

30X

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

САЛГУНОВА Надежда Михайловна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ УНИПОЛАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Специальность 05.12.08- "Электронная техника
и приборы"

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1975

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок.

Научные консультанты:

член-корреспондент Академии наук СССР,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор
кандидат технических наук, доцент

А.Е.АЛЕКСЕЕВ;
М.В.ГЕЛЬМАН .

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Б.С.ЯКОВЛЕВ
(г.Челябинск);

кандидат технических наук

А.Г.ГОНЦОВ
(г.Челябинск).

Ведущее предприятие - Троицкий станкостроительный завод.

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " " 1975 г.,
в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней
приборостроительного и энергетического факультетов Челябин-
ского политехнического института им. Ленинского комсомола в
ауд. .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующих-
ся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого
Совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных
печатью, по адресу: 454044, г.Челябинск, 44, проспект им.
В.И.Ленина, 76, Ученому секретарю Совета института.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент

И.А.КОРОЛЕНКО

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. XXIV съезд КПСС поставил перед промышленностью задачу дальнейшего повышения производительности труда на базе новой техники и прогрессивной технологии. Применение прогрессивной технологии в машиностроении, приборостроении, электротехнической промышленности означает не только совершенствование механических способов обработки, но и развитие электрофизических методов размерной обработки материалов, позволяющих решить многие задачи обработки штампов, литейных форм, пресс-форм, твердых сплавов и материалов.

Большое место среди электрофизических методов обработки занимает электроэррозионный, основанный на эрозии металлов под действием энергии электрических разрядов, возникающих периодически между инструментом и заготовкой. Электроэррозионный метод открыт советскими учеными Б.Р.Лазаренко, и Н.И.Лазаренко; в настоящее время он развивается в работах ученых А.Л.Литвица, Б.Н.Золотых, В.Ю.Веромана, С.Н.Баженова, Е.М.Гевинсона, И.С.Рогачева, А.Б.Сосенко, М.Ш.Отто, Б.Г.Гуткина, Л.Я.Попилова и др. Совершенствование электроэррозионного способа идет в направлении повышения производительности, снижения энергоемкости, уменьшения износа инструмента, увеличения чистоты поверхности. В успешном решении поставленных задач важная роль принадлежит генератору униполярных импульсов.

Перспективными являются генераторов на основе тиристорных прерывателей, которые недостаточно исследованы в настоящее время. Их частотный диапазон перекрывает низко- и средне-частотную области; они могут генерировать импульсы заданной формы с регулируемой частотой и скважностью, а в отдельных случаях с регулируемой амплитудой поджигающего импульса без применения специального устройства.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование тиристорных генераторов импульсов для электроэррозионной обработки с регулируемыми параметрами и хорошими энергетическими показателями, выполненных на основе прерывателей постоянного тока.

В связи с этим задачи, решаемые в диссертации, сформулированы следующим образом:

- 1) оценить существующие полупроводниковые генераторы и тиристорные прерыватели постоянного тока и выбрать наиболее приемлемые схемы тиристорных прерывателей для построения генераторов;
- 2) выполнить анализ электромагнитных процессов в тиристорных генераторах с последовательным ключом с зависимой и невависимой коммутацией и разработать инженерную методику их расчета;
- 3) обосновать целесообразность применения для электроэрозионной обработки схем генераторов с параллельным ключом и источником тока, выполнить анализ электромагнитных процессов в них и разработать инженерную методику расчета;
- 4) исследовать тиристорные генераторы импульсов различных типов на электроэрозионном станке и определить области их применения.

Общая методика выполнения исследований. При исследовании сочетались методы теоретического анализа и экспериментального исследования. Для анализа схем прерывателей применены методы припасовывания и конечноразностные уравнения, а результаты расчетов представлены в виде nomogramm в относительных единицах. Проверка методик расчета выполнялась на макетах тиристорных генераторов импульсов. Экспериментальные исследования макетов проводились на эквивалентную активную нагрузку и на эрозионный промежуток электроэрозионного станка типа 4723.

Научная новизна. Выполнен анализ электромагнитных процессов в тиристорных прерывателях с последовательным ключом при работе на эрозионный промежуток и разработана инженерная методика расчета их по nomogrammам. Показана перспективность применения генераторов с параллельным ключом и источником тока, выполнен анализ электромагнитных процессов в них при работе на эрозионный промежуток и разработана инженерная методика расчета их по nomogrammам. Выполнено сравнение трех генераторов с последовательным и параллельным ключом и определены области работы генераторов по току, частоте, скважности.

Практическая ценность. Предложенные методы расчета использованы при создании 3-х макетов тиристорных генераторов импульсов. Предложена схема тиристорного генератора импульсов с параллельным ключом, в которой отсутствуют активные ограничивающие сопротивления и создается поджигающий импульс без применения дополнительного устройства. Внедрение этой схемы позволит повысить энергетические показатели работы генераторов. Разработанные генераторы успешно прошли электротехнологические испытания в отраслевой научно-исследовательской лаборатории высокопроизводительных методов обработки Челябинского политехнического института.

Апробация работы. Диссертационная работа и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на:

Всесоюзном совещании по вентильным преобразователям частоты, Свердловск, 1969 г.;

УП-И Всесоюзной научно-производственной конференции "Эльфа-71" по электрофизической и электрохимической обработке материалов, Ленинград, 1971 г.;

техническом совещании в консультативно-информационном центре Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков (ЭНИМС) по электрофизикохимическим методам обработки на тему: "Состояние и техническое направление совершенствования генераторов импульсов для электроаэрозионных копирально-процессочных станков", Москва, 1973 г.;

второй и третьей научно-технических конференциях Уральского политехнического института им. С. М. Кирова на секции техники высоких напряжений и преобразователей высокой частоты, Свердловск, 1968, 1970 гг.;

научно-технических конференциях Челябинского политехнического института на секции электропривода и автоматизации промышленных установок, Челябинск, 1967, 1968, 1970 гг.

Публикация. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 13 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, приложения и содержит 132 страницы машинописного текста, 48 рисунков, 17 таблиц, список использованной литературы из 112 наименований и приложение на 35 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору полупроводниковых генераторов импульсов (ГИ) для электроэрозионной обработки униполярными импульсами со скважностью 1,3 - 5 и частотой от сотен Гц до сотен кГц, анализу и сравнению разных типов ГИ и анализу схем тиристорных прерывателей постоянного тока.

Разработка полупроводниковых генераторов ведется коллективами ряда организаций: ЭНИМС, Харьковского политехнического института им. Ленина, специального проектно-конструкторского технологического бюро электрообработки (СПКТБЭО), Запорожского электроаппаратного завода, проектного института автомобильного транспорта и др.

В низкочастотном диапазоне ($f_{\text{нч}} < 0,3 \text{ кГц}$) наибольшую производительность имеют тиристорные генераторы типов ТР-250-0,15, ЛЭ-605, выполненные на основе управляемых выпрямителей. В средне- и высокочастотном диапазонах ($f_{\text{ср}} = 0,3 - 1 \text{ кГц}, f_{\text{вч}} = \text{единицы - сотни кГц}$) применяются транзисторные отечественные генераторы типов ШГИ, ГТИ, тиристорный ЛЭ-707, зарубежные транзисторные типов ELP4 ,

Izopulse . Из навиганных генераторов меньший износ электродинструмента имеет место при работе генераторов типа ШГИ благодаря прямоугольной форме импульсов и формированию защитных импульсов.

При конструировании генераторов проявляется тенденция охвата диапазона частот: для грубых режимов - среднечастотного ; для мягких режимов - высокочастотного. К таким генераторам относятся отечественные типа ШГИ, ЛЭ-707, зарубежные типов ELP4 , *Izopulse*, *Siltronics*. Большинство схем полупроводниковых генераторов построено по принципу последовательного ключа с балластным активным токоограничителем сопротивлением.

Дана классификация и проанализированы схемы прерывателей постоянного тока на тиристорах для получения униполярных импульсов: с последовательным и параллельным ключом; с зависимой и независимой коммутацией; с различными способами подключения коммутирующего конденсатора или коммутирующего конденсатора и индуктивности относительно элементов прерывателя.

Анализ схем генераторов и тиристорных прерывателей показал следующее:

1. Для генерирования импульсов большой мощности целесообразно применить прерыватели постоянного тока на тиристорах в связи со следующими недостатками тиристорных генераторов, выполненных на основе управляемых выпрямителей, - а) неудовлетворительной формой тока; б) низким значением к.п.д.; в) малым значением коэффициента мощности; г) нерегулируемой частотой.

2. Для формирования униполярных импульсов в основном применяются последовательные ключи и совсем не рассматриваются прерыватели с параллельным соединением рабочего ключа и нагрузки.

Вторая глава посвящена аналитическому исследованию тиристорных генераторов импульсов с последовательным ключом. В задачу исследования входит определение следующих величин:

- 1) времени t_g , предоставляемого на выключение тиристоров в момент пуска и установившемся режиме;
- 2) максимального напряжения на коммутирующем конденсаторе, тиристорах и диодах;
- 3) среднего и максимального токов через тиристоры и диоды;
- 4) действующих значений токов, напряжений и расчетных мощностей коммутирующих индуктивностей и конденсатора;
- 5) параметров коммутирующих элементов.

Для расчета прерывателей постоянного тока получил применение метод припасовывания. Решение линейных дифференциальных уравнений на интервалах производится классическим, операторным способом или с использованием фазовой плоскости. В литературе

имеется анализ схем прерывателей на активно-индуктивную нагрузку.

Методика расчета схем прерывателей, работающих на активно-индуктивную нагрузку, изложена в трудах Т.А.Главенко, Л.В. Бирениекса, Ю.С.Забродина, Г.А.Белова и др. В то же время в литературе почти не освещены вопросы расчета прерывателей, работающих на аэродинамическую и активную нагрузку.

Для анализа электромагнитных процессов генератора с последовательным ключом применен метод припасоривания. Принципиальная схема генератора с зависимой коммутацией приведена на рис. 1.

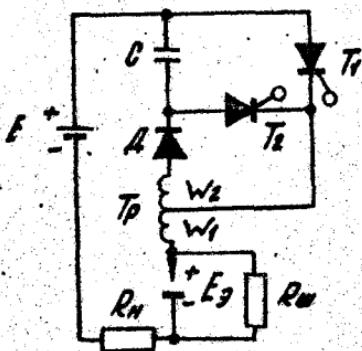


Рис. I

При анализе приняты допущения:

- 1) тиристоры T_1 и T_2 - идеальные ключи;
- 2) индуктивность намагничивания L_m постоянна, а индуктивность рассеяния не учитывается;
- 3) схема питается от источника э.д.с. Рассмотрены первый период и установившийся режим работы на активную нагрузку при $E_3 = 0$ и противо-э.д.с. аэродинамического промежутка E_3 при $R_n \neq 0$.

Для создания методики расчета генератора все искомые ре-

личины представлены в относительных единицах; за базовые величины приняты следующие: период следования импульсов T , напряжение питания E или $E - E_a$, ток $\frac{E}{R_H}$ или $\frac{E - E_a}{R_H}$. Все искомые величины являются функциями безразмерных коэффициентов

$$\tau_0 = \frac{L_m}{R_H T}, \quad \tau_z = \frac{C R_H}{T}, \quad \tau_p = \frac{L_m}{R_H T}, \quad \tau_k = \frac{t_k}{T}. \quad (1)$$

В первом периоде на первом интервале происходит заряд ёмкости C при включении тиристора T_1 . Из операторных уравнений находятся токи и напряжения в ветвях схемы. Найдено время заряда t_k в апериодическом и колебательном процессах: индекс "а" относится к апериодическому процессу, "к" — к колебательному.

$$\frac{t_{1a}}{\tau \tau_z} = \frac{2}{K^2 \sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \cdot \operatorname{arcsinh} \sqrt{\frac{A}{4} - 1}, \quad \frac{t_{1k}}{\tau \tau_z} = \frac{2}{K^2 \sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \cdot \operatorname{arcsin} \sqrt{1 - \frac{A}{4}}, \quad (2)$$

где $A = \frac{K^2 \tau_0}{\tau_z}$, K — коэффициент трансформации трансформатора.

Значения t_{1a} и t_{1k} позволяют определить напряжение на ёмкости U_{C01} и ток нагрузки в конце 1-го участка.

$$\frac{U_{C01}}{E} = \frac{\sqrt{A}}{K} \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \operatorname{arcsinh} \sqrt{\frac{A}{4} - 1} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{U_{Ck1}}{E} = \frac{\sqrt{A}}{K} \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \operatorname{arcsin} \sqrt{1 - \frac{A}{4}} \right]. \quad (4)$$

Отличие установившегося режима работы состоит в том, что на ёмкости имеется начальное напряжение. Независимо от характера протекания процесса в схеме ток нагрузки спадает к нулю в момент, когда U_C достигает E . Так как ток нагрузки должен прерываться, то начиная со 2-го периода процесс станов-

вится установившимся. В установившемся режиме работы изме-
няются значения t_{1K} , t_{1K} , U_{cat} , U_{cK} :

$$\frac{t_{1K}}{T_{T_2}} = \frac{2}{K^2 \sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \arcsin \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\frac{4}{A} - 1} \cdot \left[\frac{2K}{A(1+K)} - 1 \right]^2 + 1}} ; \quad (5)$$

$$\frac{U_{ca}}{E} = \frac{1}{K} \left[\frac{(2+K)D_1}{\sqrt{1 - \frac{4}{A}}} - K \sqrt{1 + D_1^2} \right] \exp \left[- \frac{\operatorname{arcsinh} D_1}{\sqrt{1 - \frac{4}{A}}} \right] ; \quad (6)$$

$$\frac{U_{cK}}{E} = \frac{1}{K} \left[\frac{(2+K)D_2}{\sqrt{\frac{4}{A} - 1}} - K \sqrt{1 - D_2^2} \right] \exp \left[- \frac{\operatorname{arcsin} D_2}{\sqrt{\frac{4}{A} - 1}} \right] , \quad (7)$$

где

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{[2K - (1+K)A]^2}{(1+K)^2 \cdot (A^2 - 4A)} - 1}} ; \quad (8)$$

$$D_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{[2K - (1+K)A]^2}{(1+K)^2 \cdot (4A - A^2)} + 1}} .$$

Для установившегося режима найдено время, в течение которого к тиристору T_2 прикладывается обратное напряжение.

Второй интервал работы заканчивается в момент включения тиристора T_2 . По значению скважности тока определяется начальный ток для третьего участка. На 3-м интервале происходит выключение тиристора T_1 , сопровождаемое протеканием обратного тока в контуре $C - T_2 - T_1$. Определяется изменение напряжения на коммутирующей емкости $\Delta U_c = \frac{Q_b}{C}$ по изменению заряда на ее обкладках, где Q_b — заряд восстановления. Расчеты, проведенные для различных значений тока и соответствующим им значений коммутирующих емкостей, показали, что изменение напряжения невелико по сравнению с начальным значением $0,5\% U_{co} \ll \Delta U_c \ll 8\% U_{co}$.

После включения тиристора T_1 начинается четвертый интервал работы. Найдены выражения для токов и напряжений на нем. Определены время работы тиристора T_2 и время, предоставленное на выключение тиристора T_1 :

$$\frac{\Delta t_{4a}}{T_{T_2}} = \frac{2}{\sqrt{1-4\beta}} \operatorname{arcsinh} \frac{1}{\beta} \sqrt{1-4\beta}; \quad (9)$$

$$\frac{t_{ba}}{T_{T_2}} = \frac{2}{\sqrt{1-4\beta}} \operatorname{arcsinh} \left[\sqrt{1-4\beta} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{U_{co}}{E} (2 + \frac{U_{co}}{E}) 4\beta - 1}}{4\beta \left(1 + \frac{U_{co}}{E} \right)} \right]; \beta = \frac{k^2 T_2}{T_p} \quad (10)$$

В процессе расчета получены аналитические выражения ис-
ковых токов и напряжений на каждом интервале.

Так как параметры схемы прерывателя определяются транспи-
дентными уравнениями, то для инженерного расчета параметров
разработаны nomogrammy. Построены nomogrammy для определения
времен первого и четвертого интервалов; времен, предоставляемых
на выключение тиристоров T_1 и T_2 ; напряжения на емкости
в конце первого интервала; средних токов диода, тиристо-
ров, нагрузки. Так, на рис.2 приведены nomogrammy для опреде-
ления напряжения на емкости в конце первого интервала

$$\frac{U_{co1}}{E} = f(A, K) \quad \text{и} \quad \frac{U_{co}}{E} = f(A, K); \quad \text{на рис.3 - для}$$

определения времени, предоставленного на выключение тиристора
 T_1 , $\frac{t_b}{T_{T_2}} = f(\beta, \frac{U_{co}}{E})$.

Анализ работы схемы показал, что условия работы тиристо-
ра T_1 тяжелее в первый период, так как для первого перио-
да время t_b меньше (рис.2,3).

Выбор параметров с использованием nomogramm ведется ме-
тодом последовательных приближений для рабочего режима работы
по следующим заданным величинам:

- 1) к.п.д. η ,
- 2) среднему току нагрузки I_3 ,
- 3) противо-э.д.с. E_3 ,
- 4) максимальной частоте следования
рабочих импульсов;
- 5) диапазону скважности импульсов тока через
 T_1 ,
- 6) времени выключения t_b тиристоров T_1 и T_2 ,
типа которых известен заранее.

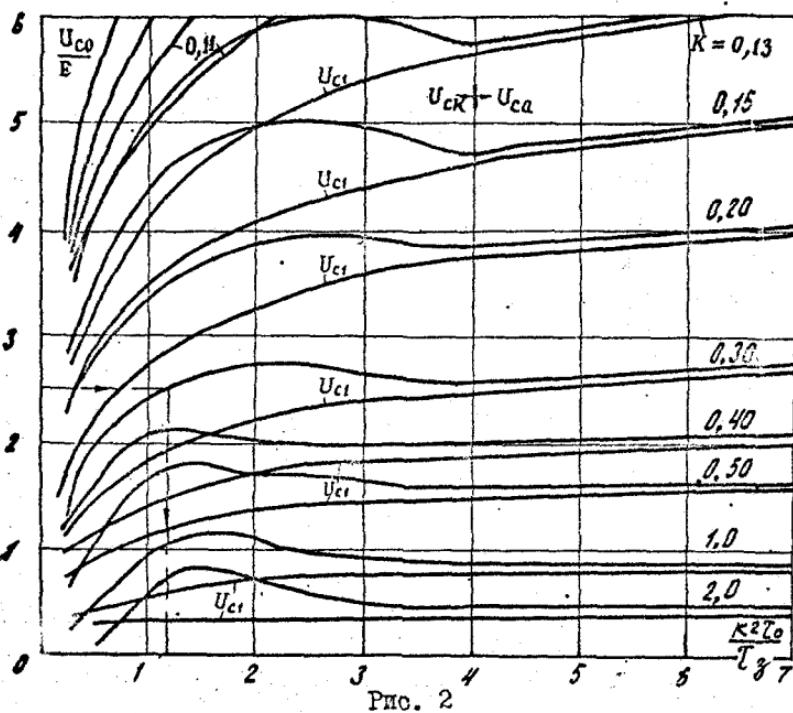


Рис. 2

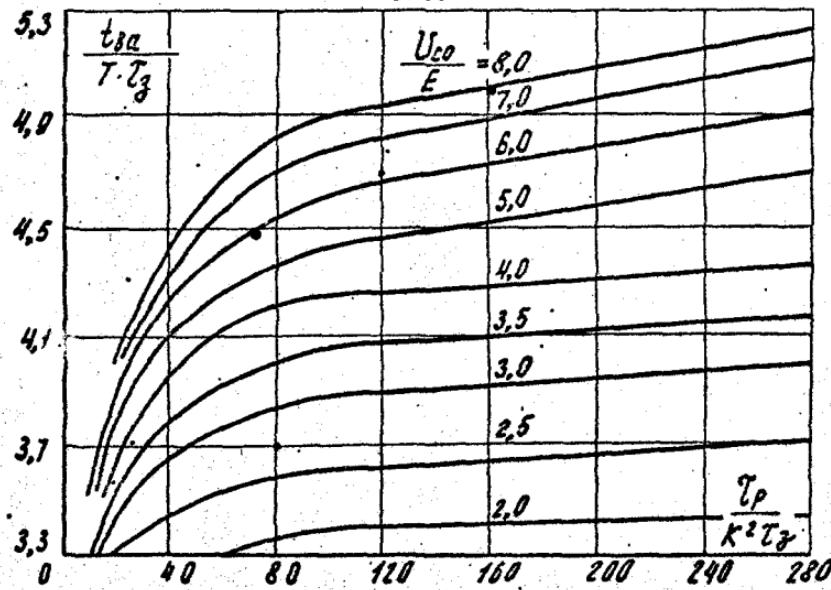


Рис. 3

Действующие значения токов, напряжений и мощностей вычисляются аналитически.

Диапазон скважностей тока q_1 задается в зависимости от верхней частоты по зависимости предельной частоты импульсов от q_1 . Она построена для тиристоров с временем восстановления 10 и 100 мкс и приведена на рис. 4, где кривые 1 относятся к генератору с зависимой коммутацией. Каждая точка кривой определяет частоту, менее или равной которой можно работать с заданной скважностью. Если выходные импульсы генерируются на нескольких фиксированных частотах, то для каждой можно установить диапазон изменения скважностей q_1 .

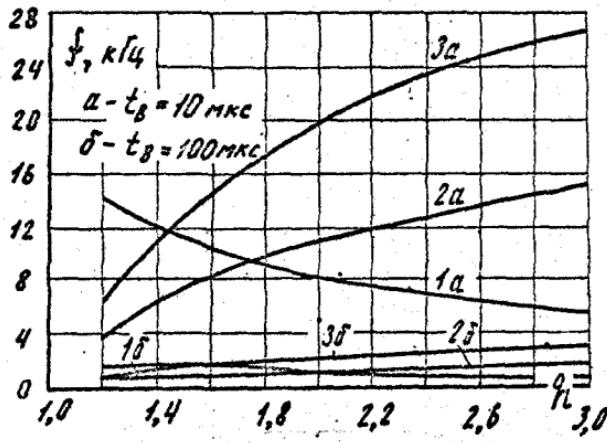


Рис. 4

Номограммы позволяют рассчитать искомые величины в режимах холостого хода и короткого замыкания зазоровенного промежутка. Показано, что целесообразно выбрать такое значение K , при котором перезаряд емкости C через тиристор T_1 носит колебательный характер, а через тиристор T_2 - апериодический и обратное напряжение U_{co} , прикладываемое к тиристору T_1 , имеет величину порядка 40-50 В, достаточную для ускорения выключения тиристора; необходимо проверять условия работы тиристора T_1 в первом периоде.

Методика исследования генератора с последовательным ключом и независимой коммутацией аналогична методике исследования первой схемы. Принципиальная схема показана на рис.5.

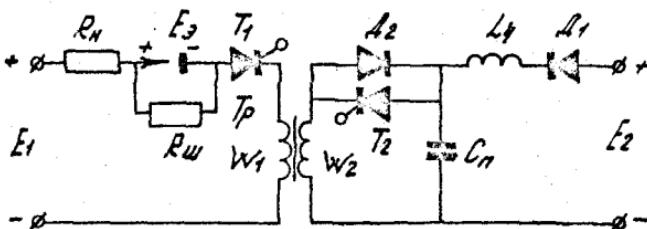


Рис. 5

К первому периоду работы контура нагрузки емкость заряжена до начального напряжения U_{co} за счет предварительного включения источника E_2 . В результате расчета получены выражения для времени $\frac{t_b}{T_1}$, предоставляемого на выключение тиристора T_1 ; наибольшего напряжения на емкости $\frac{U_{cm}}{U_{co}}$ во времени работы тиристора T_2 ; начального напряжения на емкости $\frac{U_{co}}{U_{cm}}$; времен работы тиристора T_2 и диода D_2 ; максимального $\frac{i_{cp}}{i_{2m}}$ и среднего $\frac{i_{cp}}{I_0}$ токов в контуре коммутации; среднего тока I_0 нагрузки.

Для расчета искомых величин построены nomogramмы. Так, на рис.6 приведены nomogramмы для определения $\frac{t_b}{T_1}$, $\frac{U_{cm}}{U_{co}}$, $\frac{i_{2m}}{I_0}$, $\frac{I_{cp}}{I_0}$; где $T = 2\pi \sqrt{L_m C}$, $i_{2m} = k i_{cm}$, $I_{cp} = k I_{cp}$; k - коэффициент трансформации трансформатора;

$A = \frac{U_{co}}{K E}$ - коэффициент преышения коммутирующего напряжения;

$P' = \sqrt{\frac{L_m}{C}}$ - волновое сопротивление контура коммутации;

$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L_m}{C}}$ - добротность зарядного контура емкости.

Разработана методика расчета генератора с использованием nomogramм и аналитических соотношений. Заданные и искомые

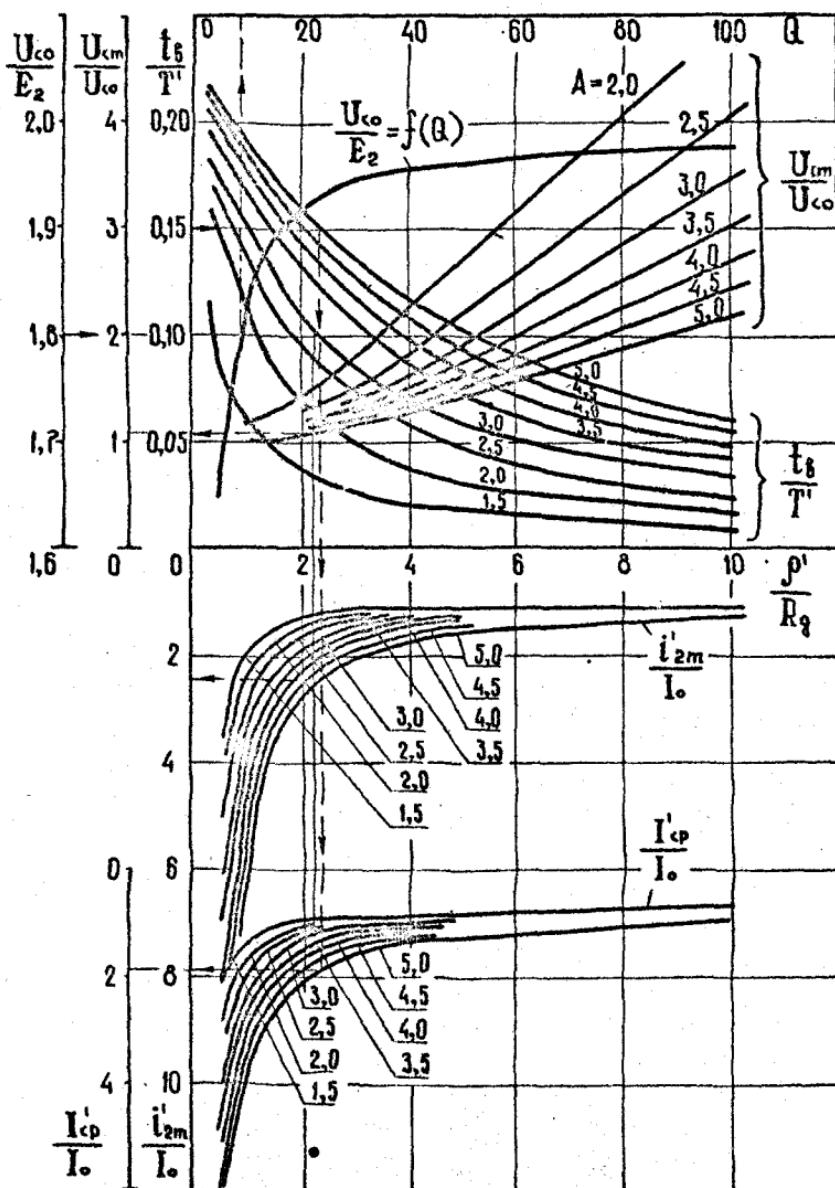


Рис. 6

величины те же, что в 1-й схеме. Зависимость диапазона скважностей тока q_1 от предельной частоты следования импульсов представлена кривыми 2 на рис. 4.

Проведено сравнение схем с зависимой и независимой коммутацией по условиям работы вентилей, установленной мощности элементов при одинаковых мощностях на ЭП, к.п.д., условиях охлаждения вентилей.

Третья глава посвящена аналитическому исследованию тиристорного генератора импульсов с параллельным ключом. Тиристорные генераторы, выполненные по принципу прерывания тока с последовательным соединением ключа и нагрузки, имеют недостаточно высокий к.п.д., так как в них применяются балластные активные ограничивающие сопротивления. Автором совместно с Гельманом М. В. были предложены схемы ТГИ с параллельным включением рабочего тиристора и нагрузки, обладающие высокими энергетическими показателями. Схема с параллельным ключом и независимой коммутацией приведена на рис. 7. Источник питания E_1 , выполняется по схеме параметрического стабилизатора тока или управляемого выпрямителя с токостабилизирующей обратной связью. Индуктивность служит для накопления энергии и обеспечения пробоя эрозионного промежутка после выключения тиристора T_1 . В схеме отсутствует сопротивление R_{sh} .

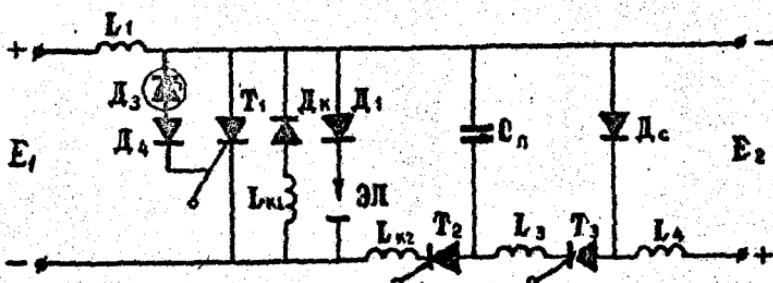


Рис. 7

При включении тиристора T_1 емкостный промежуток шунтируется тиристором. Индуктивный накопитель L_1 запасает энергию. При включении тиристора T_2 и тиристору T_1 прикладывается обратное напряжение, и он выключается, а конденсатор C_{k1} заряжается по коммутиирующему контуру $C_k - T_2 - L_{k1} - T_1 - D_k$ и через источник тока. После окончания колебательного процесса по цепи $L_{k1} - D_k$ течет обратный ток диода D_k . В момент отрыва обратного тока на вакуумах источника возникает всплеск напряжения, амплитуда которого много больше E_1 . Итак, на ЭП возникает напряжение, способствующее зажиганию дугового разряда при nominalном зазоре между электродами. После зажигания разряда ток источника проходит по цепи ЭП. В течение периода работы T_1 ток I_0 через источник течет непрерывно. Энергия, которую источник отдает за период работы, равна $I_0 E_1 T_1$; энергия, которая выделяется на ЭП в течение времени импульса t_u , равна $I_0 E_1 t_u$. Если пренебречь потерями рабочего контура, то $I_0 E_1 T_1 = I_0 E_1 t_u$, откуда $E_1 = \frac{E_1 t_u}{T_1} = \frac{E_1}{q_1}$. Это говорит о том, что схема с параллельным ключом и источником тока принципиально может иметь напряжение источника, меньшее напряжения горения дуги. Это позволяет значительно повысить к.п.д. Если использовать схему на большие токи и малые скважности $q_1 < 2$, то значительно облегчаются условия работы тиристора T_1 .

В случае пропуска зажигания разряда (холостой ход) величина нарастающего прямого напряжения на ЭП и тиристоре T_1 ограничена цепочкой защиты $D_3 - D_4$. При возрастании напряжения до величины срабатывания в цепи стабилитронов появляется ток, который запускает ждущий блокинг-генератор, работающий на цепь управления T_1 . Снова включается тиристор T_1 , ток источника течет непрерывно.

Проведен анализ электромагнитных процессов рабочего контура в первом периоде и установившемся режиме работы методом конечных разностей. Схема замещения рабочего контура и закон изменения тока источника изображены на рис.8, где r — сопротивление потерь источника и индуктивности L , $\theta_3(t)$ — противо-э.д.с. нагрузки, $0 - t_1$ — интервал замкнутого состояния

ния ключа K , t_1-t_2 - разомкнутого. В результате расчета получены выражения токов $i_1(t)$, $i_2(t)$ в первом периоде и установившемся режиме работы. По значениям токов в конце временных интервалов работы определены относительная постоянная времени накопителя $\frac{rT}{L}$ и относительное напряжение потерь:

$$\frac{r}{L} T \cdot \frac{t_1}{T} = -\ln \frac{\frac{i_1 r}{E_d} - 1}{\frac{i_2 r}{E_d} - 1}; \quad (11)$$

$$\frac{i_2 r}{E_d} = 1 - \frac{E_3}{E_d} \cdot \frac{\exp \left[-\frac{r}{L} T \left(1 - \frac{t_1}{T} \right) \right] - 1}{\exp \left(-\frac{r}{L} T \right) - 1}, \quad (12)$$

где i_1 и i_2 - токи в конце временных интервалов;

t_1 и t_2 - длительности временных интервалов.

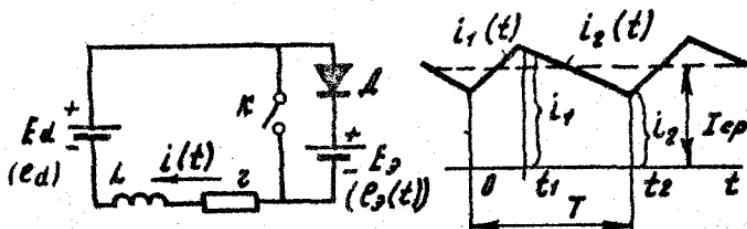


Рис. 8

По выражениям (11) и (12) построены nomogrammy (рис. 9)

для расчета рабочего контура. Для расчета заданы величины:

1) к.п.д. η ; 2) средний ток источника I_{cp} ; 3) относительное изменение тока от среднего значения $\pm \Delta i \%$; 4) противо-э.д.с. E_3 ; 5) частота и скважность q_L рабочих импульсов. Искомые величины: E_d , L , r , фактическое значение к.п.д. Расчет ведется графо-аналитическим методом.

Для уточнения расчета рабочего контура учтено влияние нелинейности аэротрансформаторного промежутка; при этом он заменяется эквивалентной изменяющейся противо-э.д.с. $E_3(t) = (U_H - U_K) e^{-\frac{t}{T} + U_K}$, где T - постоянная времени процесса. Получено аналитическое выражение поправки на нелинейность

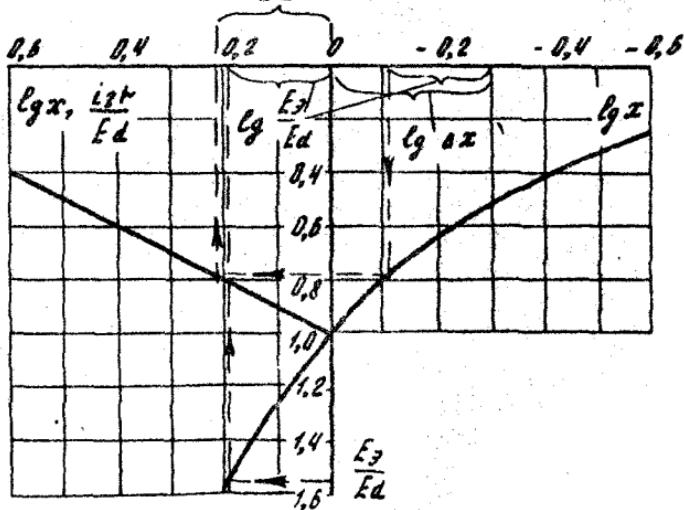
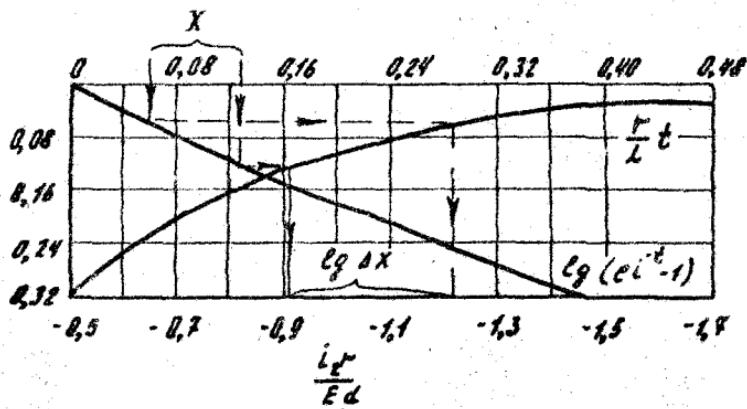
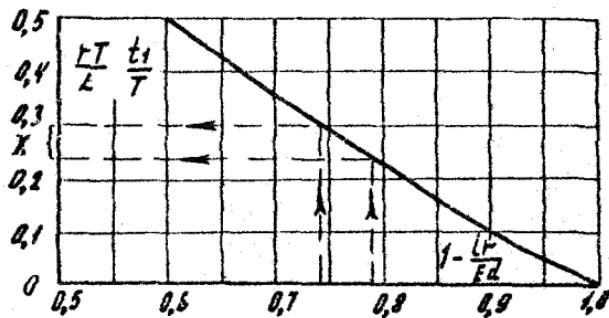


Рис. 9

$$\Pi = \frac{a}{\frac{L}{rT} \cdot \frac{T}{\tau} - 1}, \quad (13)$$

где

$$a = \frac{U_n - U_k}{E_d} \cdot \frac{\exp \left[-\frac{r}{L} (t_2 - t_1) \right] - \exp \left[-\frac{t_2 - t_1}{\tau} \right]}{1 - \exp \left(-\frac{r}{L} t_2 \right)}. \quad (14)$$

По выражению (14) построены nomogramмы. Определена область использования поправки на нелинейность: если погрешность в определении E_d , r , должна быть не более 10%, а погрешность относительного напряжения потерь $\frac{L}{rT}$ не более 20%, то нужно учитывать поправку, начиная с $E_d = 0,9$ кГц при $q_i \geq 3$, с $f = 1,5$ кГц при $q_i \geq 1,3$.

Проведен анализ влияния 1-й гармоники питающего напряжения на рабочий контур. Получены выражения токов на интервалах работы $t_0 - t_1$, $t_1 - t_2$. Разработана методика построения кривой тока источника за период пульсации 1-й гармоники, позволяющая выбрать индуктивность накопителя.

Проведен анализ электромагнитных процессов при переваряде коммутирующей ѹмкости методом припасорыгания. На всех интервалах определены средние и действующие значения токов, действующие и максимальные значения напряжений на элементах, времена работы вентилей и времена, предоставляемые на выключение тиристоров. Для большинства искомых величин, выраженных в относительных единицах, построены nomogramмы, облегчающие инженерный расчет контура коммутации. Определены перенапряжения, возникающие на зажимах аэродинамического промежутка и способствующие зажиганию разряда.

Так как рабочий контур имеет высокое значение к.п.д., то к.п.д. генератора определяется мощностью потерь P_k в контуре коммутации, которая зависит от сопротивления R . Оно входит в цепь подзаряда ѹмкости для ограничения напряжения U_{co} , в то же время ограничивает ток при срыве коммутации. Отсюда

следует, что на интервале Δt_4 должен протекать колебательный процесс. Для определения значения R , отвечающего перечисленным выше условиям, рассчитаны значения: $P_k, R, L_4, \eta_k = f(\frac{\omega_2 L_4}{R})$ при $T_2 = \text{const}$ и $\frac{T_h}{\tau_3} = \text{const}$; $P_k, R, L_4, \eta_k = f(\frac{\omega_2 L_4}{R})$ при $\frac{\omega_2 L_4}{R} = \text{const}$ и $T_2 = \text{const}$;

где. η_k - к.п.д. контура коммутации,

$$T_h = \frac{L_3 + L_0}{R} \quad T_y = RC, \quad T_2 = 2\pi\sqrt{L_3 C}, \quad \omega_2 = \frac{2\pi}{T_2}.$$

Зависимость диапазона скважностей тока q_i от предельной частоты следования импульсов f представлена кривыми З на рис. 4. Работана методика расчета графо-аналитическим способом. Заданные и искомые величины - те же, что в схемах с последовательным ключом.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования макетов тиристорных генераторов импульсов (ТГИ), характеристика которых приведена в табл. 1, где ТГИ-1 - схема с зависимой коммутацией, ТГИ-II - с независимой коммутацией, ТГИ-III - с параллельным ключом и независимой коммутацией.

Таблица 1

Тип генератора	Мощность питаящего трансформатора, кВа	Вторичные напряжения, В	Ток нагрузки, А	Частота, кГц	Скважность
ТГИ-1	1,5(3,0)	22	25-30	0,3-1	2-4,5
ТГИ-II	16	21,5; 64	25-80	0,3-1	2-4,5
ТГИ-III	15;	15; 55	50-250	0,3-1	1,1-3

Цель нагрузки ТГИ-1 и ТГИ-II питается от неуправляемого выпрямителя с LC -фильтром.

Рассмотрен вопрос применения формирователя полусигнализ импульсов на ЭП. Введение его повышает к.п.д. генератора

ТГИ-П с 37% до 45% на токе 45A, снижает энергоемкость процесса по активной потребляемой мощности.

При работе на электротяговом станке 4729А были проведены страгнитные испытания ТГИ-1 и ТГИ-П с машинным генератором МГИ-3. Обработка прогорела на обрацах стали марки Ст.45 графитовым электродом марки 22Г. Определены показатели работы. Так, при работе на среднем токе 50A производительность ТГИ-П получена выше, чем у МГИ-3 на 14%, энергоемкость меньше в 3,5 раза, относительный износ электрода-инструмента - 0,07%. Показано, что у генератора с зависимой коммутацией можно изменять параметры импульсов в широких пределах изменением параметров схемы.

Цепь нагрузки ТГИ-III питается от управляемого выпрямителя с токостабилизирующей обратной связью. Схема управления ТГИ-Ш обеспечивает включение тиристоров с регулированием частоты и скважности импульсов. Управление выпрямителем производится по релейно-равовому принципу.

Генератор ТГИ-Ш обеспечивает прямоугольную форму тока на всех режимах по току, однако, возможно и регулирование формы импульса. Амплитуда поджигающего импульса, возникающего на аэрозионном промежутке, составляет 300 В и не является предельной. При испытании схемы с параллельным ключом определены показатели работы генератора. К.п.д. рабочего контура достигает значения $\eta_p = 0,98$, к.п.д. генератора $\eta = 0,8$, $\cos \varphi = 0,5 - 0,9$.

Обработка деталей с помощью ТГИ-Ш проводилась графитовым и медными электродами. При работе на среднем токе 180A получена производительность порядка $3600 \text{ мм}^3/\text{мин}$, энергоемкость - порядка 0,13 кДж/мм³, что в 2 раза меньше, чем у тиристорного генератора на основе управляемого выпрямителя, относительный износ медного электрода-инструмента до 10%.

ОСНОРНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В работе доказано, что в среднечастотном диапазоне для получения униполярных импульсов с регулируемыми частотой, скважностью и формой целесообразно применение тиристорных прерывателей постоянного тока.
2. Проведенный анализ электромагнитных процессов в генераторах с последовательным и параллельным ключом показал, что в первом приближении еровионный промежуток можно представить встречной в.д.с.. Для уточнения расчетов могут быть применены введенные поправки на нелинейность еровионного промежутка.
3. Разработанные инженерные методики расчета для тиристорных генераторов с последовательным и параллельным ключом позволяют рассчитать параметры с учетом утяжелений условий работы генераторов при пуске, в режимах холостого хода и короткого замыкания, а также при переходе из одного режима работы в другой.
4. Предложены принципиально новые по структуре тиристорные генераторы с параллельным включением рабочего тиристора и нагрузки с источником тока на входе, обладающие более высоким к.п.д., $\cos \varphi$ и хорошей формой импульса. В них отсутствует балластное активное сопротивление и создается поджигающий импульс без применения специального устройства.
5. В результате теоретического и экспериментального исследования определены области применения тиристорных генераторов. Схемы с последовательным ключом и зависимой коммутацией целесообразно применять на малых токах при скважностях более 2-х; схемы с последовательным и параллельным ключом и независимой коммутацией - в широком диапазоне токов, причем, схемы с последовательным ключом - при больших скважностях (больше 2-х, 3-х), а схемы с параллельным ключом - при малых скважностях.
6. Результаты экспериментальных исследований подтвердили достаточную точность разработанных методов расчета. Погрешность расчета токов, напряжений, времен по сравнению с экспериментальными данными составляет 5-10%.

7. Проведенные испытания генераторов показали их высокие технико-экономические показатели.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Исследование тиристорного генератора прямоугольных импульсов. Сб. № 48 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск, 1968 (Соавтор Гельман М.В.).

2. Расчет генератора прямоугольных импульсов на тиристорах. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск, 1967 (Соавтор Гельман М.В.).

3. Экспериментальное исследование тиристорного генератора для электроимпульсной обработки. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск, 1969 (Соавторы Гельман М.В., Казанцев Ю.М.).

4. Расчет тиристорного генератора униполярных импульсов с независимой коммутацией. Сб. № 80 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, 1970 (Соавтор Гельман М.В.).

5. Тиристорные генераторы униполярных импульсов для электроимпульсных станков. Тезисы докладов Всесоюзного совещания по вентильным преобразователям частоты. Свердловск, 1969 (Соавтор Гельман М.В.).

6. Исследование тиристорных генераторов униполярных импульсов при переменной нагрузке. Тезисы докладов З-й научно-технической конференции УПИ, Свердловск, 1970 (Соавтор Гельман М.В.).

7. Выбор параметров тиристорного генератора униполярных импульсов. Сб. № 70 "Вентильные преобразователи в энергетических установках", Челябинск, 1970.

8. Применение тиристорных генераторов униполярных импульсов для электроимпульсной обработки. Сб. № 70 "Вентильные преобразователи в энергетических установках", Челябинск, 1970.

9. К вопросу исследования тиристорных генераторов для электроимпульсных станков. Краткие тезисы докладов научно-производственной конференции "Эльфа-71", Л., 1971 (Соавтор Гельман М.В.).

10. Расчет прерывателя постоянного тока с параллельным включением ключа и противо-э.д.с. Сб. № 94 "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, 1971 (Соавтор Гельман М.В.).

11. Тиристорный генератор для эрозионной обработки. Акт. серд. № 367994 кл. В 23 р 1/02, Бюлл. изобретений 1973, № 9 (Соавтор Гельман М.В.).

12. Расчет тиристорного прерывателя, работающего на противо-э.д.с. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, 1972.

13. Исследование тиристорного генератора для электроимпульсного станка с параллельным ключом. Сб. № 124 "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, 1973.