


We regret that some of the pages in the microfiche copy of this report may not be up to the proper legibility standards, even though the best possible copy was used for preparing the master fiche

Препринт ЕФН-1265(51)-90

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
YEREVAN PHYSICS INSTITUTE



В. А. АЙРАПЕТЯН, Б. А. ВАРТАНЯН, Г. К. ГАЗАРЯН,
К. Д. ДАВТЯН, А. С. ДИВАНЯН, Н. А. ЗАПОЛЬСКИЙ,
Г. Б. КАЗАРЯН, А. А. МАРКАРЬЯН, Г. А. МАРТИРОСЯН,
А. В. МКРТЧЯН, Г. Г. МКРТЧЯН, А. С. МИНАСЯН,
В. Ц. НИКОГОСЯН, А. В. ОГАНЕСЯН, К. А. САДОЯН,
В. Э. САРОЯН, С. П. ТАРОЯН, Р. Г. ХАЧАТРЯН,
М. Ю. ХОЕЦЯН, В. П. ГОНЧАРЕНКО, О. А. ГУСЕВ,
А. И. КОНСТАНТИНОВ

ЕРЕВАНСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ СИНХРОТРОН В РЕЖИМЕ
ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАТО МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА

ЦНИИатоминформ
ЕРЕВАН-1990

Վ.Ա.ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Բ.Ա.ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Գ.Կ.ՂԱԶԱՐՅԱՆ,
Կ.Դ.ԴԱՎԹՅԱՆ, Ա.Ս.ԴԻՎԱՆՅԱՆ, Ն.Ա.ԶԱՊՈՒՄԻ,
Գ.Բ.ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ա.Ս.ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Հ.Ա.ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ,
Ա.Վ.ՄԱՐՏՉՅԱՆ, Հ.Գ.ՄԱՐՏՉՅԱՆ, Ս.Հ.ՄԻՂԱՍՅԱՆ,
Վ.Յ.ՆԻՎՈՂՈՍՅԱՆ, Ա.Վ.ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Կ.Ա.ԱՅԴՈՍՅԱՆ,
Վ.Է.ՄԱՐՈՅԱՆ, Ս.Գ.ԹԱՌՈՅԱՆ, Ռ.Գ.ԽԱՀԱՏՐՅԱՆ,
Մ.ՅՈՒԽՈՅԵՅՅԱՆ, Վ.Գ.ԳՈՆՀԱՐԵՆԿՈ, Օ.Ա.ԳՈՒՄԵՎ,
Ա.Բ.ԿՈՆՍՏԱՆՏԻՆՈՎ

**ԵՐԵՎԱՆԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՑԻՆ ՍԻՆԲՐՈՏՐՈՆԸ ԴԱՆԴԱՂ
ԵՒ ՔԻ ՀԱՐԹՈՒԹՅԱՆ ԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ՌԵԺԻՄՈՒՄ**

Աշխատանքում ներկայացված էն Երևանի սինքրոտրոնի օղակածն էլեկտրամագնիսի մագնիսական դաշտի հարթ զազաթի կազմավորման համակարգի ֆիզիկական թողարկման արդյունքները՝ արագացված մասնիկների դանդաղ դուրսբերման համար: Մանրամասն ուսումնասիրվել են հարթ զազաթի կազմավորման պատանձնատեսությունները «կողման» եղանակով՝ փոփոխական կազմող էլեկտրամագնիսական հոսանքի տրված արժեքներին մոտեցման պահին: Բննարկված են սխեմի կատարելագործման հնարավորությունները՝ մինչև նաև և ավելի հարթության երկարատևության մեծացման համար: Բերված են դուրս բերված փրկարգի փորձարարական ուսումնասիրությունների արդյունքները, մագնիսական շարժման հարթ զազաթի սեմինում:

Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ
Երևան 1978

V.A.AIRAPETIAN, B.A.VARTANIAN, G.K.GAZARIAN, K.D.DAVTIAN,
A.S.DIVANIAN, N.A.ZAPOLSKY, G.B.KAZARIAN, A.M.MARKARIAN,
G.A.MARTIROSSIAN, A.V.MKRTCHIAN, G.G.MKRTCHIAN, A.S.MINASSIAN,
V.Ts.NIKOGHOSSIAN, A.V.OGANESSIAN, K.A.SADOYAN, V.E.SAROYAN,
S.P.TAROYAN, R.G.KHACHATRIAN, M.Yu.KHOETSIAN,
V.P.GONCHARENKO^{*}, O.A.GUSEV^{*}, A.I.KONSTANTINOV^{*}

YEREVAN ELECTRON SYNCHROTRON IN THE MODE OF FORMATION
OF A SLOW-EXTRACTION PLATEAU

The results of putting into operation of a system of formation of the Yerevan electron synchrotron magnetic field flat top for slow extraction of accelerated particles are presented. The peculiarities of the flat top formation by "cutting off" the variable component of the electromagnet's current at the moment of reaching a given value are investigated in details. There is considered the possibility of updating the scheme to increase the width of the plateau up to $6\mu s$ and larger. There are presented the results of experimental investigations of the beams extracted in the mode of the magnetic field flat top operation.

Yerevan Physics Institute

Yerevan 1990

* Efremov Institute, Leningrad

УДК 621.3.038.624

В.А. АЙРАПЕТЯН, Б.А. ВАРТАНЯН, Г.К. ГАЗАРЯН,
К.Д. ДАВТЯН, А.С. ДИВАНЯН, Н.А. ЗАПОЛСКИЙ,
Г.Б. КАЗАРЯН, А.М. МАРКАРЬЯН, Г.А. МАРТИРОСЯН,
А.В. МКРТЧЯН, Г.Г. МКРТЧЯН, А.С. МНАСЯН,
В.Ц. НИКОГОСЯН, А.В. ОГАНЕСЯН, К.А. САДОНЯН,
В.Э. САРОЯН, С.П. ТАРОЯН, Р.Г. ХАЧАТРЯН,
М.В. ХОВЦЯН, В.Л. ГОНЧАРЕНКО*, О.А. ГУСЕВ*,
А.Н. КОНСТАНТИНОВ*

**ЕРЕВАНСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ СИНХРОТРОН В РЕЖИМЕ
ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАТО МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА**

В работе представлены результаты физического запуска системы формирования плоской вершины магнитного поля кольцевого электромагнита Ереванского синхротрона для медленного вывода ускоренных частиц. Подробно исследованы особенности формирования плоской вершины методом "срезания" переменной составляющей тока электромагнита в момент достижения заданного значения. Рассмотрены возможности модернизации схемы для увеличения длительности плато до 6 мс и более. Приведены результаты экспериментальных исследований выведения пучков в режиме плоской вершины магнитного поля.

Ереванский физический институт
Ереван 1990

*) Научно-исследовательский институт электротехнической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, г. Ленинград

I. Повышение эффективности быстроциклических ускорителей

В развитии ускорителей имеются две основные тенденции: первая - увеличение энергии, вторая - увеличение среднего тока и моноэнергетичности ускоренных частиц. Если существенное увеличение энергии ускоренных частиц возможно только при строительстве новых ускорителей, то увеличение среднего тока и моноэнергетичности при выводе возможно за счет различных технических усовершенствований [1].

Особенностью быстроциклических синхротронов, в основном электронных, является малая длительность цикла ускорения и работа с частотой, близкой частоте питающей сети. Поэтому система питания таких синхротронов строится обычно по принципу включения электромагнита в резонансный контур с подмагничиванием. Инжектор запитывается через согласующий трансформатор от резонансного контура ускорителя или синхротронного генератора.

Увеличение среднего тока ускоренных частиц достигается за счет увеличения энергии инъекции [2], многооборотной инжек -

ции [3] , синхротронного накопления [4] , увеличения частоты работы ускорителя. Увеличение энергии инжекции требует применения инжекторов на более высокие энергии, например, для синхротрона ЭКУ-6 новый инжектор проектируется на 120 МэВ. Для синхротронного накопления и многооборотной инжекции в ведущем магнитном поле необходимо формировать плато инжекции и регулировать производную поля на участке захвата частиц в ускорение. С целью исключения периодических нестабильностей интенсивности ускоренного пучка необходимо синхронизировать частоту циклов ускорения с частотой питающей сети. Так как изменение периода питающей сети является независимой переменной, то все схемы синхронизации основаны на изменении (регулировании) периода резонансного контура. Это приводит к изменению фазы момента инжекции частиц относительно напряжения питающей сети при изменении частоты сети или собственной частоты резонансного контура, и , как следствие, к изменению условий инжекции из-за ограниченной стабильности и низкочастотных пульсаций источников питания инжектора и основного ускорителя. В связи с этим необходимо стабилизировать фазу инжекции относительно питающей сети.

Этап вывода частиц из ускорителя является весьма важным для достижения максимальной эффективности использования пучка ускоренных частиц. Существует два типа вывода пучка частиц: быстрый и медленный. Быстрый вывод частиц осуществляется за время одного их оборота. Медленный вывод частиц применяется для временной растяжки интенсивного пучка с целью регистрации нужных событий электронной аппаратурой. С ростом интенсивности и энергии ускоренных частиц необходимо обеспечить медленный вывод частиц на внешние мишени. Моноэнергетичность пучка ускоренных частиц

при медленном выводе определяется изменением тока магнита в течение вывода:

$$\frac{\Delta E}{E} = 1 - \cos \omega_k \frac{\Delta t}{2}, \quad (I.1)$$

где Δt - длительность медленного вывода, ω_k - круговая частота резонансного контура. Например, для синхротрона, работающего на частоте 50 Гц и растяжке медленного вывода 3 мс при питании магнита синусоидальным током, разброс энергии выведенных частиц составляет 11%. Важнейшим требованием физических экспериментов, использующих счетную методику регистрации событий, является получение растянутых по времени, моноэнергетичных и однородных по плотности пучков частиц с разбросом энергии не более $\pm 0,25\%$. Для обеспечения этих требований необходимо, чтобы система питания обеспечивала формирование в ведущем магнитном поле при максимальном его значении плато медленного вывода. В этом направлении проводилась модернизация систем питания электронных синхротронов С-25, С-25Р, ЗКУ-6 и др.

Анализ эксплуатации ускорителя ЗКУ-6 показал, что на максимальной энергии ускоренных частиц он работает не более 50% времени. В то же время, эквивалентная пучковая мощность

$$P_{\text{экв.}} = e \cdot n \cdot E \cdot f, \quad (I.2)$$

где e - заряд ускоряющих частиц,
 n - количество частиц,
 E - энергия ускоренных частиц,
 f - частота циклов ускорения,

является важным критерием эффективности работы ускорителя. Поэтому для быстроциклических синхротронов желательно также увеличить частоту циклов ускорения при уменьшении энергии ускоренных частиц. Изменение частоты циклов ускорения должно быть кратным частоте питающей сети для обеспечения условий синхронизации.

Учитывая перечисленные выше требования система питания синхротрона для формирования оптимального ведущего магнитного поля должна обеспечивать:

1. синхронизацию частоты циклов ускорения с частотой, питающей сети;
2. формирование в ведущем магнитном поле при его максимальном значении плато медленного вывода с точностью $\Delta E/E \leq \pm 0,25\%$;
3. регулирование производной магнитного поля в момент инжекции;
4. стабилизацию фазы инжекции частиц в ускоритель относительно питающей сети;
5. изменение частоты циклов ускорения при регулировании энергии ускоренных частиц.

При реконструкции действующих ускорителей все эти требования могут быть и не учтены. Основным критерием является максимальное использование имеющегося оборудования и минимизация дополнительных затрат для обеспечения требований конкретных физических экспериментов. Модернизация действующих систем питания ускорителей почти неизбежно включает замену силовых коммутирующих приборов, перевод схем управления, регулирования, синхронизации на современную элементную базу.

2. Способы формирования плато медленного вывода частиц и синхронизации с питающей сетью

Вопросы формирования в индуктивной нагрузке импульсов, близких к треугольным, полукруглым, прямоугольным, с помощью формирующего двухполюсника подробно рассмотрены в [5]. Анализ схемных решений, основанных на введении в ток магнита высших гармонических составляющих (гармонический способ), и определение оптимальных параметров формирующего двухполюсника применительно к системам питания синхротронов, обеспечивающих формирование плато медленного вывода, проведена в [6]. В [7] рассмотрен принцип формирования плато в максимуме тока магнита путем последовательного включения в цепь резонансного контура импульсного источника, обеспечивающего компенсацию напряжения на электромагните в момент формирования плато (компенсационный способ). Перечисленные способы формирования плато тока отличаются относительной простотой технической реализации, однако требуют применения дополнительного оборудования большой энергоемкости.

Значительный прогресс отечественной элементной базы, в частности высоковольтных сильноточных тиристорных коммутаторов, способствовал появлению разнообразных схем формирования плато тока, основанных на закорачивании цепи электромагнита на заданном уровне тока тиристорным ключом с последующим его автоматическим выключением (параметрический способ). В диссертации Г.А.Мартirosяна [8] проведен подробный технико-экономический анализ перечисленных выше способов формирования плато тока применительно к Ереванскому электронному синхротрону ЭКУ-6. Результаты анализа сводятся к тому, что формирование плато тока

по любому из способов требует увеличения реактивной энергии, запасаемой в системе питания, на 15-30%; использование дополнительного оборудования из индуктивно-емкостных элементов на большую установленную мощность приводит к увеличению мощности активных потерь на 20-25%. Обеспечение требуемой неравномерности плоской вершины при формировании ее по гармоническому и компенсационному способу технически целесообразно при длительности плато до 4 мс. Параметрический способ позволяет формировать плато в более широких пределах, при определенных условиях регулировать его длительность, и, следовательно, изменять эквивалентную частоту резонансного контура в функции изменения периода питающей сети. Усилия авторов были направлены на проектирование и исследование схемных решений систем питания быстроциклических ускорителей, которые позволяют как формировать плато тока, так и синхронизировать частоту циклов ускорения с питающей сетью на основе параметрического способа (дискретного изменения параметров резонансного контура) [9].

Известны способы синхронизации частоты резонансного контура с частотой питающей сети за счет изменения эквивалентной индуктивности резонансного контура путем последовательного или параллельного включения дополнительной индуктивности [10]. Момент включения дополнительной индуктивности в каждом периоде выбирается автоматически в функции разности периодов сети и контура. Для исключения влияния переходных процессов в момент подключения дополнительной индуктивности (высокочастотные колебания на паразитных контурах схемы, изменение реактивного сопротивления контура и др.) на ведущее магнитное поле во время ускорения частиц предпочтительной (разрешенной) зоной синхрони-

зации является половина периода, соответствующая спаду тока электромагнита. Примером технической реализации изменения индуктивности, включенной последовательно в резонансный контур, служит схема рис.2.1. В этой схеме формирование плато осуществляется закорачиванием цепи электромагнита ключом Т1 при достижении амплитудного значения тока. Выключение ключа Т1 осуществляется импульсом противотока от импульсного источника ИЗТ через импульсный трансформатор ТИ и диод Д1. Синхронизация резонансного контура с сетью обеспечивается за счет регулирования времени шунтирования дополнительной индуктивности L_d тиристорным ключом Т2. Диод Д1 служит для защиты импульсного источника ИЗТ от трансформации высокого напряжения при аварийном включении ключа Т1, когда полное напряжение емкости прикладывается к добавочной индуктивности. Величина добавочной индуктивности для обеспечения требуемой зоны синхронизации составляет 10-15% от эквивалентной индуктивности резонансного контура.

В [11] предложен способ синхронизации работы синхротрона с напряжением питающей сети путем изменения длительности паузы между полупериодом напряжения на электромагните в функции разности периодов резонансного контура и сети. Принципиальная схема синхронизации приведена на рис.2.2. Момент включения коммутирующего устройства "К", закорачивающего цепь электромагнита, синхронизирован с моментом перехода через ноль напряжения на электромагните, а момент выключения синхронизирован с фазой питающей сети. При изменении периодов резонансного контура или сети изменяется длительность паузы в напряжении электромагнита $\tau_{пл}$. В зависимости от полярности включения тиристорного ключа, шунтирующего электромагнит, паузу в напряжении электро-

магнита можно формировать как при положительной, так и при отрицательной полуволне тока электромагнита $\mathcal{C}_{\text{пн}}$. На рис.2.3 приведена принципиальная схема устройства, позволяющая формировать плато тока для медленного вывода и синхронизировать резонансный контур с питающей сетью [12]. Длительность плато в максимуме тока электромагнита выбирается из условия необходимой длительности медленного вывода и требуемой зоны синхронизации. Особенностью этого устройства является возможность автоматического перевода системы питания в режим формирования плато и синхронизации с сетью. Генератор тактовых импульсов напряжения резонансного контура "ГК" через дискриминатор фазы "ДФ" соединен с управляющим электродом тиристорного ключа Т1. Генератор тактовых импульсов напряжения сети "ГС" соединен с управляющим электродом тиристорного ключа Т2 и через блок регулируемой задержки "БРЗ" с "ДФ". В момент t_1 , когда фаза напряжения на электромагните соответствует разрешенной фазе напряжения питающей сети, с "ДФ" формируется сигнал на включение Т1, шунтирующего цепь тока электромагнита. В момент t_2 , синхронизированный с переходом через ноль напряжения питающей сети, включается ключ Т2, при этом от источника запирающего тиристора "ИЗТ" в цепи Т1 формируется импульс противотока, обеспечивающий его выключение. Отличительной особенностью этого устройства является последовательное включение источника противотока "ИЗТ" через согласующий импульсный трансформатор в цепь ключа Т2. Для запирающего тиристорного ключа Т1 необходимо, чтобы в течение времени выключения к нему было приложено обратное напряжение. Это приводит к увеличению индуктивности шунтирующей цепи, в основном за счет индуктивности вторичной обмотки импульсного транс-

форматора "ТИ". Если принять, что включение t_1 происходит в момент, когда

$$U_{ск} = 0, \quad i_M = I_{max},$$

то ток магнита на плато будет определяться по формуле

$$i_M(t) = I_{max} \left(\frac{L'}{L_M + L'} \cos \omega_k t + \frac{L_M}{L_M + L'} \right), \quad (2.1)$$

где L' - индуктивность импульсного трансформатора, приведенная к вторичной обмотке;

ω_k - круговая частота резонансного контура,

$$\omega_k = \sqrt{\frac{L_M + L'}{(L_M \cdot L') C_k}}. \quad (2.2)$$

Амплитуда пульсации на плато тока

$$A_u = I_{max} \frac{L'}{L_M + L'}. \quad (2.3)$$

Относительная величина пульсации

$$\Delta\% = I_{max} \frac{L'}{L_M + L'} / I_{max} \frac{L_M}{L_M + L'} = \frac{L'}{L_0} 100\%. \quad (2.4)$$

Для исключения ВЧ-колебаний на плато тока согласующий импульсный трансформатор источника противотока включают последовательно с емкостью резонансного контура [13] (рис.2.4.) В этом случае индуктивность трансформатора не влияет на уровень пульсации на

плато тока в электромагните, что позволяет оптимальным образом согласовать импульсный источник коммутации с нагрузкой. При импульсной подпитке резонансного контура источник "ИЭТ" для запитывания тиристорного ключа может быть подключен через трансформаторные обмотки разделительных реакторов [14] (рис.2.5.)

Наиболее полно преимущества дискретного изменения параметров резонансного контура реализованы в способе, предложенном Гончаренко В.П. совместно с Гусевым О.А. [15]. Сущность способа заключается в разделении функций формирования плато тока и синхронизации с сетью по разным полупериодам переменной составляющей тока электромагнита. При положительной полуволне тока после его максимума цепь электромагнита шунтирует в фиксированный момент времени, определяемый по установке датчика тока магнита, что обеспечивает формирование плато вывода. Для синхронизации с питающей сетью изменяют момент начала шунтирования отрицательной полуволны тока электромагнита в функции разности периодов резонансного контура и сети. Тиристорный ключ Т1 подключен параллельно цепи, состоящей из последовательно соединенных добавочной индуктивности L_d и емкости резонансного контура C_k , которые с электромагнитом L_m образуют последовательный резонансный контур. Импульс с блока управления "БУ" включает ключ Т1 в момент, когда напряжение на электромагните U_m положительно относительно анода ключа Т1 после максимума тока. Цепь тока электромагнита шунтируется через открытый тиристорный ключ, а емкость через добавочную индуктивность перезарядается обратным знаком. При последующей ее перезарядке ключ Т1 выключается. Длительность плато медленного вывода

$$t_{пл} = \frac{\pi + 2\alpha}{\omega_1}, \quad (2.5)$$

где

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{C_k L_g}}, \quad \alpha = \arctg \frac{I_1 \omega_1 L_g}{U_1},$$

U_1, I_1 - напряжение и ток электромагнита в момент включения ключа.

Для синхронизации с сетью ключ Т1 включается повторно вблизи максимума отрицательной полуволны, тогда емкость перезарядается через открытый ключ и при обратной перезарядке закрывает его. Длительность полупериода отрицательной полуволны тока при этом равна

$$\frac{T_k}{2} = \frac{2\alpha \tau \cos \frac{U_1}{U_m}}{\omega_k} + \frac{\pi - 2\alpha}{\omega_1}. \quad (2.6)$$

Так как $\omega_k \ll \omega_1$, при изменении момента включения ключа Т1 на отрицательном полупериоде электромагнита меняется эквивалентный период резонансного контура. Схема синхронизации автоматически обеспечивает равенство периодов сети и контура.

Разделение функций формирования плато медленного вывода и синхронизации частоты резонансного контура с частотой питающей сети по разным полупериодам тока электромагнита расширяет возможности схем синхронного питания быстрых синхротронов. При реконструкции действующих ускорителей с целью формирования плато вывода и синхронизации с сетью минимизация состава дополнительного оборудования является определяющей. Схемы, основанные

на шунтировании резонансного контура тиристорным ключом, с дополнительной индуктивностью в цепи емкости наиболее полно удовлетворяют этому требованию.

3. Экспериментальные исследования работы Ереванского синхротрона в режиме плоской вершины магнитного поля

На Ереванском электронном синхротроне ЭКУ-6 были исследованы два метода формирования плоской вершины в направляющем магнитном поле кольцевого электромагнита.

1. "Срезание" на заданном уровне вершины синусоиды магнитного поля.

2. "Добавление" плоского участка к максимуму синусоиды магнитного поля.

Сущность первого метода заключается в следующем. При достижении требуемого значения напряженности магнитного поля включаются тиристорные ключи $T1 - T16$ (рис.3.1), которые закорачивают цепь из последовательно соединенных конденсаторной батареи C и дополнительной индуктивности L . Напряжение на обмотках электромагнита скачком спадает до нуля и поддерживается равным нулю. При этом в кривой напряженности магнитного поля формируется плоский участок. В момент закорачивания напряжение конденсаторной батареи прикладывается к дополнительной индуктивности, происходит обмен энергией между ними, и в результате перезаряда конденсаторной батареи тиристорные ключи автоматически запираются. От величины дополнительной индуктивности зависит длительность плато тока в электромагните.

На рис.3.2 приведены диаграммы токов и напряжений в элементах одной секции резонансного контура при формировании плато тока.

Длительность плато тока электромагнита может быть определена по формуле [8]:

$$\tau_n = \frac{2}{\omega_1} \alpha z \operatorname{ctg} \left(\sqrt{\frac{L_{\text{э}}}{L}} \operatorname{ctg} \varphi \right), \quad (3.1)$$

где L - величина дополнительной индуктивности,
 $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - круговая частота контура, образованного при включении тиристорных ключей Т1 - Т16,

$$L_{\text{э}} = \frac{L_{\text{pp}} \cdot L_{\text{м}}}{L_{\text{pp}} + L_{\text{м}}} + L,$$

φ - фаза начала формирования плоской вершины.

Исследования показали, что формирование плато вывода методом "срезания" полуволны тока приводит к возникновению высокочастотных колебаний (частота ~ 15 кГц) в начале плато. Эти колебания возникают из-за разряда через электромагнит паразитных емкостей резонансного контура при скачкообразном изменении напряжения на электромагните и существенно усложняют задачу вывода ускоренного пучка. Поэтому предпочтительнее метод "добавления" плоского участка к максимуму синусоиды магнитного поля, когда цепь тока электромагнита шунтируется при нулевом напряжении на емкости резонансного контура. В этом случае для запираания тиристорных ключей Т1 - Т16 (рис.3.3) в схему вводятся дополнительные ключи Тш, которые шунтируют добавочные индуктивности $L_1 - L_{16}$ в момент окончания плато тока.

Принцип работы схемы (рис.3.4).

В момент t_1 , при достижении тока магнита амплитудного значения, включается ключ ТІ, что обеспечивает закорачивание цепи тока электромагнита и формирование плато вывода. Через открытый ключ ТІ образуется колебательный контур $C_K - L$ с круговой частотой $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_K}}$. Напряжение в этом контуре и ток в ТІ определяются выражением

$$U_{CK}(t) = -I_g \sin \omega_1 t / \omega_1 C_K, \quad (3.2)$$

$$i_{T1} = I_g (1 - \cos \omega_1 t). \quad (3.3)$$

Момент окончания плато тока должен совпадать с положительной полярностью напряжения на C_K относительно катода ТІ. В момент t_2 вблизи максимума напряжения на C_K включается ключ Тш, что обеспечивает выключение ТІ обратным напряжением конденсатора C_K . Резонансный контур переходит на собственную частоту колебаний. В момент t_3 происходит разряд конденсатора и ток магнита достигает максимального значения. Ключ Тш запирается в момент t_4 , когда ток магнита становится равным току дросселя. После этого резонансный контур переходит на частоту

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_K}}$$

4. Экспериментальные исследования вывода пучков

Новое качество, обретенное ускорителем с внедрением плоской вершины во временном ходе ведущего магнитного поля, предопределило и новый характер решения задач, связанных с организацией как вывода γ - пучков, так и вывода первичных электронов.

Исследования качественных показателей таких свойств выведенных пучков, как длительность возможного взаимодействия первичных частиц с веществом внутренней мишени и длительность времени вывода ускоренных частиц, равномерность выхода фотонов и электронов за время вывода, интенсивность фотонного пучка при фиксированной жесткости коллимации и количество выведенных первичных частиц из физической экспериментальной установки, позволяют определить программу перспективного развития экспериментальных исследований ЕРФИ на выведенных пучках.

Исследования основных характеристик фотонного пучка в режиме с плоской вершиной в характере питания магнитных систем Брэванского синхротрона проводились на трассе гамма-пучка № 2 с применением гониометрической установки, содержащей в качестве внутренней мишени кристаллический радиатор из алмаза толщиной 100 мкм (ориентация (100)).

Формирование фотонного пучка с кристаллической мишени осуществлялось наведением на нее ускоренных электронов методом локального возмущения типа "бим-бамп" в течение времени существования плоской вершины в ведущем магнитном поле синхротрона. Длительность времени сброса была получена в интервале (3,0-3,4) мс. Распределение интенсивности фотонов по времени вывода (рис.4.1) характеризуется нарушением равномерности в виде пиковых образо-

ваний, особенно ощутимых на начальном этапе вывода. Длительности пиков составляют величину порядка нескольких микросекунд в каждом. Наличие их обязано переходным процессам в ведущем магнитном поле синхротрона при формировании плоской вершины.

Экспериментальное оборудование и методика измерений, применяемые при исследовании, описаны в работе [16]. Интегральная интенсивность гамма-пучка, пропущенного через коллиматор с отверстием $3,3 \times 3,3 \text{ мм}^2$, измеренная квантометром Вильсона, составляла величину порядка $3 \cdot 10^9$ эквивалентных фотонов в секунду при токе ускоренных электронов 6 мА. Совокупность всех ускоренных электронов, сбрасываемых на мишень и дающих тормозное излучение, характеризуется некоторым разбросом угловых и энергетических параметров, усредненных во времени вывода. Различие в угловых и энергетических распределениях для разных моментов вывода отражается в спектрах когерентного тормозного излучения (КТИ) [17].

На рис.4.2 приводится измеренный энергетический спектр КТИ, когда длительность анализируемого сигнала соответствует полному сбросу.

Когерентный эффект, т.е. отношение интенсивности излучения пиковой энергии I_n к интенсивности при дезориентированном кристалле I_g составляет величину $I_n/I_g \approx 3,1 \pm 0,3$.

Измерены также значения когерентных эффектов в течение первых 0,5 мс по времени вывода, в середине вывода и за последние 0,5 мс. Полученные данные приведены в таблице.

Видно различие в когерентных эффектах по времени вывода. Это является свидетельством различий в угловом разбросе наводимых

Таблица

Начало вывода	Середина вывода	Конец вывода
$4,4 \pm 0,55$	$4,7 \pm 0,59$	$2,2 \pm 0,28$

на внутреннюю мишень частиц, причем самый большой угловой разброс частиц в конце вывода. Если эти результаты сравнить с данными работы [17], когда ускоритель работал без плоской вершины в магнитном поле, то можно выделить, во-первых, некоторое уменьшение углового разброса электронов в середине вывода по отношению к началу и к концу вывода, во-вторых, отсутствие характерных для предыдущих измерений смещений пиковой энергии в спектре в сторону меньших энергий, что является свидетельством уменьшения энергетического разброса по времени вывода.

Измерение величины конечной энергии наводимых на радиатор электронов в разные моменты времени вывода показали ее постоянство с точностью ± 20 МэВ, что является следствием наличия плоской вершины во временном ходе магнитного поля синхротрона.

Планируемые задачи экспериментальных исследований в области взаимодействия электронов с нуклонами и ядрами требуют наличия как пучков высокой интенсивности, так и большой длительности времени вывода.

Увеличение длительности вывода резко снижает уровень случайных совпадений, наличие которых является главным препятствием при исследовании данных эффектов.

Отсутствие плоской вершины ограничивает увеличение длитель-

ности вывода за счет ухудшения энергетического разброса выведенного пучка.

Проведено изучение энергетических характеристик выведенного электронного пучка при "плоской вершине" магнитного поля ускорителя. Выведенный электронный пучок с энергией $\sim 2,13$ ГэВ и длительностью вывода $\tau \sim 0,6$ мс был сфокусирован на оси электронного спектрометра [18], где размещался сцинтилляционный экран, просматриваемый телевизионной камерой. Размеры сфокусированного на мишени пучка: ~ 5 мм по вертикали и ~ 10 мм по горизонтали. Из характеристик e_4^- - тракта [19] следует, что уход энергии первичного пучка на $\sim 1\%$ приводит к смещению центра тяжести пучка по горизонтальной оси на этом экране на ~ 1 см. Ранее (в случае отсутствия плоской вершины) было также известно, что смещение момента вывода пучка относительно H^{\max} на $\sim 0,8$ мс приводит к $\sim 1,5\%$ смещению энергии пучка.

Измерения показали, что при "плоской вершине" не наблюдается уход центра тяжести пучка при сдвиге момента вывода относительно H^{\max} в пределах до $\sim 2,5$ мс, что равнозначно утверждению о постоянстве энергии пучка с точностью $\sim 1\%$. (Так как $\sim 1\%$ уход энергии приводил бы к $\sim 5-7$ мм сдвигу центра тяжести пучка).

Энергетические характеристики выведенного пучка более аккуратно были исследованы измерениями спектров процесса упругого рассеяния электронов на водороде при энергии $\sim 2,13$ ГэВ и $\theta = 16^\circ$ (методом вычитания спектров электронов, рассеянных на мишенях CH_2 и С). Известно, что положение упругого пика под данным углом однозначно связано с начальной энергией, а его ширина определяется энергетическим и угловым разрешением системы

регистрации рассеянных электронов и энергетическим разбросом начального пучка. Энергетическое разрешение магнитного спектрометра [18] позволяет по положению упругого пика обнаружить уход начальной энергии $\geq 0,5\%$.

Пик упруго рассеянных электронов измерялся при трех значениях момента вывода пучка относительно H^{\max} ($-0,6$ мс: $+0,8$ мс и $+1,7$ мс). Положение пиков для всех трех случаев практически совпадало, что свидетельствует о том, что на "плоской вершине" изменение энергии от постоянного значения в интервале до $2,3$ мс не превышает $\Delta E/E \sim 0,5\%$. Типичный спектр упругого рассеяния электронов показан на рис.4.3 вместе с теоретически расчетной кривой.

При "плоской вершине" было также исследовано влияние длительности вывода на ширину упругого пика. Переход от длительности вывода $0,6$ мс к $2,0$ мс не привел к изменению формы и положения спектра упруго рассеянных электронов, что также подтверждает в приведенный результат $\Delta E/E \leq 0,5\%$.

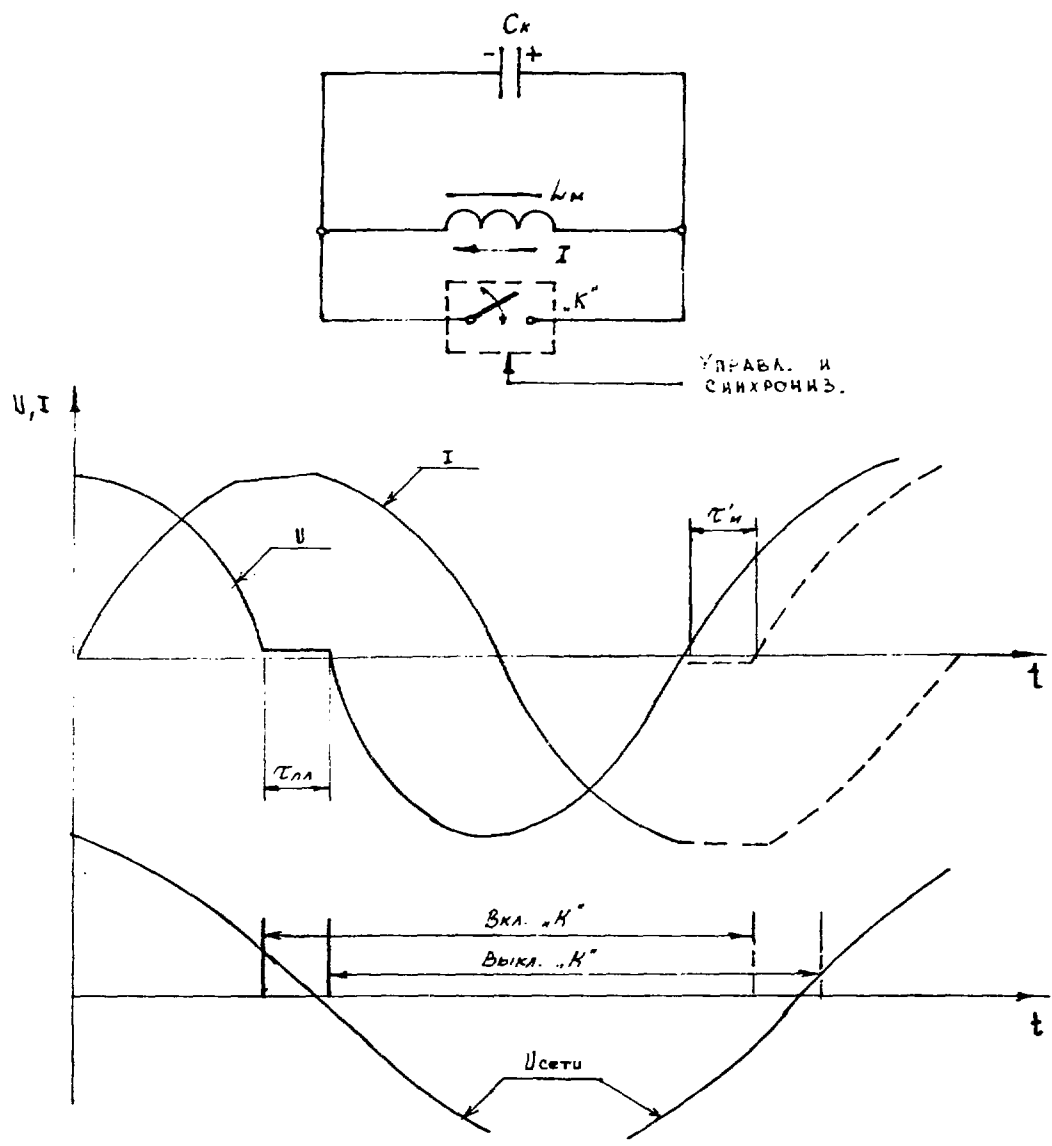


Рис. 2.2

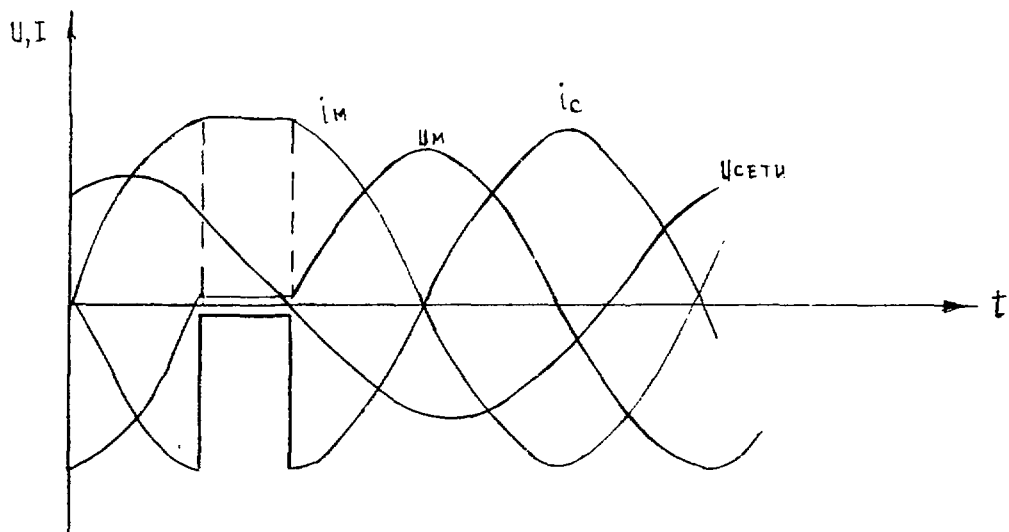
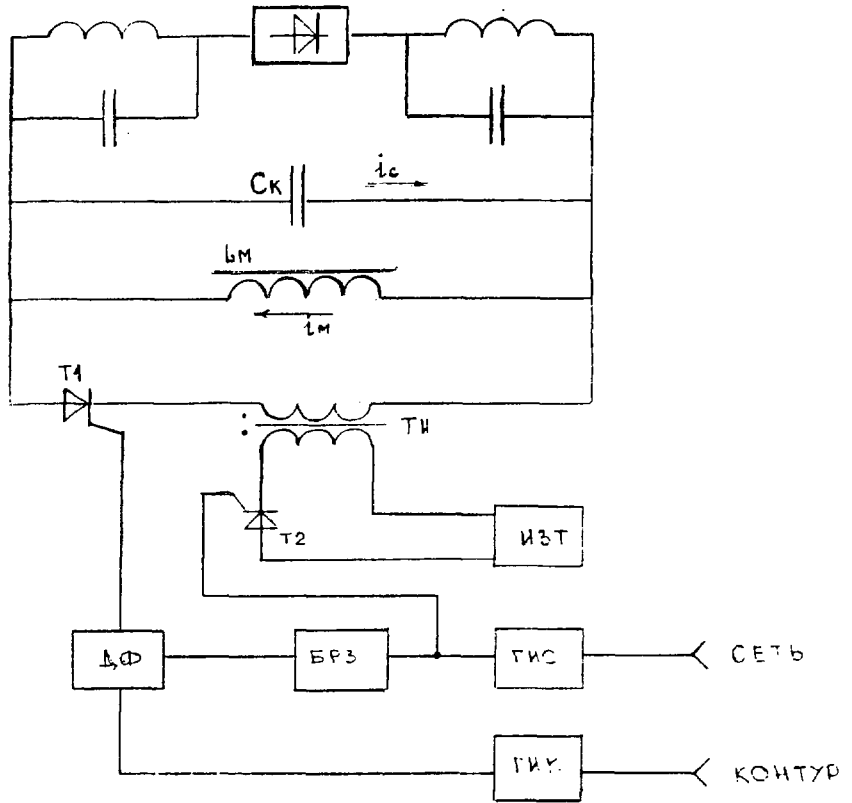


Рис.2.3

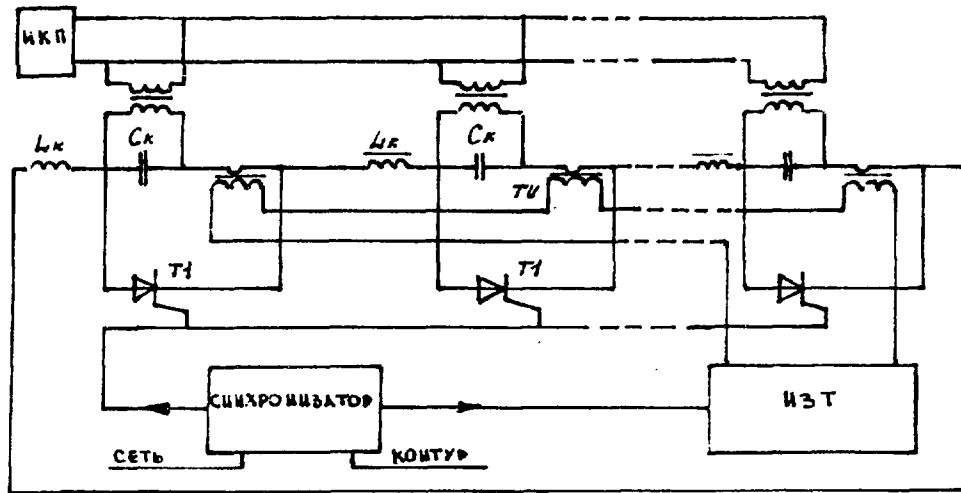


Рис.2.4

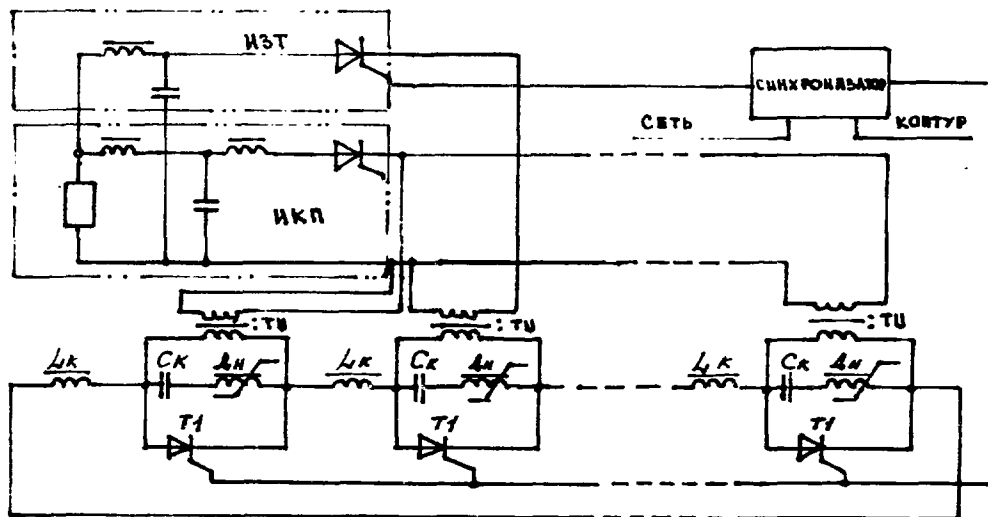


Рис.2.5

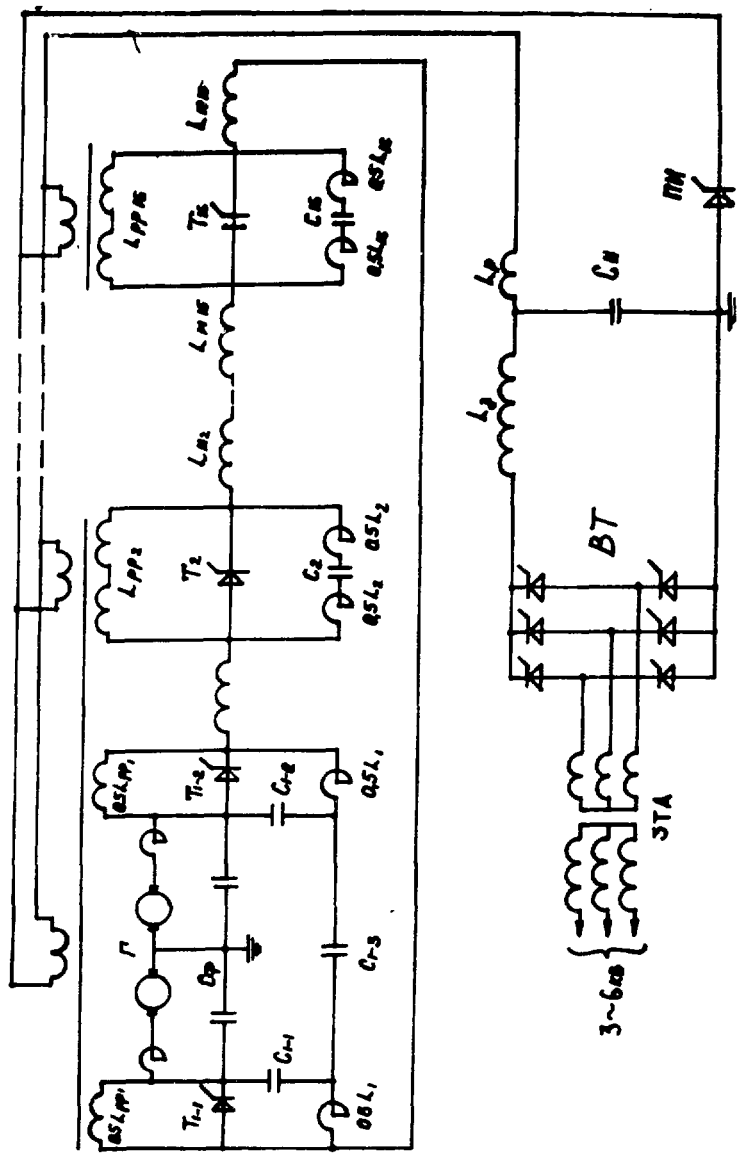


FIG. 3.1

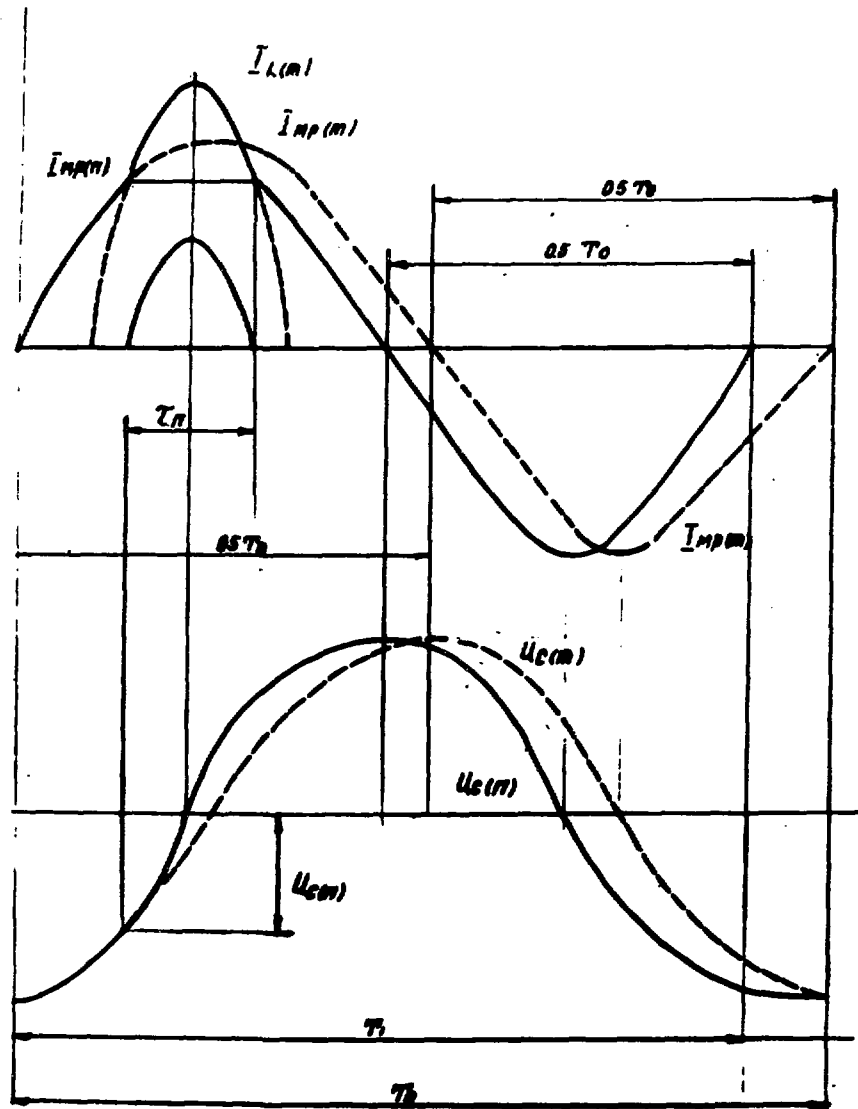


FIG. 3.2

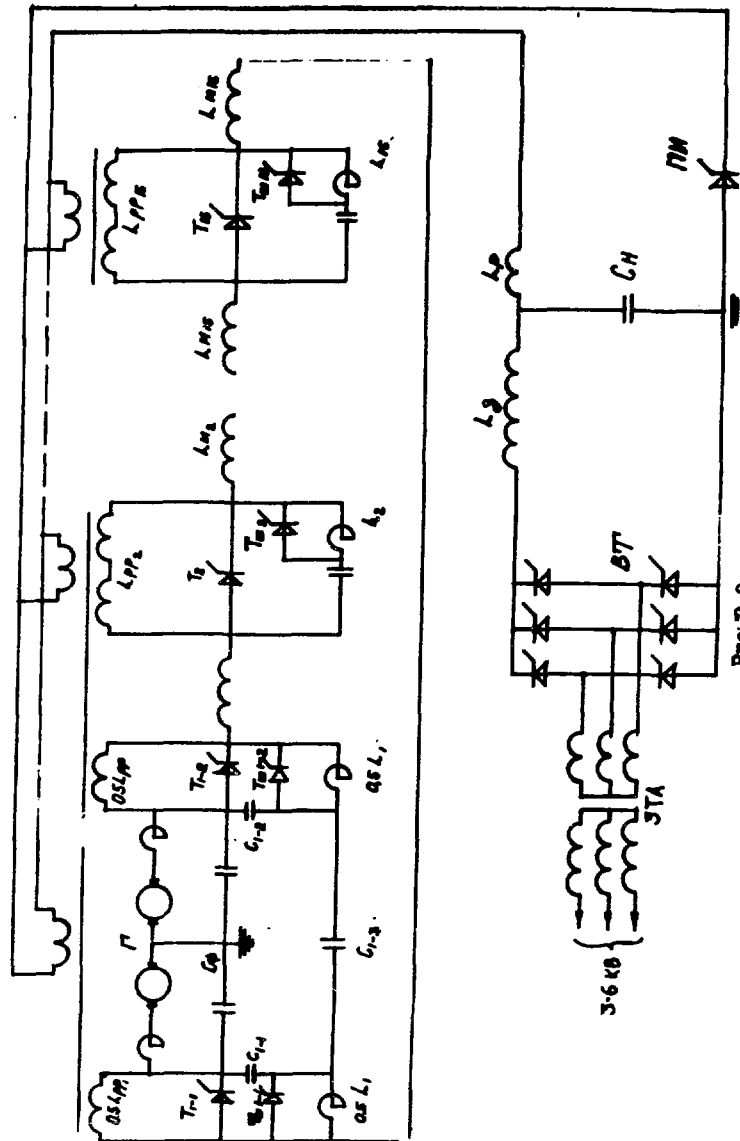


FIG. 3.3

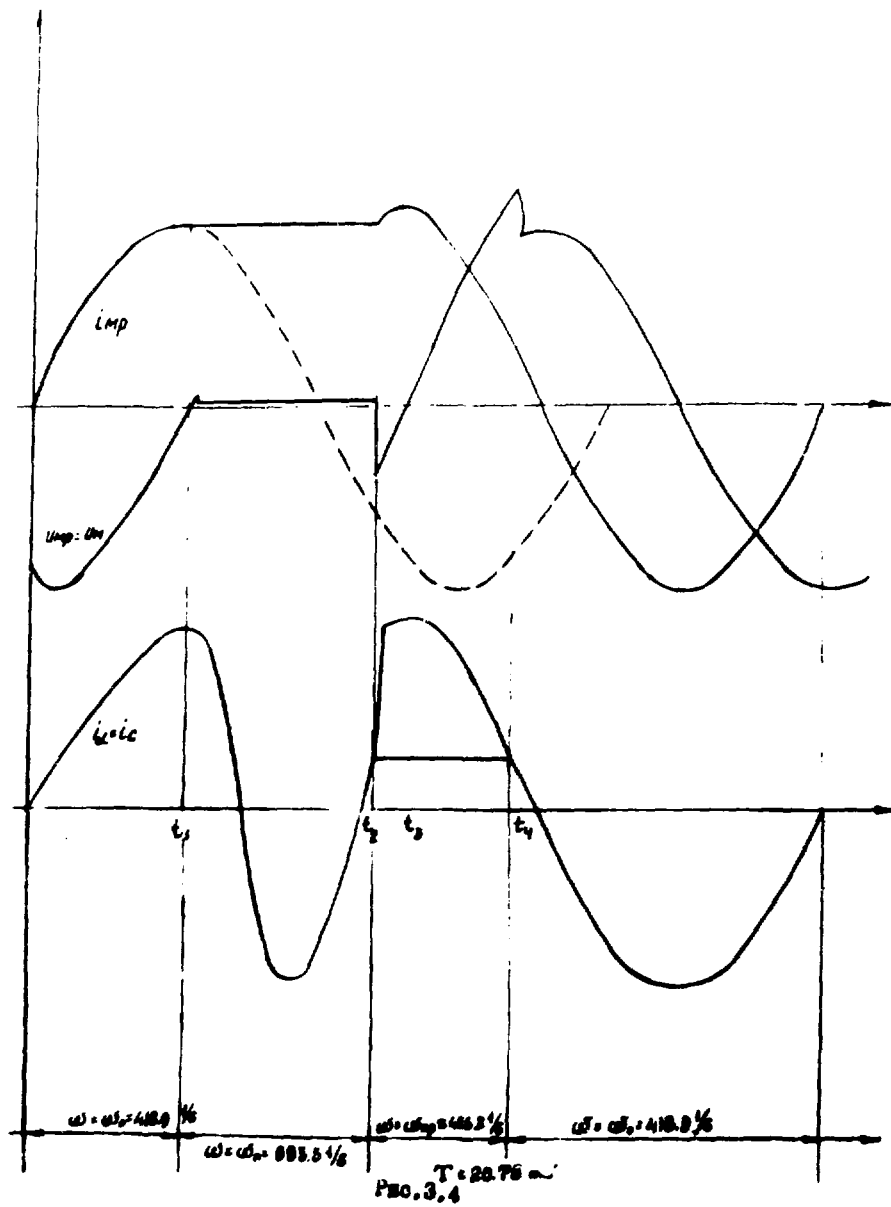
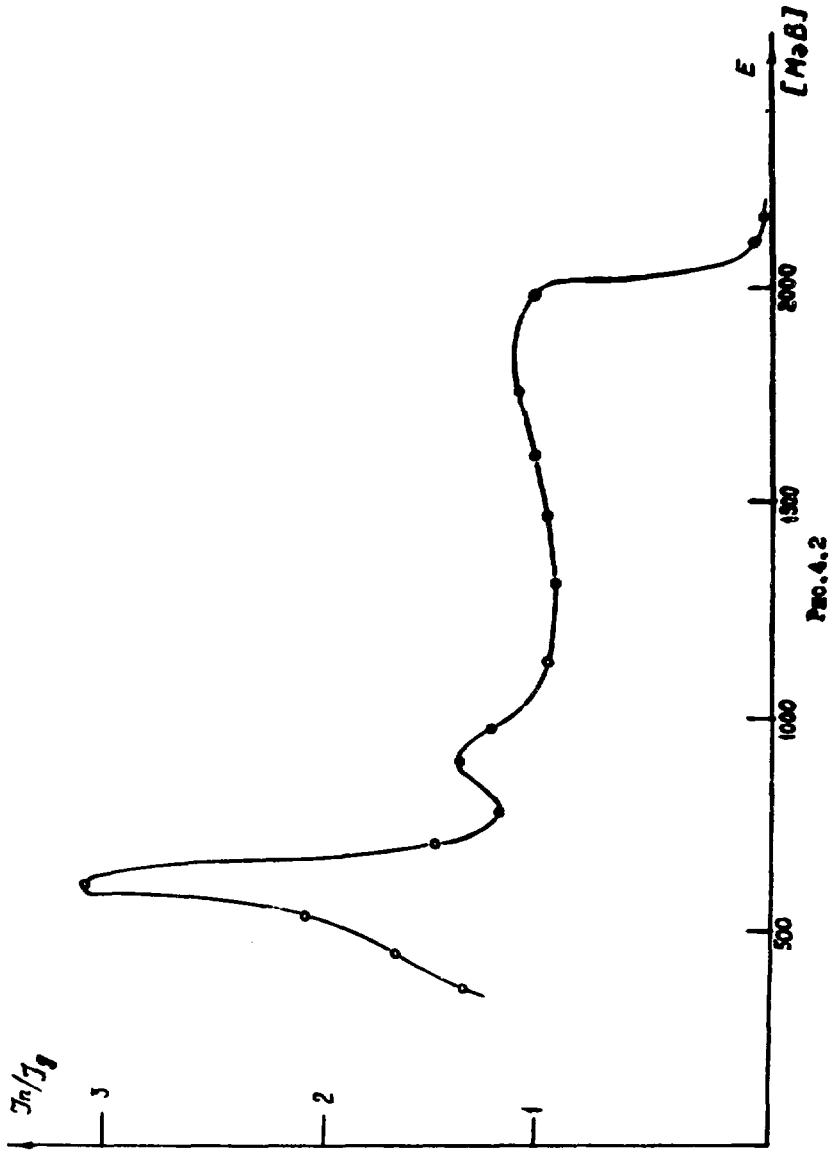




Рис. 4. I



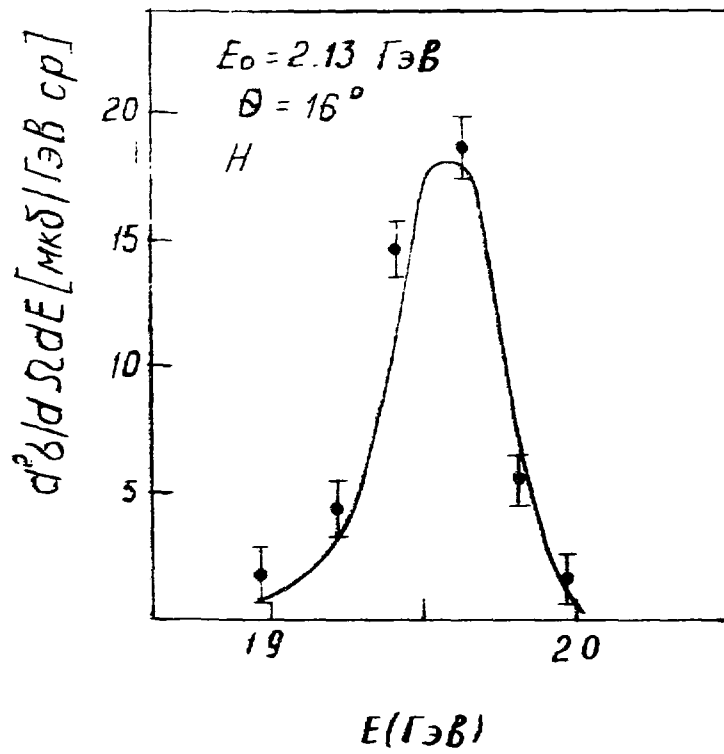


Рис. 4.3

ПОДПИСКИ К РИСУНКАМ

Рис.2.1 Принципиальная схема системы синхронизации и формирования плато тока электромагнита, путем закорачивания емкости резонансного контура и дополнительных индуктивностей.

Рис.2.2 Упрощенная электрическая схема формирования плато в экстремумах тока электромагнита.

Рис.2.3 Принципиальная схема формирования плато тока и синхронизации с сетью с последовательным выключением ключа закорачивающего ток электромагнита.

Рис.2.5 Принципиальная схема формирования плато тока магнита с параллельным выключением шунтирующего ключа

Рис.3.1 Принципиальная схема формирования плоской вершины магнитного поля методом срезания вершины синусоиды тока

Рис.3.3 Принципиальная схема формирования плоской вершины магнитного поля методом добавления плоского участка к вершине синусоиды тока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есин С.К. Обзор проектов ускорителей на энергию больше 100 ГэВ. Ереван, 1963, АН Арм.ССР, с.490-501.
2. Амагуни А.Ц., Бадалян Э.А., Барышев А.И. и др. Проект модернизации электронного синхротрона Ереванского физического института. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1978, т.2, с.213-219.
3. Кроули-Миллинг М.К. Предложения по дальнейшему увеличению энергии электронного синхротрона. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: ВИНТИ, 1970, т.1 с.60-66.
4. Адо Ю.М., Беловинцев К.А., Беляк А.Н. и др. Накопление частиц в синхротроне. Труды международной конференции по ускорителям. М.: Атомиздат, 1964, с.355-357.
5. Беспалов В.И., Кубарев А.И. Формирование квазипрямоугольных импульсов тока в индуктивной нагрузке. Радиотехника, 1962, т.17, с.39-47.
6. Bothe W. Langer Teilchenpuls durch Oberwellen Überlagerung. Hamburg, 1968, EV31-10p.
7. Hemme J. Vorschlag einer Schaltung, die eine langen Teilchenpuls erzeugt (Flat Top). Hamburg, 1967-14 (Preprint) DESY.
8. Мартиросян Г.А. Формирование плоской вершины магнитного поля электронного синхротрона. Автореферат дис. на соиск. учен. степени кандидата техн. наук, Ереван, 1979, с.150.

9. Гончаренко В.П., Гусев О.А., Лебедев А.П. и др. Система формирования плоской вершины магнитного поля электронного синхротрона ЕрФИ. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Томск. Изд. Томского университета, 1972, с.17.
10. Мартиросян Г.А., Садоян К.А., Гончаренко В.П. и др. Особенности построения систем питания электронных синхротронов при возбуждении контура электромагнита синусоидальным напряжением сети. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1983, т.2, с.131-134.
11. Гусев О.А. Способ синхронизации работы синхротрона. А.С. № 293563, 1972, № 27(БИ).
12. Гусев О.А., Гончаренко В.П., Лебедев А.П. Устройство синхронизации колебательного контура электромагнита синхротрона с напряжением питающей сети. А.С. № 320243, 1973, № 29(БИ).
13. Гончаренко В.П., Гусев О.А. Устройство синхронизации и формирования плоской вершины магнитного поля синхротрона. А.С. № 599743: - БИ, 1979, № 35.
14. Гончаренко В.П., Гусев А.П., Лебедев А.П. Устройство формирования плоской вершины магнитного поля синхротрона. А.С. № 679092: - БИ, 1980, № 10.
15. Гончаренко В.П., Гусев О.А. Способ синхронизации работы синхротрона. А.С. № 835312: - БИ, 1982, № 14.
16. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Армаганян А.А. и др. Экспериментальное оборудование и методика для создания и исследования параметров квазимонохроматических и поляризованных пучков фотонов Ереванского синхротрона. Препринт ЕФИ-523(10)-82, Ереван, 1982.

17. Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Запольский Н.А. и др. Влияние временных характеристик вывода пучка на спектры когерентного тормозного излучения. ПТЭ, 1985, № 2, с.39-42.
18. Багдасарян Д.С., Бояхчян Е.М., Казарян Г.Б. и др. Характеристики установки "Электрон". ПТЭ, 1986, № 5, с.36.
19. Багдасарян Д.С., Бояхчян Е.М., Казарян Г.Б. и др. Характеристики выведенного пучка e_4^- Ереванского синхротрона. Препринт ЕФИ-793(20)-85, Ереван, 1985.

Рукопись поступила 7 июня 1990 г.

В. А. АЙРАПЕТЯН, Б. А. ВАРТАНЯН, Г. К. ГАЗАРЯН, К. Д. ДАВТЯН,
А. С. ДИВАНЯН, Н. А. ЗАПОЛЬСКИЙ, Г. Б. КАЗАРЯН, А. А. МАРКАРЬЯН,
Г. А. МАРТИРОСЯН, А. В. МКРТЧЯН, Г. Г. МКРТЧЯН, А. С. МИНАСЯН,
В. Ц. НИКОГОСЯН, А. В. ОГАНЕСЯН, К. А. САДОЯН, В. Э. САРОЯН,
С. П. ТАРОЯН, Р. Г. ХАЧАТРЯН, М. Ю. ХОЕЦЯН, В. П. ГОНЧАРЕНКО,
О. А. ГУСЕВ, И. А. КОНСТАНТИНОВ

ЕРЕВАНСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ СИНХРОТРОН В РЕЖИМЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ПЛАТО МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА

Редактор Л. П. Мукаян

Технический редактор А. С. Абрамян

Подписано в печать 24/ХП-90г.

Формат 60x34/16

Офсетная печать. Уч. изд. л. I, 5

Тираж 299 экз. Ц 22 к.

Зак. тип. № 320

Индекс 3649

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, ул. Братьев Алиханян, 2

**The address for requests:
Information Department
Yerevan Physics Institute
Alikhanian Brothers 2,
Yrevan, 375036
Armenia, USSR**

ИНДЕКС 3649



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ