

С 345 е 5

7/11.69

Б-447

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 4358



Л.Н.Беляев А.А.Смирнов, Н.И.Павлов

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ВЫБОР СХЕМЫ  
И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ДУБНЕНСКОГО СИНХРОФАЗОТРОНА

1969

9 - 4358

Л.Н.Беляев А.А.Смирнов, Н.И.Павлов

ВЫБОР СХЕМЫ  
И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ДУБНЕНСКОГО СИНХРОФАЗОТРОНА

7862/2  
14

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Эффективное использование в целом ряде физических экспериментов ускоренных пучков протонов большой интенсивности требует медленного, в течение  $400 + 500$  мсек., наведения пучка на мишень с помощью изменяющегося магнитного поля при выключенном ускоряющем высокочастотном напряжении.

При естественном сворачивании пучка скорость изменения магнитного поля равна  $3550$  э/сек., а время взаимодействия пучка с мишенью —  $4$  мсек. Для растянутого вывода необходимо снизить эту скорость до  $30 + 40$  э/сек. Из-за наличия в питающем напряжении и соответственно в поле магнита ускорителя больших пульсаций, вторичные пучки при этом имеют 100-процентную глубину модуляции. Аналогичная проблема возникает и при осуществлении равномерного медленного вывода ускоренных протонов из камеры ускорителя. Для успешного решения этих задач необходимо иметь:

1. "Стол" в кривой главного тока, т.е. такой режим работы системы электропитания магнита, при котором в течение необходимого времени скорость изменения напряженности магнитного поля будет иметь величину порядка  $30 + 35$  э/сек.

2. Подавление пульсаций поля в этом режиме.

3. Стабилизацию радиального положения пучка в камере ускорителя.

Режим "стола" в кривой главного тока на синхрофазотроне уже много лет широко применяется для проведения физических экспериментов. В электротехническом отделе ЛВЭ ОИЯИ был разработан проект системы подавления пульсаций поля и в конце 1968 года закончен монтаж этого устройства.

В данной работе приводится методика расчета основных параметров системы подавления пульсаций магнитного поля дубненского синхрофазотрона.

*Исходные данные для проектирования системы  
подавления пульсаций*

1. Параметры ускорителя.

Напряженность магнитного поля в зазоре в конце ускорения  $H = 12800$  э.

Скорость изменения напряженности в конце ускорения  $\dot{H} = 3550$  э/сек.

Показатель спада поля в конце ускорения  $n = 0,67$ .

Радиус мишени -  $R = 28 - 0,5 = 27,5$  м.

Напряжение на обмотке магнита -  $U_{\text{макс.}} = 10$  кв.

Максимальный ток в обмотке -  $I = 12$  ка.

Сопrotивление обмотки магнита -  $r = 0,1$  ом.

Ширина пучка в конце ускорения -  $2h = 26$  см.

2. Требования, выдвигаемые физическим экспериментом.

Длительность вывода пучка -  $\Delta t = 0,5$  сек.

Глубина модуляций интенсивности пучка в процессе вывода -  $\pm 10\%$ .

Вывод осуществляется путем наведения пучка на мишень медленно изменяющимся магнитным полем при выключенном высокочастотном поле.

*Выбор схемы подавления пульсаций*

Опыт подавления пульсаций магнитного поля в ускорителях /1/ показывает, что схемы с использованием компенсационных обмоток, охватывающих все поле машины, могут обеспечить коэффициент подавления не более 10.

Более сильное подавление пульсаций поля может быть получено лишь путем подавления пульсаций в напряжении, приложенном к обмотке магнита. Недостатком такой схемы является необходимость иметь дорогостоящие реактивные катушки, способные пропускать полный ток обмотки ускорителя.

Если учесть, что требуемый коэффициент подавления пульсаций в рассматриваемом случае равен  $\approx 100$  (см. ниже), а обмотка имеющегося магнита М-6А может быть использована как реактивность, включенная в цепь главного тока, то целесообразно выбор схемы подавления пульсаций остановить на обычном фильтре (см. рис. 1а), в котором предварительно заряженная емкость С подключается тиратронами Т в режиме "стола" тока.

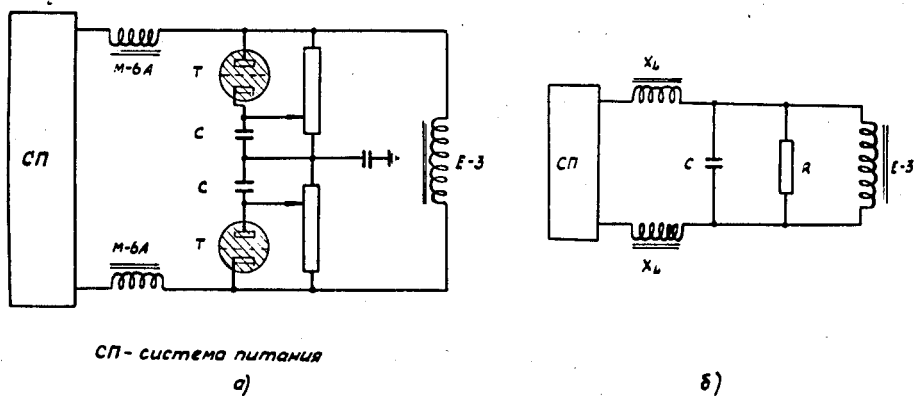


Рис. 1.

*Расчет среднего значения выпрямленного  
напряжения и допустимой величины его пульсаций*

Из теории ускорителей известно, что длительность  $\Delta t$  сворачивания пучка на мишень (длительность вывода пучка) определяется отношением полуширины  $h$  пучка в конце ускорения к скорости  $a$  сворачивания пучка:

$$\Delta t = \frac{h}{a}, \quad (1)$$

где

$$a = \frac{R \cdot \dot{H}}{(1-n)H}. \quad (2)$$

По данным электротехники

$$U = E - I r \quad (3)$$

$$E = - \frac{d\psi}{dt} \quad (4)$$

$$B = \mu H \quad (5)$$

Из уравнений (1-5) следует, что среднее значение  $\frac{dB}{dt}$  за время вывода должно иметь величину:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{B_{\text{макс.}} a(1-n)}{R} = \frac{12800 \frac{26}{2.0,5} (1-0,67)}{2750} = 40,5 \text{ гс/сек.}$$

Если учесть, что

$$\frac{\frac{dB}{dt}}{E} = \frac{\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{макс.}}}{E_{\text{макс.}}}, \quad (6)$$

то э.д.с. на обмотке магнита, при которой обеспечиваются заданные условия вывода пучка, будет равна:

$$U = \frac{(U_{\text{макс.}} - I_r) \left( \frac{dB}{dt} \right)}{\left( \frac{dB}{dt} \right)_{\text{макс.}}} = \frac{(10000 - 12000 \cdot 0,1) 40,5}{3550} = 100 \text{ в.}$$

При этом среднее напряжение на зажимах обмотки магнита должно быть:

$$U = E + I_r = 100 + 12000 \cdot 0,1 = 1300 \text{ в.}$$

Согласно заданию, колебания интенсивности за время вывода не должны превышать  $\pm 10\%$ , отсюда колебания среднего значения  $\frac{dB}{dt}$  во время вывода не должны превышать:

$$\pm 0,1 \cdot 40,5 = \pm 4,05 \text{ гс/сек.}$$

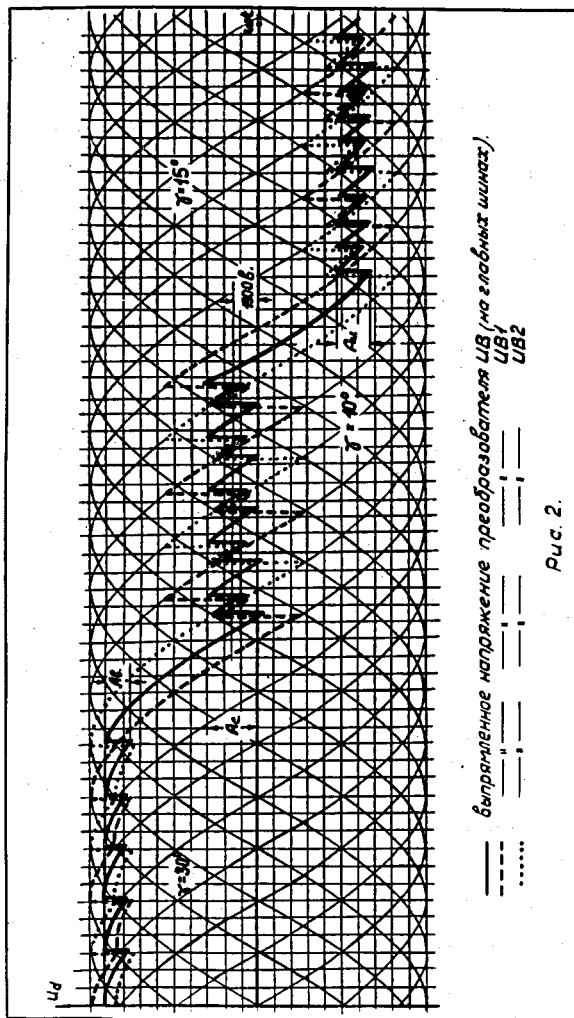
Или, учитывая (6), определяем допустимую двойную амплитуду э.д.с. обмотки магнита:

$$\Delta E = \frac{2 \cdot 4,05}{40,5} \cdot 100 = 20 \text{ в.}$$

Итак, заданные выше условия вывода пучка осуществляются, если среднее напряжение на обмотке магнита будет равно 1300 в, а колебания его относительно среднего значения не превысят  $\pm 10$  вольт.

#### *Амплитуды переменной составляющей напряжения в различных режимах*

Принцип построения системы питания электромагнита синхрофазотрона описан в соответствующей проектной документации, статьях, например, /2,3/. На рис. 2 приводится кривая напряжения на обмотке магнита в выпрямительном, инверторном режимах и режиме "стола". Кривая носит иллюстративный, теоретический характер, и позволяет приблизительно оценить величину пульсаций напряжения во всех режимах. При построении ее считалось, что напряжение генераторов равно 7,2 кв., ток в режиме "стола" (максимальный) равен 12 ка. При построении



выпрямленное напряжение преобразователя  $U_B$  (на холостых шинах),  $U_B2$

пренебрегли высшими гармоническими составляющими, искажающими теоретическую форму кривой напряжения, и влиянием угла  $\theta$ . Ниже приводятся результаты расчета величины пульсаций в сопоставлении с опытными данными, полученными из осциллограмм.

### 1. Выпрямительный режим

В выпрямительном режиме при 7,2 кв., 12 ка. угол коммутации составляет около  $30^\circ$ . Поэтому амплитуда пульсаций равна:

$$A_B = \frac{1 + \cos 30^\circ}{2} - \frac{1}{2} \left( \cos 30^\circ + \frac{1 + \cos 60^\circ}{2} \right) = 0,125$$

$$A_{B, \text{ опыт.}} \approx 0,129.$$

### 2. Инверторный режим

В инверторном режиме при 7,2 кв., 12 ка. угол коммутации составляет около  $15^\circ$ . Поэтому амплитуда пульсаций равна:

$$A_{и} = \frac{\cos 30^\circ + \cos 60^\circ}{2} - \frac{1}{2} \left( \cos 60^\circ + \frac{\cos 30^\circ + \cos 90^\circ}{2} \right) = 0,127$$

$$A_{и, \text{ опыт.}} = 0,19 + 0,31.$$

### 3. Режим "стола" в кривой главного тока.

В этом режиме при 7,2 кв., 12 ка. угол коммутации составляет около  $10^\circ$ . Поэтому амплитуда пульсаций равна:

$$A_C = \frac{\sin 35^\circ + \sin 5^\circ}{2} = 0,336$$

(7)

$$A_{C, \text{ опыт.}} = 0,31 + 0,37.$$



### Гармонический анализ пульсаций выпрямленного

напряжения на магните в режиме "стола" в кривой тока

Выпрямленное напряжение в режиме "стола" в кривой тока магнита при  $U_{сг.} = 7,2$  кв.,  $I_{макс.} = 12$  ка.,  $\gamma = 10^\circ$ , вообще говоря, имеет вид рис. 3.

Для вычисления амплитуд гармонических составляющих пульсаций напряжения целесообразно выразить эту кривую аналитически. Участки синусоид в рассматриваемом диапазоне углов с достаточной точностью могут быть заменены прямыми линиями, а именно (см. рис. 4):

в диапазоне  $0 \dots X$

$$y = a_1 - b_1 x,$$

в диапазоне  $X \dots 2\pi$

$$y = a_2 - b_2 x.$$

Как известно, амплитуда  $A_k$  и начальный угол  $\psi$  гармоники с номером  $k$  определяются выражениями:

$$A_k = \sqrt{(A_k')^2 + (A_k'')^2}, \quad \text{tg } \psi_k = \frac{A_k''}{A_k'} \quad (8)$$

где

$$A_k' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \sin kx \cdot dx,$$

$$A_k'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \cos kx \cdot dx.$$

Или, используя введенную линеаризацию и интегрируя:

$$\begin{aligned} A_k' &= \frac{1}{\pi} \int_0^X y \sin kx \cdot dx = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^X (a_1 - b_1 x) \sin kx \cdot dx + \int_X^{2\pi} (a_2 - b_2 x) \sin kx \cdot dx \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{a_2 - a_1}{k} \cos kX + \frac{b_2 - b_1}{k^2} \sin kX + \right. \\ &\quad \left. + \frac{b_1 - b_2}{k} X \cos kX + \frac{a_1 - a_2 - b_2 \cdot 2\pi}{k} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

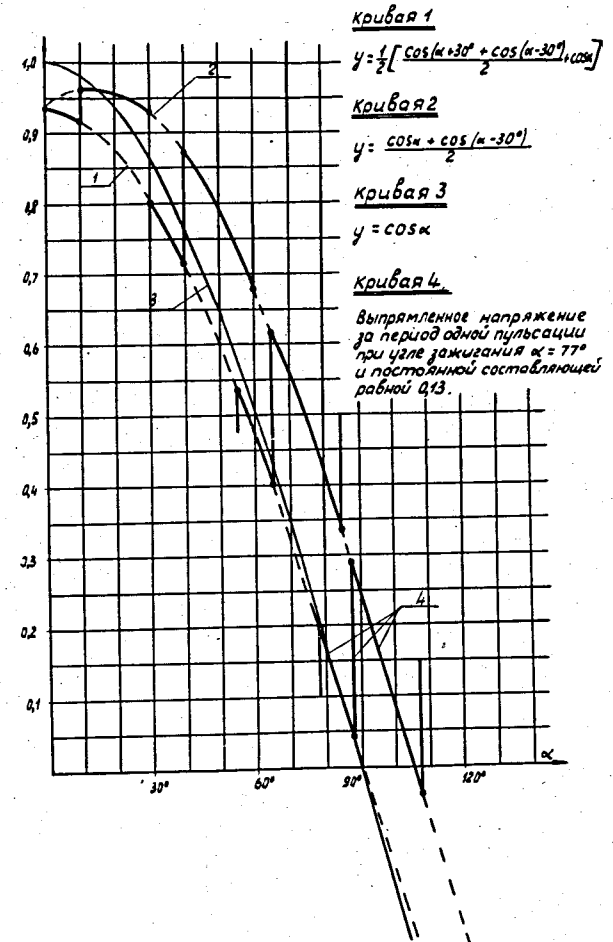


Рис. 3.

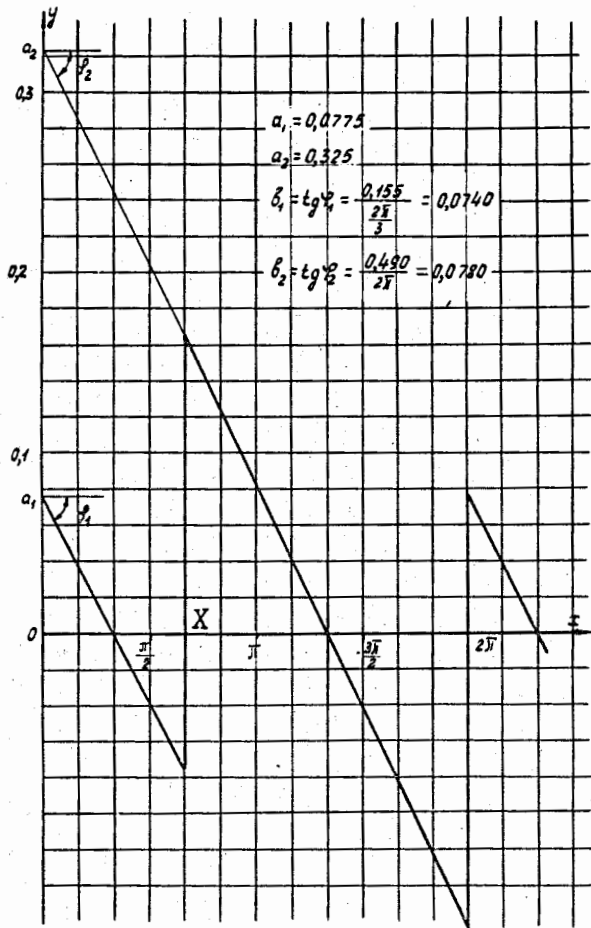


Рис. 4.

$$A_k'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \cos kx \cdot dx = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\pi} (a_1 - b_1 x) \cos kx \cdot dx + \int_{\pi}^{2\pi} (a_2 - b_2 x) \cos kx \cdot dx \right] =$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{a_1 - a_2}{k} \sin kX + \frac{b_2 - b_1}{k^2} \cos kX + \frac{b_2 - b_1}{k} X \sin kX + \frac{b_1 - b_2}{k^2} \right]. \quad (10)$$

Для определения значения коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  в относительных единицах можно воспользоваться кривыми рис. 3. Здесь кривая 1 соответствует выпрямленному напряжению (в зависимости от угла зажигания) в процессе коммутации тока с фазы на фазу. Кривая 2 — то же после завершения одной коммутации и до начала следующей. Сплошными ломаными линиями изображены четыре варианта кривой выпрямленного напряжения за период одной пульсации (30 град.эл.) для различных углов зажигания. В частности, кривая 4 соответствует углу зажигания  $77^\circ$  и среднему значению выпрямленного напряжения в относительных единицах 0,13 (1300 вольт при амплитуде генераторного напряжения 10000 в.).

Кривая 4 перестроена на рис. 4 в масштабе, более удобном для определения значения коэффициентов; там же вычислены значения коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 0,0775, & b_1 &= 0,074 \\ a_2 &= 0,325, & b_2 &= 0,078 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

По уравнениям (8) и (9,10) для значений коэффициентов (11) вычислены параметры гармонических составляющих.

$$\begin{aligned} y_1 &= 0,076 \sin(x - 60^\circ), \\ y_2 &= 0,041 \sin(2x + 60^\circ), \\ y_3 &= 0,052 \sin(3x), \end{aligned} \quad (12)$$

$$y_4 = 0,020 \sin(4x - 60^\circ),$$

$$y_5 = 0,016 \sin(5x + 60^\circ)$$

Для  $X = \frac{2\pi}{3}$ , что соответствует углу коммутации  $\gamma = 10^\circ$  в режиме "стола".

Полученные выражения гармонических составляющих проверены построением на рис. 5.

#### Определение индуктивного сопротивления магнита М-6А

Частотная зависимость индуктивного сопротивления М-6А была определена с помощью звукового генератора.

Схема и данные измерений, а также график частотной зависимости  $x_L = F(f)$  при  $I = \text{const}$  приведены на рис. 6 (кривая 1).

Для учета подмагничивающего действия выпрямленного тока на величину индуктивного сопротивления М-6А в дальнейших расчетах, было произведено осциллографирование напряжения на 3 витках связи М-6А при протекании выпрямленного тока  $I_d = 12$  ка. по основной обмотке магнита М-6А. Схема и данные измерений приведены на рис. 7. Осциллографирование производилось на частотах 50 и 1000 гц.

Частотная зависимость индуктивного сопротивления М-6А с учетом подмагничивающего тока  $I_d = 12$  ка. приведена на графике рис. 6 (кривая 2).

#### Расчет параметров схемы подавления пульсаций

Произведенный гармонический анализ и расчет переменной составляющей выпрямленного напряжения позволяют рассчитать необходимые параметры схемы.

При работе в цикле частота напряжения синхронных генераторов системы питания снижается до 41-42 гц., поэтому при расчетах частоту 12 гармоника следует принимать равной 500 гц.

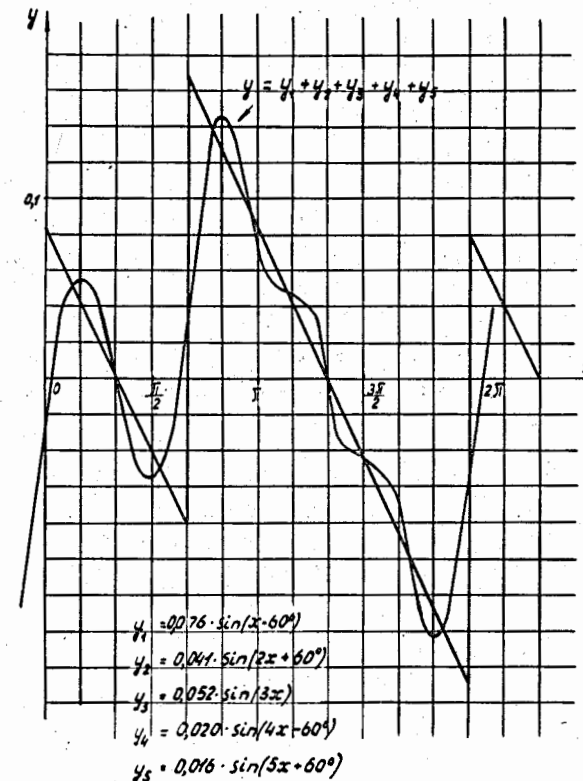
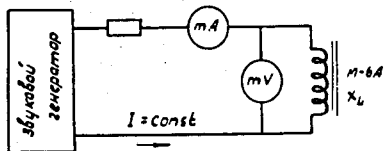


рис. 5.



f гц.	I м-В мА	U м-В мВ	X <sub>L</sub> м-В Ом	L м-В мЛН.
50	150	300	2	6,4
100	150	520	3,47	6,4
200	150	860	5,72	4,55
300	150	1200	8,0	4,25
400	150	1500	10	4,0
500	150	1700	11,6	3,7
600	150	1900	12,7	3,38
800	150	2500	16,7	3,35
1000	150	2800	18,7	3,00
1200	150	3200	20,6	2,72
1500	150	3800	25,6	2,7

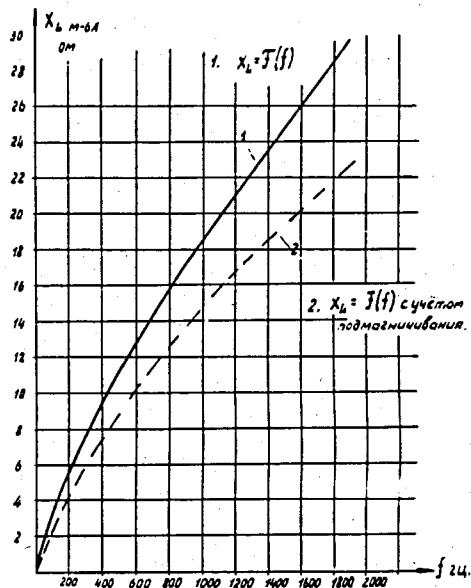


Рис. 6.

Амплитуды гармонических составляющих 500, 1000 и 1500 гц пульсаций выпрямленного напряжения можно определить по формуле:

$$U_{k \text{ макс.}} = y_{k \text{ макс.}} \cdot 10000 \text{ в.},$$

где  $y_{k \text{ макс.}}$  - амплитуда гармонической составляющей выпрямленного напряжения из уравнений (12) в относительных единицах.

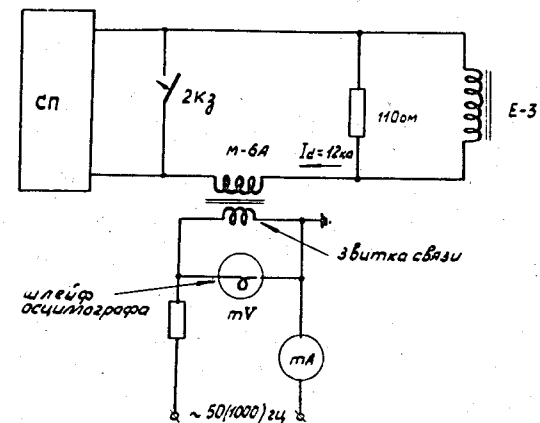
$$U_{\text{макс.}500} = 0,076 \cdot 10000 = 760 \text{ в.}$$

$$U_{\text{макс.}1000} = 0,041 \cdot 10000 = 410 \text{ в.}$$

$$U_{\text{макс.}1500} = 0,052 \cdot 10000 = 520 \text{ в.}$$

Условно считаем, что переменная составляющая выпрямленного напряжения в схеме с фильтром подавления на выходе будет для частот 500 гц. - 7 в., 1000 гц. - 2 в и 1500 гц. - 1 в.

Следовательно, фильтр должен иметь коэффициент подавления гармоник 500, 1000 и 1500 гц соответственно:



f гц.	I <sub>d</sub> мА	U <sub>витков связи</sub> мВ	I <sub>витков связи</sub> мА	X <sub>L</sub> м-В Ом	L м-В мЛН.
50	0	550	10	3	9,5
50	11	400	10	2,16	6,9
50	12	385	10	2,08	6,6

f гц.	I <sub>d</sub> мА	U <sub>витков связи</sub> мВ	I <sub>витков связи</sub> мА	X <sub>L</sub> м-В Ом	L м-В мЛН.
1000	0	260	0,89	15,7	2,5
1000	12	200	0,89	12,1	1,95
1000					

Рис. 7.

$$k_{500} = \frac{U_{\text{макс.500}}}{7} = \frac{760}{7} = 109;$$

$$k_{1000} = \frac{U_{\text{макс.1000}}}{2} = \frac{410}{2} = 205;$$

$$k_{1500} = \frac{U_{\text{макс.1500}}}{1} = \frac{520}{1} = 520;$$

В рассматриваемой схеме фильтра (рис. 1б) с применением в качестве дросселей магнитов типа М-6А, требуется определить величину емкости С для получения необходимого коэффициента подавления.

Из графика (кривая 2) на рис. 6 индуктивные сопротивления М-6А на частотах 500, 1000 и 1500 гц., соответствуют величинам

$$x_{L, 500} = 9 \text{ ом,}$$

$$x_{L, 1000} = 12,0 \text{ ом.,}$$

$$x_{L, 1500} = 17,0 \text{ ом.}$$

Необходимую величину емкостного сопротивления можно определить по формуле (соответственно схеме рис. 1б):

$$x_c = \frac{2x_L}{k};$$

$$C = \frac{1}{2\pi f x_c \cdot 10^{-6}} \text{ мкф}$$

Следовательно, для подавления составляющей:

$$f = 500 \text{ гц., } x_{c, 500} = \frac{2 \cdot 9}{109} = 0,165 \text{ ом.,}$$

$$C = \frac{1}{6,28 \cdot 500 \cdot 0,165 \cdot 10^{-6}} = 1950 \text{ мкф}$$

$$f = 1000 \text{ гц., } x_{c, 1000} = \frac{2 \cdot 12}{205} = 0,117 \text{ ом.}$$

$$C = \frac{1}{6,28 \cdot 1000 \cdot 0,117 \cdot 10^{-6}} = 1360 \text{ мкф}$$

$$f = 1500 \text{ гц., } x_{c, 1500} = \frac{2 \cdot 17}{520} = \frac{34}{520} = 0,065 \text{ ом.}$$

$$C = \frac{1}{6,28 \cdot 1500 \cdot 0,065 \cdot 10^{-6}} = 1630 \text{ мкф}$$

Емкость порядка 2000 мкф. обеспечит в рассматриваемой схеме необходимое подавление пульсаций.

*Экспериментальное подавление пульсаций  
выпрямленного напряжения преобразователя, работающего  
в статическом режиме*

С целью проверки методики расчета системы подавления пульсаций выпрямленного напряжения был поставлен эксперимент по подавлению пульсаций в статическом режиме работы преобразователя (см. схему рис. 8а).

Параллельно магниту Е-3 на шины постоянного тока подключалась емкость  $C = 1100$  мкф. Магнит М-6А расшунтировался. Преобразователь работал с углом регулирования, близким к углу регулирования работы преобразователя в режиме "стола" тока при  $U_{сг} = 3$  кв. и  $I_d = 4000$  а.

Производилась съемка нижеследующих осциллограмм:

1. С отключенной батареей конденсаторов  $C = 1100$  мкф; осциллограммы напряжения  $U_{Е-3}$  на магните Е-3 (на шинах преобразователя) и напряжения  $U_{М-6А}$  на расшунтированном М-6А (рис. 9).

2. С подключенной батареей конденсаторов  $C = 1100$  мкф; осциллограммы напряжения  $U_{Е-3}$  на магните Е-3 и напряжения  $U_{М-6А}$  на расшунтированном М-6А (рис. 10).

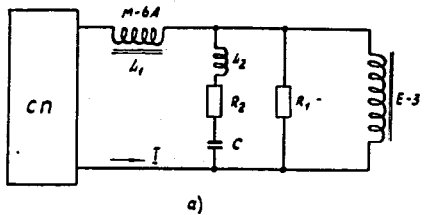
Гетеродинным анализатором гармоник измерялись составляющие пульсаций выпрямленного напряжения в схеме с отключенной и подключенной батареей конденсаторов.

Схема и результаты измерений приведены на рис. 11.

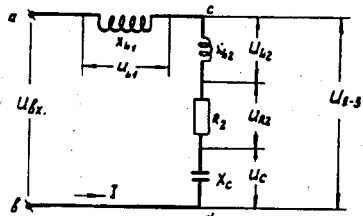
Из сопоставления переменных составляющих выпрямленного напряжения в таблицах (рис. 11) получают коэффициенты подавления:

$$600 \text{ гц. составляющей} \quad k = \frac{35}{1,4} = 25;$$

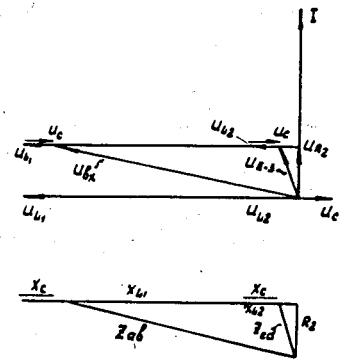
$$1200 \text{ гц. составляющей} \quad k = \frac{66}{2,45} = 27;$$



a)



б)



б)

Рис. 8.

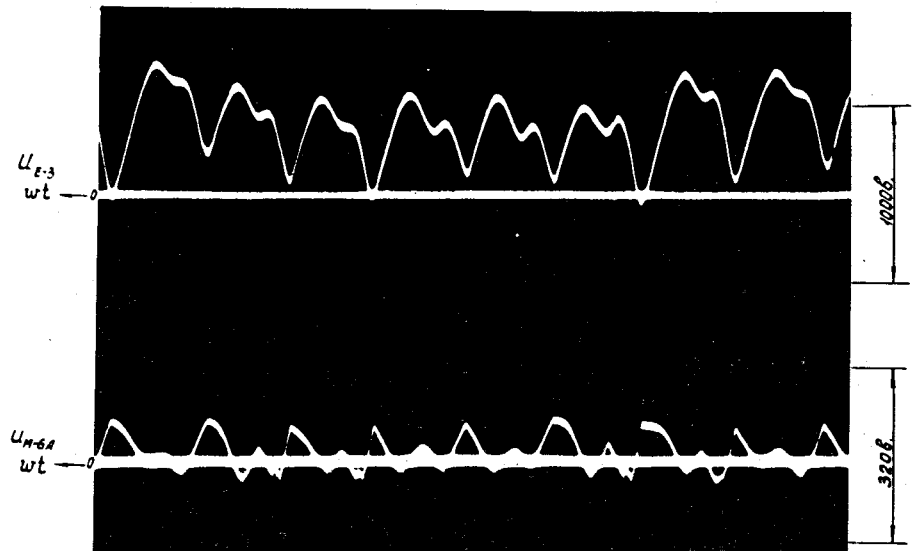


Рис. 9. Осциллограммы напряжений на E-3 и на расщепленном M-6A. Режим статический,  $I_d = 4000a$ ;  $U_n = 3кв$ .

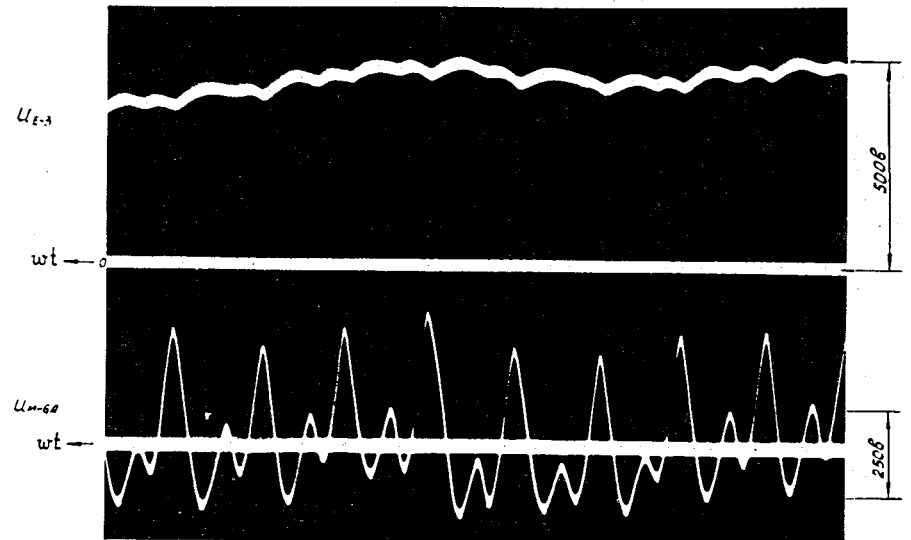


Рис. 10. Осциллограммы напряжений на E-3 и на расщепленном M-6A. Параллельно E-3 подключена емкость  $C = 1100 мкф$ . Режим статический,  $I_d = 4000a$ ;  $U_n = 3кв$ .

$$1800 \text{ гц. составляющей } k = \frac{58}{3,7} = 15,7 ;$$

Для проверки полученных в эксперименте коэффициентов подавления произведен расчет упрощенной схемы эксперимента (см. рис. 8б).

Сопротивлением  $R_1 = 110 \text{ ом}$ , и индуктивным сопротивлением магнита E-3 в расчете, из-за их большой величины, пренебрегаем.

Так как емкость  $C = 1100 \text{ мкф}$ , подключалась к схеме с помощью кабеля малого сечения и большой длины - 145 м, было замерено на разных частотах полное сопротивление  $Z_{cd}$  участка цепи cd, куда входит сопротивление  $x_c$  конденсатора, омическое сопротивление  $R_0$  шин и кабеля, а также индуктивное сопротивление  $x_{L2}$  шин и кабеля.

Данные измерений и кривая зависимости  $Z_{cd}$  от частоты приведены на рис. 12.

Из векторной диаграммы напряжений (рис. 8в) коэффициент подавления рассматриваемой схемы равен:

$$k = \frac{\dot{U}_{ВХ.}}{\dot{U}_{E-3}} = \frac{Z_{ab}}{Z_{cd}} = \frac{\sqrt{(x_{L1} + x_{L2} + x_c)^2 + R_2^2}}{\sqrt{(x_{L2} + x_c)^2 + R_2^2}}$$

Так как полное сопротивление цепи  $Z_{ab}$  в основном определяется индуктивным сопротивлением  $x_{L1}$ , а сопротивления  $x_{L2}$  и  $R_2$  имеют величины на порядок меньше, коэффициент подавления с достаточной точностью можно определить по формуле  $k = \frac{x_{L1}}{Z_{cd}}$ .

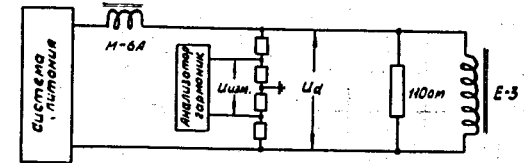
Подставляя в нее значения  $x_{L1}$  и  $Z_{cd}$  из графиков (рис. 6 и 12), получаем коэффициенты подавления для составляющих

$$f = 600 \text{ гц. } k = \frac{13 \text{ ом}}{0,53 \text{ ом.}} = 24,5 ;$$

$$f = 1200 \text{ гц. } k = \frac{21 \text{ ом.}}{1,1 \text{ ом.}} = 19 ;$$

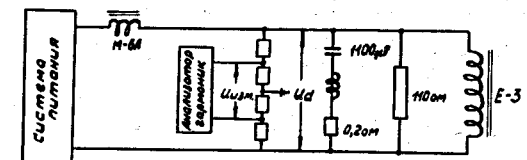
$$f = 1800 \text{ гц. } k = \frac{29 \text{ ом.}}{1,56 \text{ ом.}} = 18,5 .$$

а) с отключённой батареей емкостей.



f гц.	Цзм. в.	коэффициент деления	составляющая Cd
100	0,38	88	33,5
150	0,33	—	29,0
300	0,58	—	31,0
600	0,00	—	35,0
900	0,35	—	30,0
1200	0,75	—	66,0
1800	0,66	—	58,0

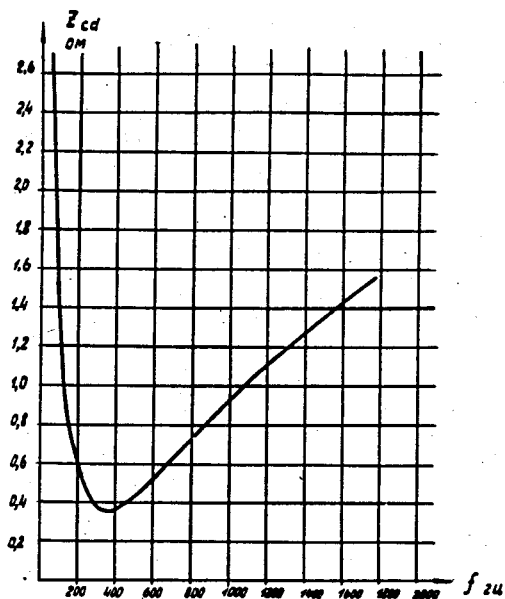
б) с подключённой батареей емкостей.



f гц.	Цзм. в.	коэффициент деления	составляющая Cd
100	0,2	88	17,5
150	0,058	—	3,1
300	0,026	—	2,3
600	0,16	—	1,4
900	0,027	—	2,4
1200	0,028	—	2,45
1800	0,042	—	3,7

Рис. 11.





f Гц	U <sub>cd</sub> мВ	I мА	Z <sub>cd</sub> Ом
50	400	150	2,67
100	205	150	1,36
300	58	150	0,39
500	66	150	0,44
600	80	150	0,53
800	108	150	0,72
1000	135	150	0,9
1200	165	150	1,1
1500	200	150	1,33
1800	235	150	1,57

Рис. 12.

### З а к л ю ч е н и е

1. Применяемая методика расчета дает удовлетворительное совпадение результатов расчета с опытными данными.
2. Возможность подавить пульсации напряжения на обмотке магнита синхрофазотрона в несколько десятков и даже сто раз с помощью схемы обычного фильтра вполне реальна.
3. Схема фильтра должна быть симметрична: в каждом полюсе необходимо иметь индуктивность типа магнита М-6А.
4. Расположение шунтирующих емкостей и связанного с ними силового оборудования должно быть максимально компактным и по возможности приближено к главному шинному проводу.
5. В кривой выпрямленного напряжения имеется составляющая с частотой около 100 гц. из-за того, что управляющие пики следуют один за другим со сдвигом, несколько отличающимся от 60 градусов электрических. Подавить эти пульсации фильтром нереально. Необходимо усовершенствовать систему управляющих пиков.

### Л и т е р а т у р а

1. Ускорители. Перевод под редакцией Б.Н. Яблокова. Атомиздат, стр. 351, (1962).
2. Е.Г. Комар. Ускорители заряженных частиц. Атомиздат, стр.354,1964.
3. Л.Н. Беляев, А.З. Дорошенко, Д.П. Калмыков, Н.И. Павлов, А.А.Смирнов, Т.А. Суетин. Опыт эксплуатации газоразрядных приборов в системе электропитания дубненского синхрофазотрона. Электронная техника, серия 3, газоразрядные приборы, выпуск 3, стр. 106, (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 марта 1969 года.