



К.14

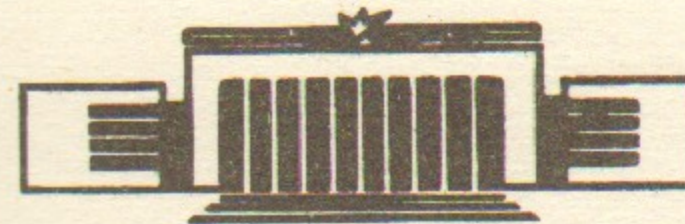
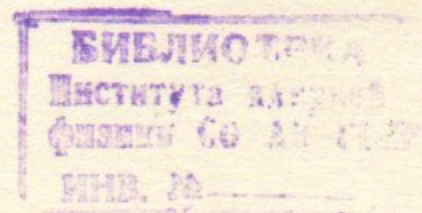
5

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

И.В.Казарезов, А.Ф.Серов, Ю.Ф.Токарев,  
В.Д.Юдин

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НА  
ТИРИСТОРАХ ДЛЯ ПИТАНИЯ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ПРЕПРИНТ 84-12



НОВОСИБИРСК

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НА ТИРИСТОРАХ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Казарезов И.В., Серов А.Ф., Токарев Ю.Ф., Юдин В.Д.

АННОТАЦИЯ

Описан модульный импульсный источник на ток в импульсе до 10 кА, с длительностью полуволны тока не менее 22 мкс. Диапазон рабочих напряжений от 1 до 15 кВ. Частота рабочих циклов до 10 герц. Приводятся результаты испытания источника совместно с ускорителем типа ЭЛИТ-1.

## В В Е Д Е Н И Е

Для генерации СВЧ большой мощности, питающей ускоряющие структуры комплекса ВЛЭШ [1], в Институте ядерной физики СО АН СССР разработаны и находятся в эксплуатации в течение нескольких лет импульсные ускорители электронов типа ЭЛИТ-Л (ЭЛИТ-Л [2], ЭЛИТ-Л2 [3]). На первом этапе работ в обоих ускорителях емкостные накопители энергии заряжались через зарядные сопротивления с помощью фазового тиристорного регулятора. В качестве коммутатора первичного контура в ЭЛИТ-Л2 используются шесть параллельно включенных тиратронов ТТИ-2500/50, в ЭЛИТ-Л сначала использовался игнитронный разрядник ИРТ-4, а в дальнейшем - последовательно-параллельно включенные тиристоры Т-160 [4]. Частотные свойства данных коммутаторов не позволили построить схему с рекуперацией энергии. Поэтому в том и другом случае использовалась схема коммутатора с балластным сопротивлением в первичной цепи. В нем выделялась значительная часть энергии, оставшаяся во вторичном контуре по окончании импульса тока пучка. Часть энергии при этом рассеивалась в контурах в процессе затухающих связанных колебаний. В целом КПД ускорителей не превышал 30%.

Для работы всего комплекса ВЛЭШ предполагается использовать большое количество одновременно работающих генераторов электронного пучка типа ЭЛИТ-Л. Поэтому важнейшее значение приобретают такие их характеристики, как надежность, стабильность питающего напряжения, высокий КПД, дешевизна и доступность комплектующих изделий. Вышеперечисленные характеристики во многом определяются типом высоковольтного зарядного устройства и коммутатором первичного контура ускорителя.

В связи с этим была предпринята попытка разработать опытный образец тиристорного источника питания, который в дальнейшем мог бы служить прототипом источника питания ускорителей ЭЛИТ-Л для комплекса ВЛЭШ.

В результате был получен унифицированный модульный источник питания, в состав которого входят два типа модулей:

- управляемое вычислительной машиной стабилизированное зарядное устройство;

- тиристорно-диодный коммутатор с конденсаторной батареей.

Отработка и наладка источника проводилась на действующем ускорителе типа ЭЛИТ-Л, подвергнутом некоторой доработке: изменен коэффициент трансформации и длительность полуволны ускоряющего напряжения, введен дополнительный экран, защищающий первичную цепь от пробоев по вторичному контуру.

### ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО

Упрощенная принципиальная схема устройства представлена на рис.1. Схема содержит повышающий сетевой трансформатор (Tr); высоковольтный выпрямитель, собранный по схеме Ларионова (Д7+Д30); дроссель, ограничивающий зарядный ток, (Др). Устройство отличается от описанных [5] способов управления регулирующими тиристорами (Д1+Д6) в первичной цепи трансформатора. Управление осуществляет специальный электронный блок, ниже предлагается описание его работы.

На рис.2 представлена произвольная полуволна линейного сетевого напряжения. В начальный период процесса заряда емкости, когда напряжение на ней значительно отличается от требуемого, тиристоры, обеспечивающие ток в зарядной цепи, запускаются в определенной исходной фазе запуска ( $t_H$  на рис.2). С каждым последующим полупериодом сети момент запуска равномерно сдвигается относительно кривой сетевого напряжения в сторону более раннего включения тиристоров. Начальная фаза запуска и скорость последующего изменения фазы могут перестраиваться. На втором этапе, когда основная доля энергии в емкости запасена, устройство переводится в другой режим работы. С этого момента электронный блок управления для каждой полуволны каждой фазы сетевого напряжения определяет время включения соответствующих тиристоров следующим образом. В блоке мгновенное значение напряжения сети, пересчитанное ко вторичной цепи трансформатора ( $KU(t)$  на рис.2), сравнивается с суммой двух величин - текущим значением напряжения на емкости ( $U_C$ ) и напряжением упреждения ( $U_y$ ). В момент выполнения этого равенства на отрицательном спаде кривой сетевого напряжения (точка А и время  $t_T$  на рис.2) включаются соответствующие тиристоры.

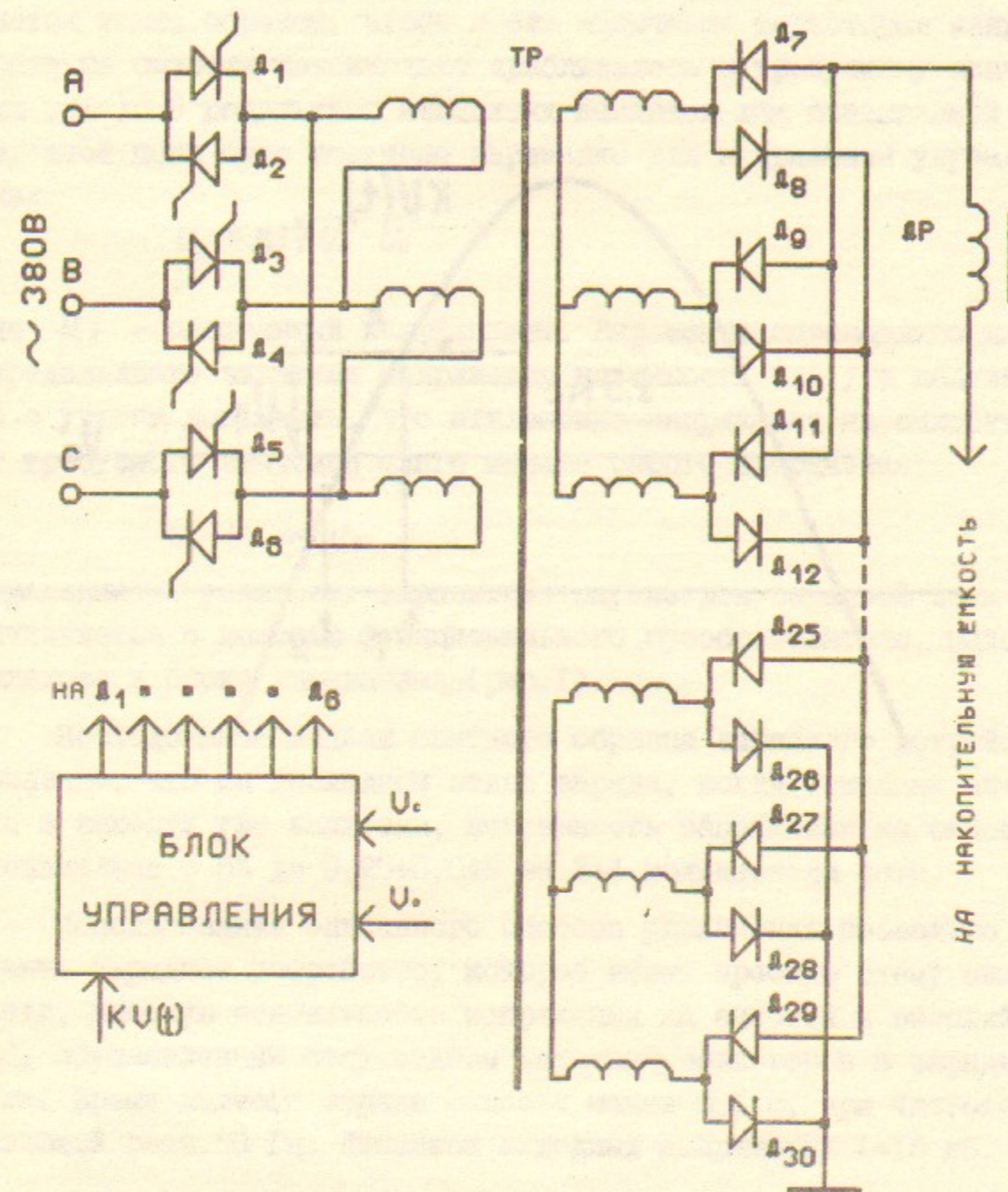


Рис.1. Упрощенная принципиальная схема зарядного устройства. Д1+Д6 - ТЛ-200-6; Tr - трансформатор с эпоксидной изоляцией, коэффициент трансформации при указанном включении близок к 50-ти; Д7+Д30 - КП201Е; Др - дроссель с эпоксидной изоляцией ( $L = 0,5 \text{ Гн}$ ).

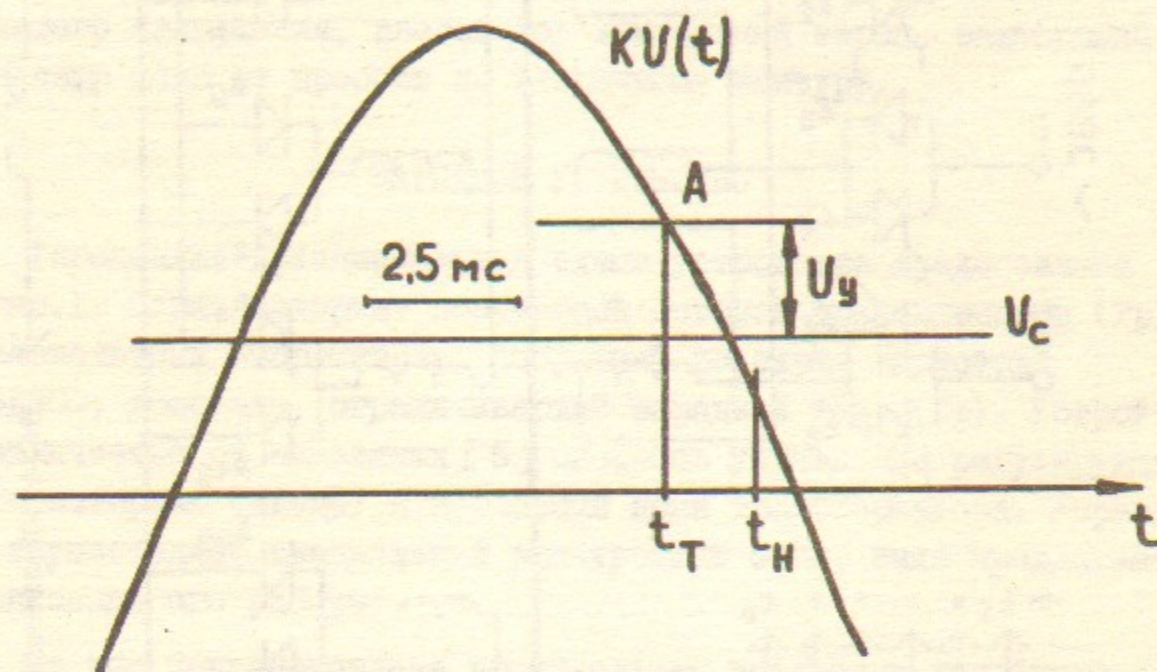


Рис.2. Кривая произвольной полуволны линейного питающего напряжения, пересчитанного ко вторичной цепи трансформатора зарядного устройства.

Величина напряжения упреждения ( $U_y$ ) всякий раз определяется таким образом, чтобы после включения тиристоров напряжение на емкости максимально приближалось к требуемому значению ( $U_c$ ). В результате несложных выкладок для описываемой зарядной цепи было получено выражение для напряжения упреждения:

$$U_y = K1 \sqrt[3]{U_0 - U_c}$$

где  $K1$  — постоянный коэффициент. Выражение справедливо для определенного значения напряжения на емкости ( $U_c$ ) и получено с учетом допущения, что отклонение напряжения на емкости от требуемого значения много меньше самого напряжения:

$$U_0 - U_c \ll U_c$$

Выражение не учитывает паразитных параметров зарядной цепи и вычисляется с помощью функционального преобразователя, находящегося в блоке управления (рис.1).

Исследование модели опытного образца зарядного устройства показало, что на последнем этапе заряда, когда основная энергия в емкости уже запасена, погрешность напряжения на емкости уменьшалась с 5% до  $0,20 \pm 0,04\%$  за  $3+4$  полупериода сети.

Использование описанного способа управления позволило получить зарядное устройство, которое имеет простую схему силовой части, высокую стабильность напряжения на емкости и высокий КПД, обусловленный отсутствием активных резисторов в зарядной цепи. Время полного заряда емкости менее 0,1 с, при частоте питающей сети 50 Гц. Диапазон выходных напряжений  $1+15$  кВ.

#### ТИРИСТОРНЫЙ КОММУТАТОР

При разработке коммутатора были выставлены следующие требования:

- коммутатор должен обеспечивать возврат в емкость первичного контура энергии, оставшейся во вторичном контуре ускорителя по окончании импульса тока пучка;

- конструктивное исполнение — модульное, что позволяет компоновать коммутаторы на требуемую энергоемкость и ток;

- коммутатор должен строиться из стандартных элементов и быть простым и технологичным.

Коммутатор состоит из двух одинаковых модулей. Схема одного из них и схема подключения модулей к ускорителю представлены на рис.3. Каждый модуль имеет свою конденсаторную батарею (C1+C9). Энергия, запасенная в батарее, передается на ускоритель через две тиристорные сборки, выполненные на тиристорах ТЧИ-100-6-478. Использование тиристоров более высокого класса позволит соответственно уменьшить количество тиристор.

Возврат энергии, оставшейся во вторичном контуре ускорителя по окончании импульса тока пучка осуществляется через высоковольтную диодную сборку и сопротивления R2 и R3, защищающие тиристорные сборки от взаимного шунтирования. Дроссели насыщения (L1, L2) обеспечивают задержку появления тока в ветвях на 300 нс (при напряжении 15 кВ) до полного открывания всех тиристоров. Цепи: R3, C10; R4, C11; R5, C12 подавляют высокочастотные колебания и уменьшают скорость нарастания напряжения на тиристорных сборках в промежуток времени, следующий за запирающим диодной ветви.

Параллельно диодам и тиристорам в ветвях установлены резисторы и конденсаторы. Они обеспечивают равномерное деление постоянной и импульсной составляющих напряжения между отдельными тиристорами и диодами. На рис.4 представлена схема включения отдельного тиристора в сборке. Параллельно каждой паре тиристоров включены варисторы СН2-2А 910 В (на рисунках не показаны), служащие дополнительной защитой от перенапряжений. Все соединения в коммутаторе выполнены коаксиальным кабелем РК 50-17. Запуск тиристоров коммутатора осуществляется через разделительные трансформаторы (Тр, рис.4), первичные обмотки которых образуются высоковольтным кабелем, пронизывающим последовательно сердечники трансформаторов всех тиристоров. Запускающие импульсы формируются специальным тиристорным генератором.

Коммутатор, составленный из двух описанных выше секций, испытывался совместно с ускорителем ЭЛИТ-Л. Общая емкость подключенных накопительных конденсаторов составила 6 мкФ, на-

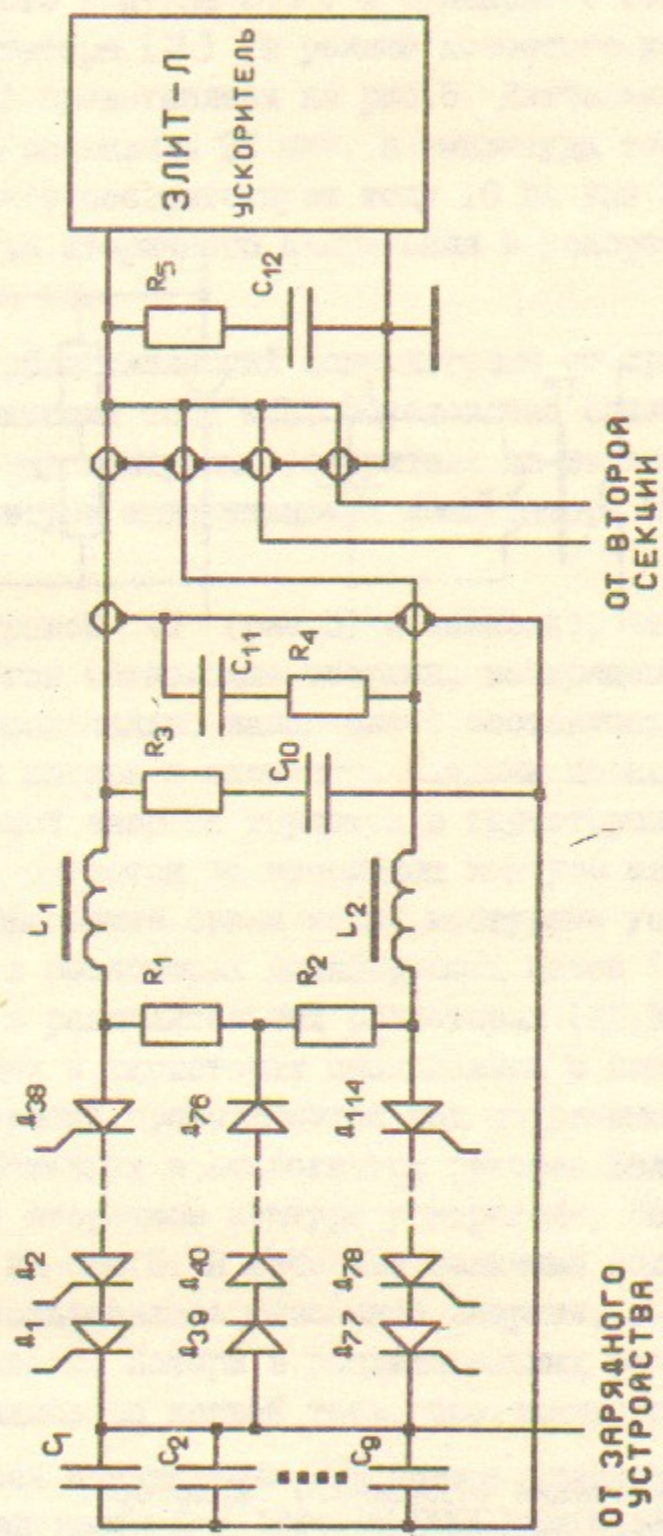


Рис.3. Принципиальная схема модуля коммутатора.  
 Д1-Д38, Д77+Д114 - ТЧИ-100-6-478; Д39+Д76 - ВЧ-200-9; С1+С9 - К75-21 - 30 кВ -  
 - 0,5 мкФ; R1, R2 - 0,2 Ома; R3, R4, R5 - ТВ0-60-51 Ом (R5 - параллельно 2 резис-  
 тора); С10, С11, С12 - ПКТИ - 25 кВ - 0,25 мкФ (С12 - параллельно 2 конденсатора).

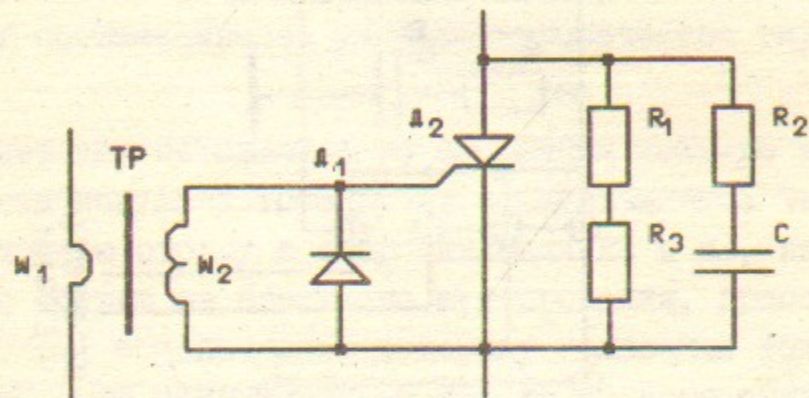


Рис.4. Схема включения отдельного тиристора.  
 Тр - К 32х20х9 (2000 НМ), W1 - 1 виток проводом ПВД,  
 W2 - 30 вит. МГШВ - 0,35; Д1 - Д226; R1, R3 - МЛТ-2 -  
 - 24 кОм, R2 - МОН-2 - 3,9 Ом; С - МБМ - 1000 В -  
 - 0,1 мкФ.

пряжение на них 15 кВ, частота следования импульсов 10 Гц. Осциллограммы напряжения на накопительной емкости ( $U1$ ), емкости вторичного контура ( $U2$ ) и суммарного тока одного из модулей коммутатора ( $I$ ) (в режиме холостого хода, без импульса тока пучка) представлены на рис.5. Длительность рабочего импульса тока составила 22 мкс, а амплитуда тока для каждого модуля 5 кА, что соответствует току 10 кА для всего коммутатора. Амплитуда вторичного напряжения в ускорителе при этом составляла 680 кВ.

Отличие представленных осциллограмм от кривых, характерных для ускорителей типа ЭЛИТ обусловлено снижением коэффициента связи между контурами ускорителя из-за внесения в цепь первичного контура индуктивности коммутатора и подводных кабелей.

Анализ кривой  $U1$  (рис.5) показывает, что эффективность возврата энергии (отношение энергии, возвращенной в первичную емкость к первоначально запасенной) составляет 45%. Приблизительные оценки потерь в элементах системы показали, что 11% от общей запасаемой энергии теряется в тиристорных сборках, 3% - в диодах, 6% остается во вторичном контуре из-за заниженного значения коэффициента связи между контурами ускорителя, 5% рассеивается в резисторах демпфирующих цепей ( $R3+R5$  на рис.3), 10% теряется в разделительных резисторах ( $R1, R2$  на рис.3). Потери в диодах и тиристорах оценивались с помощью calorиметрических измерений, проводившихся над отдельными экземплярами приборов, работающих в аналогичном режиме. Величина энергии, оставшейся во вторичном контуре ускорителя, оценивалась по кривой  $U2$  на рис.5. В качестве величины потерь в демпфирующих цепях использовалась удвоенная энергия, запасаемая в емкостях этих цепей. Потери в разделительных резисторах приблизительно вычислялись по кривой тока, протекающего через них.

Оставшиеся неучтенными 20% потерь включают в себя потери в накопительных емкостях, активные потери в подводных кабелях и контурах ускорителя.

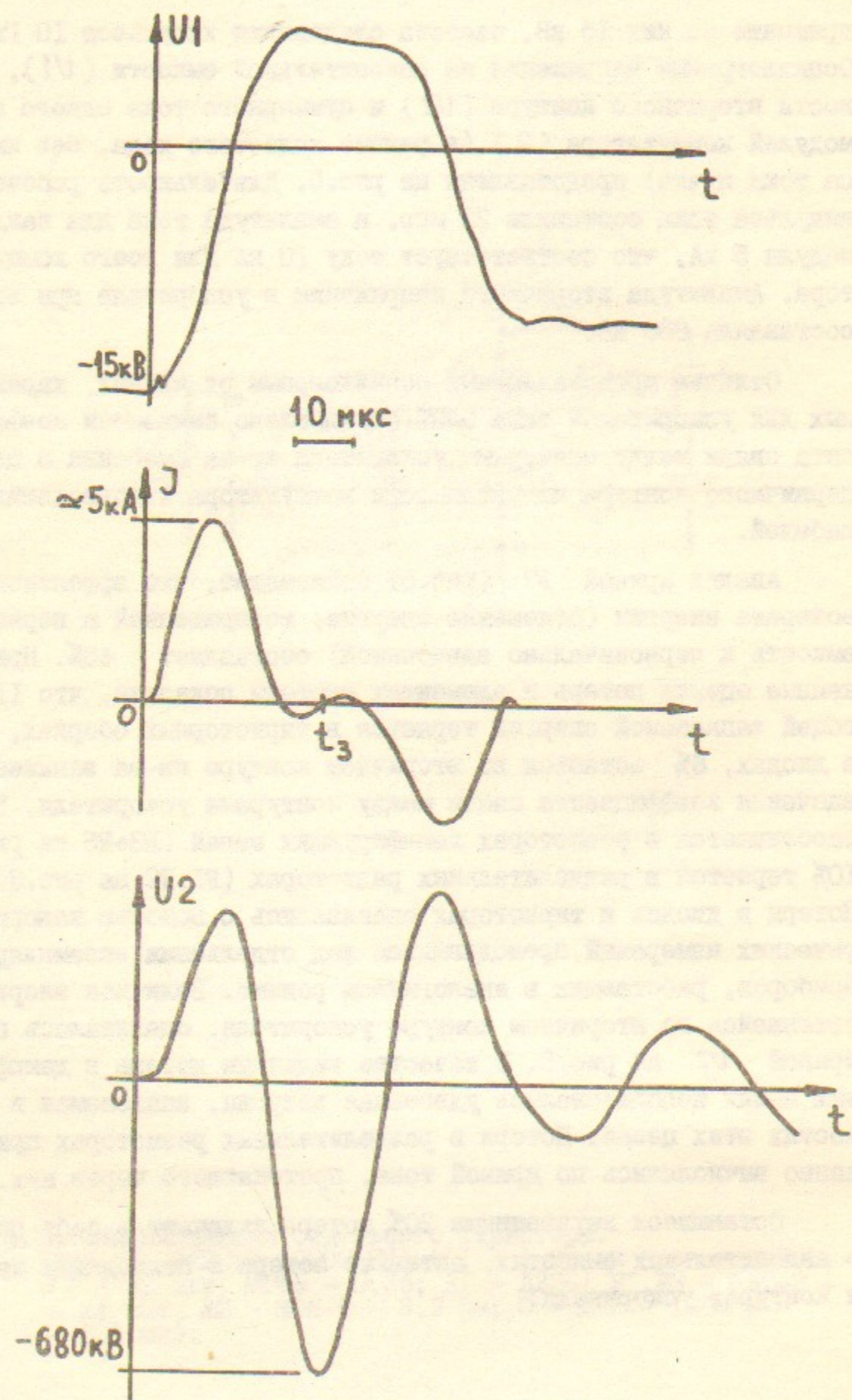


Рис.5. Кривые напряжений и токов в контурах ускорителя ЭЛИТ-Д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсный источник успешно прошел испытания в предложенном выше режиме в течение 30-ти часов. Опыт работы с источником позволяет рассчитывать на создание надежного устройства, предназначенного для производства в больших количествах для применения на комплексе ВЛЭП.

При проектировании ускорителей типа ЭЛИТ-Д, предназначенных для работы с тиристорными коммутаторами должны быть учтены следующие требования:

- длительность рабочего импульса источника предпочтительно иметь  $50+100\ \mu\text{s}$ , это уменьшит активные потери и облегчит режим работы тиристоров;

- ускоритель следует проектировать с завышенным коэффициентом связи, с тем, чтобы индуктивность, вносимая коммутатором, приводила коэффициент к требуемому значению.

Эффективность возврата энергии системы может быть приближена к 60%. Для этого необходимо добиться лучшего согласования контуров ускорителя и обеспечить каждую тиристорную сборку своей диодной ветвью, что позволит исключить из силовых цепей активные сопротивления ( $R_1, R_2$  на рис.3).

В заключении авторы выражают признательность Чернякину А.Д. за полезные советы и Бамбурову Ю.Г. за помощь в проведении экспериментов.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Balakin V.E., Skrinisky A.N. VLEPP Project, Препринт ИЯФ 81-129, 1981.
2. Балакин В.Е. и др. Генератор электронного пучка для макета СВЧ-генератора ВЛЭШ. Вопросы атомной науки и техники, серия "Техника физического эксперимента", Харьков, 1982, вып. I(10), 1-82, с.6.
3. Балакин В.Е. и др. Генератор электронного пучка ЭЛИТ-Л2, IV Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике, т.2, Томск, 1982, с.97.
4. Балакин В.Е. и др. Повышение параметров ускорителя ЭЛИТ-Л: источника питания СВЧ-генератора. IV Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике, т.2, Томск, 1982, с.101.
5. Серов А.Ф. Разработка и исследование систем питания электронно-оптических каналов. Диссертация ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 1980.

И.В.Казарезов, А.Ф.Серов, Д.Ф.Токарев,  
В.Д.Юдин

**МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НА ТИРИСТОРАХ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Препринт  
№ 84-12

Работа поступила -

---

Ответственный за выпуск - С.Г. Попов  
Подписано к печати 7.11-1984 г. МН 04065  
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 12.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90