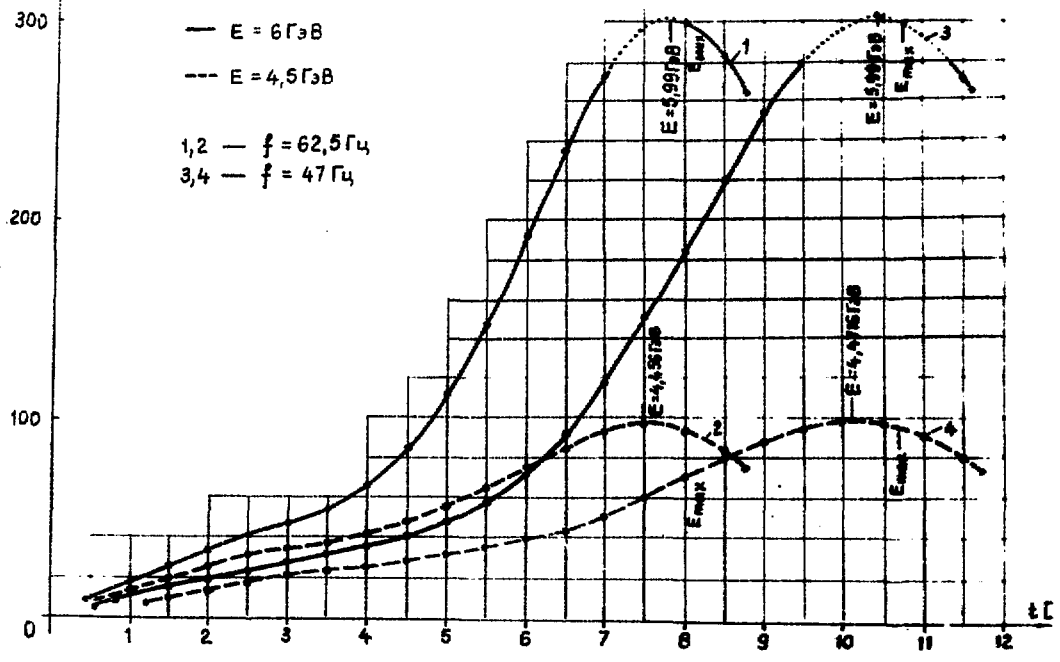
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комар Е.Г. Ускорители заряженных частиц, М.: Атомиздат, 1964
2. Барышев А.И. Вопросы взаимодействия пучка с ускоряющей системой. Автореферат дис. на соиск.учен.степени канд.тех.наук, Ереван, 1971.
3. Дьяченко К.К., Комар Е.Г., Малышев И.Ф. и др. Особенности конструкции и основные характеристики электромагнита ереванского синхротрона. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М.: Атомиздат, 1970, т. I, с. 195-199.
4. Хейфец С.А. Электронный синхротрон, изд-во АН АрмССР, Ереван, 1963
5. Барышев А.И., Мартirosян Г.А., Никогосян В.Ц., Садоян К.А. Особенности работы системы питания электронного синхротрона в режиме с плоской вершиной магнитного поля. Препринт БФН-712(27)-84, Ереван, 1984.

Рукопись поступила 3 июля 1986 г.



$V_c$  [кВ]



**Г. А. МАРТИРОСЯН, В. Ц. НИКОГОСЯН, С. Н. ОГАНЕСЯН,**

**А. А. ПЕТРОВА, К. А. САДОН**

**РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ЕРЕВАНСКОГО СИНКРОТРОНА  
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЦИКЛАХ УСКОРЕНИЯ**

**Редактор Л. П. Мукаян**

**Технический редактор А. С. Абрамян**

---

**Подписано в печать 14/Х-86г.**

**ВВ-05702 Формат 60x84/16**

**Офсетная печать. Уч. изд. л. 1,0**

**Тираж 299 экз. Ц. 15 к.**

**Зак. тип. 560**

**Издано 3624**

---

**Отпечатано в Ереванском физическом институте**

**Ереван 36, Маршарша 2**

**ИНДЕКС 3824**



**EPANOGON**