

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

САВИНОВА ДИНА ВЛАДИМИРОВНА

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ
И РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА ИХ РАСЧЁТА

Специальность 05.12.08 -
"Электронная техника и приборы"

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Челябинск
1974

Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электротехники" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ - кандидат технических наук, доцент А.В.БАЕВ.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

1. Доктор технических наук, профессор А.В.ДОНСКОЙ
(г.Ленинград);

2. Кандидат технических наук, доцент В.Б.САМОДЕЛКИН
(г.Свердловск).

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ - Научно-исследовательский институт
электродинамики АН УССР (г.Хмель).

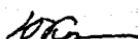
Автореферат разослан " 9 сентября 1974 года.

Захита диссертации состоится " 9 " октября 1974 года
в ауд. № 244. на заседании Совета по присуждению учёных степеней
приборостроительного и энергетического факультетов Челябинского
политехнического института имени Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

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

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доцент, канд.техн.наук



(Короленко Д.А.)

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Таки повышенной частоты нашли широкое применение в различных областях народного хозяйства. Они применяются при ультразвуковой и электротермической обработке металлов, в источниках питания автономных систем, в промежуточных звеньях преобразователей частоты. Перспективность применения электротехнологических методов обработки с использованием полупроводниковой техники отмечается в программе КПСС: "Механическая обработка будет дополняться и в необходимых случаях заменяться химическими методами, технологическим использованием электроэнергии, электрохимией и т.д.; всё большее место в технологии производства займут радиоэлектроника, полупроводники, ультразвук".

Для генерирования токов повышенной частоты наиболее целесообразно применение тиристорных автономных инверторов, работающих в режиме прерывистого тока. Большой вклад в теорию таких инверторов внесли советские учёные И.И.Аюдис, А.В.Басильев, А.В.Донской, Г.В.Ивенский, И.Л.Каганов, С.М.Канцельсон, В.А.Лебунцов, А.Е.Случинский, Д.Г.Толстов и др. Следует отметить серьёзные работы в этой области зарубежных учёных Хауффе (*Hauffe*), Демонтивье (*Demontrivez*), Кавай, Томисака (*Tomisaka*) и др.

За последние годы создано много разновидностей схем колебательных инверторов (со встречно-параллельно включёнными диодами или тиристорами, с удвоением частоты и т.д.). Однако, для уменьшения массогабаритных показателей, а также с целью упрощения схем во всех случаях, где это возможно, целесообразно применять классические схемы колебательных инверторов. Поэтому в данной работе рассмотрение ограничивается одним классом схем колебательных инверторов – без удвоения частоты и встречно-параллельно включённых вентилей.

Известные методы анализа и расчёта инверторов, работающих в режиме прерывистого тока, обычно базируются на ряде упрощений и допущений, существенно снижающих точность и ограничивающих их применение определённой областью. Например, ряд методов разработан для инверторных установок индукционного нагрева, поэтому данные методы оказываются справедливыми, в основном, при соотношениях параметров, имеющих место в этих установках. Существующие инженерные методы не позволяют оценить качество выходного напряжения, так как они базируются на допущении о его синусоидальности. Оценка качества выходного напряжения особенно важна в источниках питания автономных систем. Недостаточно рассмотрены вопросы граничных режимов.

Цель работы. Реферируемая работа посвящена исследова-

нию установившихся режимов колебательных автономных инверторов, работающих в режиме прерывистого тока и ставит своей целью решить следующие вопросы:

- 1) провести анализ электромагнитных процессов в колебательном автономном инверторе;
- 2) получить и исследовать основные зависимости, характеризующие колебательный автономный инвертор;
- 3) установить зоны устойчивой работы инвертора в режиме прерывистых токов;
- 4) дать оценку точности существующих инженерных методов расчёта;
- 5) на основе данных, полученных в результате анализа электромагнитных процессов, создать общий, более точный инженерный метод расчёта колебательных автономных инверторов;
- 6) подтвердить экспериментальными исследованиями при различных сочетаниях параметров инвертора и нагрузки данные теоретического анализа.

Методика выполнения исследований.

При исследовании применён наиболее точный, основанный на меньшем количестве допущений метод, сочетающий кусочно-линейную аппроксимацию и припасование решений неоднородных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на границах интервалов постоянной структуры.

Научная новизна. В работе впервые дан полный анализ электромагнитных процессов в последовательно-параллельном инверторе. Составлены алгоритмы и программы для определения с помощью ЭЦВМ любых параметров режима инвертора, работающего на активную и активно-индуктивную нагрузку с учётом потерь в последовательном колебательном контуре.

Предложен, обоснован и описан частотный метод анализа таких инверторов, на основе которого с применением данных, полученных из анализа электромагнитных процессов, создан новый, более общий и точный инженерный метод расчёта.

Практическая ценность. Широкому внедрению колебательных автономных инверторов в различные области промышленности препятствует недостаточная изученность ряда важных теоретических вопросов, касающихся режимов и областей устойчивой работы инвертора, а также отсутствие общего достаточно точного инженерного метода расчёта колебательных инверторов.

Проведённые исследования восполняют этот пробел. Созданный но-

ый, общий, более точный инженерный метод расчёта позволил рассчитать ряд внедрённых промышленных образцов различного применения.

Аппробация работы. Основные положения диссертации и отдельные её разделы докладывались и обсуждались:

а) на Всесоюзном совещании по вентиляционным преобразователям частоты (г.Свердловск, 1969 г.);
б) на научно-технической конференции по повышению эффективности устройств преобразовательной техники (г.Киев, 1972 г.);

в) на Всесоюзном научно-техническом семинаре по разработке и промышленному применению полупроводниковых преобразователей для индукционного нагрева металлов (г.Уфа, 1974 г.);

г) на ежегодных научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола в 1968-1973 годах.

Публикация. По результатам выполненных исследований опубликовано 13 печатных работ.

Объём работы. Диссертация, включающая 148 страниц машинописного текста, 66 рисунков и 7 таблиц, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и приложения (5 страниц).

Содержание работы

В первой главе рассмотрены вопросы терминологии и классификации. Показано, что термин "колебательный" точнее отражает физические процессы в схеме инвертора, чем слово "резонансный", так как в резонансном последовательном RLC -контуре резонанс может наблюдаться при любых значениях R , а колебательные процессы — только при условии $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Более того, так как частота собственных колебаний всегда ниже резонансной частоты, то при резонансе невозможна работа инвертора в режиме прерывистого тока, наиболее характерном для таких инверторов. В связи с этим в диссертации все инверторы этого класса отнесены к колебательным инверторам.

Дан обзор методов анализа и инженерных методов расчёта. Из указанного обзора установлено, что сложность анализа последовательно-параллельных инверторов породила множество инженерных методов расчёта. Практически все разработанные методы расчёта колебательных инверторов, описываемых дифференциальными уравнениями выше второго порядка, основаны на допущении синусоидальности напряжения на нагрузке или диагонали инвертора. Широко применяются методы, основанные на замене последовательно-параллельного инвертора на эквивалент-

лентный по первой гармонике последовательный. Зависимости токов, напряжений, углов проводимости и выключения от параметров инвертора, пригодные для инженерных расчётов, установлены пока лишь только на основе приближённых расчётов, а оценка точности всех описанных методов делается, как правило, экспериментально. Исключение составляют лишь работы АПИ.

Наиболее точным из всех существующих методов является метод кусочно-линейной аппроксимации, поэтому несмотря на трудности расчёта, для анализа электромагнитных процессов в колебательных инверторах в данной работе используется именно он. Условимся называть метод кусочно-линейной аппроксимации для удобства изложения "точным" методом.

Всё более широкое применение колебательных инверторов в различных областях промышленности требует при их создании более точного определения параметров, оценки гармонического состава напряжения на выходе, определения областей устойчивой работы. В этой связи необходимо создание общего, более точного метода расчёта, применимого для всего класса колебательных инверторов вне зависимости от области их применения.

Во второй главе выполнен анализ электромагнитных процессов в колебательном автономном инверторе, собранном по одноточной полумостовой схеме, приведённой на рис. Iа. Форма тока в диагонали инвертора показана на рис. Iб.

Система дифференциальных уравнений в относительных единицах для участка проводимости имеет вид:

$$i_n = i_{nn} + i_{nc}, \quad (1)$$

$$\frac{di_n}{d\vartheta_n} + a \frac{di_{nn}}{d\vartheta_n} + di_{nn} + d_n i_n + u_{ncn} = 1, \quad (2)$$

$$i_n = \frac{du_{ncn}}{d\vartheta_n} \quad (3)$$

$$u_{ncn} - di_{nn} - a \frac{di_{nn}}{d\vartheta_n} = 0, \quad (4)$$

$$i_{nc} = B \frac{du_{ncn}}{d\vartheta_n}; \quad (5)$$

для паузы:

$$u_{ncn} - di_{nn} - a \frac{di_{nn}}{d\vartheta_n} = 0, \quad (6)$$

$$i_{nc} = B \frac{du_{ncn}}{d\vartheta_n}, \quad (7)$$

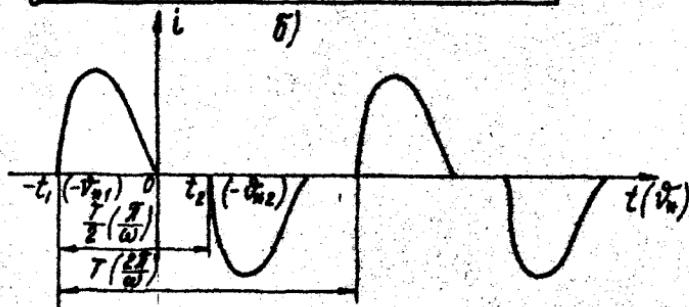
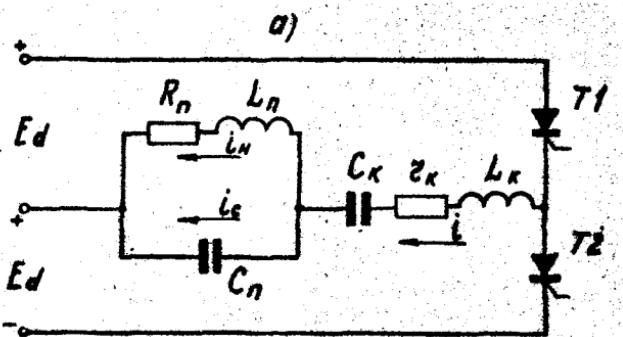


Рис. I. Схема колебательного автономного инвертора, собранного по однофазной полумостовой схеме (а) и форма тока в диагонали инвертора (б).

$$i_n = 0, \quad (8)$$

$$i_{nc} = -i_{nN}. \quad (9)$$

Здесь $\vartheta_n = \omega_n t_n$,
где ω_n — относительная частота управления.

Анализ выполнен в относительных единицах, обозначаемых здесь и в дальнейшем индексом n . За базовые величины принят

$$u_d = E_d \quad ; \quad i_d = \sqrt{\frac{E_d}{L_n}} \quad ; \quad t_d = \sqrt{L_n C_k} \quad \text{или} \quad \omega_d = \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_n C_k}}.$$

Для общности анализа введены коэффициенты

$$\frac{L_n}{L_k} = a; \quad \frac{C_n}{C_k} = b; \quad \sqrt{\frac{R_n}{L_n}} = d; \quad \sqrt{\frac{R_n}{C_n}} = d_n; \quad \sqrt{\frac{Z_k}{L_k}} = d_k.$$

Решение системы уравнений (I)-(9) относительно тока нагрузки для участка проводимости имеет вид:

$$i_{\text{зк}} = A_1 e^{A_1 \vartheta_a} + A_2 e^{A_2 \vartheta_a} + A_3 e^{A_3 \vartheta_a} + A_4 e^{A_4 \vartheta_a}, \quad (10)$$

а для паузы

$$i_{\text{зк}} = A_5 e^{A_5 \vartheta_a} + A_6 e^{A_6 \vartheta_a}, \quad (II)$$

где $A_1 \div A_6$ - корни характеристических уравнений четвёртого и второго порядков, а $A_1 \div A_6$ - постоянные интегрирования, которые определяются вместе с углом проводимости ϑ_a , (соответствующим времени t , на рис.1б) из следующих граничных условий:

$$i_{\text{зк}}^x(0) = i_{\text{зк}}^x(t), \quad (12)$$

$$u_{\text{зкп}}^x(0) = u_{\text{зкп}}^x(t), \quad (13)$$

$$i_{\text{зк}}^x(t) = 0, \quad (14)$$

$$i_{\text{зк}}^x(-\vartheta_{a1}) = 0, \quad (15)$$

$$i_{\text{зк}}^x(\vartheta_{a2}) = -i_{\text{зк}}^x(-\vartheta_{a1}), \quad (16)$$

$$u_{\text{зкп}}^x(\vartheta_{a2}) = -u_{\text{зкп}}^x(-\vartheta_{a1}), \quad (17)$$

$$-u_{\text{зкп}}^x(-\vartheta_{a1}) = u_{\text{зкп}}^x(t). \quad (18)$$

В системе уравнений (12)-(18) верхний индекс I указывает принадлежность токов и напряжений к интервалу проводимости, а индекс II - к паузе.

Исходя из принципа работы последовательно-параллельного инвертора следует, что хотя бы одна пара корней P_1 и P_2 или P_3 и P_4 должны быть комплексно-сопряжённой, так как процесс в последовательном контуре должен быть колебательным. Корни другой пары в общем случае могут быть как комплексно-сопряжёнными, так и действительными. Корни P_5 и P_6 также могут быть любыми.

Поскольку подход к решению задачи для всех сочетаний корней одинаков, метод и все дальнейшие выкладки поясняются в диссертации лишь на примере, в котором все корни попарно комплексно-сопряжённые, хотя расчёты проведены для всех сочетаний корней.

В этом случае решение системы уравнений (1)-(8) для интервалов проводимости и пауз записывается:

$$i_{\pm \mu} = e^{r \vartheta_{\mu}} (A_1 \cos \delta_{\mu} + A_2 \sin \delta_{\mu}) + e^{\alpha \vartheta_{\mu}} (A_3 \cos \beta_{\mu} + A_4 \sin \beta_{\mu}), \quad (19)$$

$$i_{\pm \mu} = e^{\varepsilon \vartheta_{\mu}} (A_5 \cos \gamma_{\mu} + A_6 \sin \gamma_{\mu}), \quad (20)$$

если

$$\rho_{1,2} = r \pm j\delta; \quad \rho_{3,4} = \alpha \pm j\beta; \quad \rho_{5,6} = \varepsilon \pm j\gamma. \quad (21)$$

Выражая в системе (12)-(18) все токи и напряжения через (19)-(20), получим систему семи уравнений для определения $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ и ϑ_{μ} , из которых пять - трансцендентные. Если все постоянные интегрирования выражать через одну, например, через A_1 , то система сводится к двум уравнениям

$$A_1 \lambda = 0, \quad A_1 \xi = 2, \quad (22)$$

где λ и ξ - сложные функции от параметров схемы и угла проводимости ϑ_{μ} . Так как $A_1 \neq 0$ (в противном случае все постоянные интегрирования были бы равны нулю), то

$$\lambda = 0. \quad (23)$$

Последнее уравнение позволяет найти угол проводимости ϑ_{μ} . Далее определение постоянных интегрирования не представляет затруднений. Для численного решения была использована ЭЦВМ "Минск-22". Были найдены мгновенные значения токов и напряжений, а по ним - средние, действующие и максимальные значения, а также - коэффициенты искажения и гармоник выходного напряжения.

Подобным образом были решены уравнения для других сочетаний корней, а также для случая чисто активной нагрузки.

Области устойчивой работы инвертора могут быть определены, исходя из анализа граничных режимов. В работе показана возможность существования нескольких различных граничных режимов. Для анализа был использован описанный выше метод решения уравнений.

Однако, алгоритм программы для отыскания граничных режимов имеет некоторые особенности, так как при одних и тех же параметрах, но при различных относительных частотах управления ω_{μ} можно получить несколько граничных режимов, а следовательно, искать нужно не одно, а несколько решений.

Были рассчитаны также режимы холостого хода и короткого замыкания.

Так как характер электромагнитных процессов определяется корнями характеристических уравнений, далее проведён анализ корней. Анализ проведён для случаев: а) обе пары корней комплексные, и в схеме действуют две частоты; б) одна пара корней комплексная, одна пара - действительная - схема превращается в одночастотную.

Если построить зависимости величины мнимой части корней от относительной индуктивности α при $d_n = \text{const}$, то можно видеть, что при определённом значении α мнимые части корней скачком меняют свою величину - меняются местами. Выведено значение $\alpha_{\text{ск}}$, при котором происходит скачок корней

$$\alpha_{\text{ск}} = \frac{i - \left(\frac{d_n}{2}\right)^2}{b + i}. \quad (24)$$

При $\alpha = \alpha_{\text{ск}}$ становятся равными действительные части корней ($j = 0$).

Для анализа применены понятия из теории колебаний для линейно связанных систем, а именно - определён характер колебаний в отдельных (парциальных) системах, из которых состоит сложная система, т.е. определены парциальные частоты (μ, ρ, η).

На рис.2а приведены зависимости мнимой части корней (частот) b , β , а также парциальных частот при $d_n = \text{const}$, $b = \text{const}$ от α . Заштрихованы зоны, где инвертор не может работать в режиме прерывистых токов.

Из рисунка видно, что зоны работы инвертора определяются корнями характеристических уравнений, а также парциальной частотой η . Может существовать две области работы инвертора в режиме прерывистых токов, а следовательно, три граничных режима. С ростом d_n нерабочая область между первым и вторым граничными режимами сужается и при $d_n = 1$ исчезает совсем - остаётся только один граничный режим. При $d_n = 1$ исчезает возможность появления резонанса в параллельном контуре. Следовательно, возможность существования нескольких граничных режимов определяется возможностью появления резонанса в параллельном колебательном контуре.

Следует отметить, что именно при значениях a, b, d_n , соответствующих точке пересечения парциальных частот ($\mu = \eta$) происходит скачок в значениях корней характеристического уравнения, а скачку корней соответствует изменение характера зон работы инвертора (рис.2б, в).

Проведённый анализ показал, что существует два вида граничных режимов: 1) на границе происходит переход в режим непрерывного тока; 2) на границе длительность тока ещё не достигает полупериода,

когда полностью исчезает обратное напряжение, и работа инвертора становится невозможной.

Рассмотрено влияние параметров схемы на режим работы последовательно-параллельного инвертора. Все приведённые параметры инвертора a , b , α_n , ω_n , d_n оказывают существенное влияние на токи, напряжения, углы, характеризующие режимы работы инвертора, поэтому установить точные аналитические зависимости режимов от отдельных параметров не представляется возможным.

Зависимости напряжений, токов и углов от параметров инвертора и нагрузки имеют U -образный характер с более монотонным изменением в области больших активных сопротивлений нагрузки (на правых ветвях U -образных характеристик).

Проведённый анализ даёт возможность оценить точность приближённых методов расчёта, поскольку наличие алгоритмов и программ позволяет получить точные значения токов, напряжений и углов при любых сочетаниях параметров.

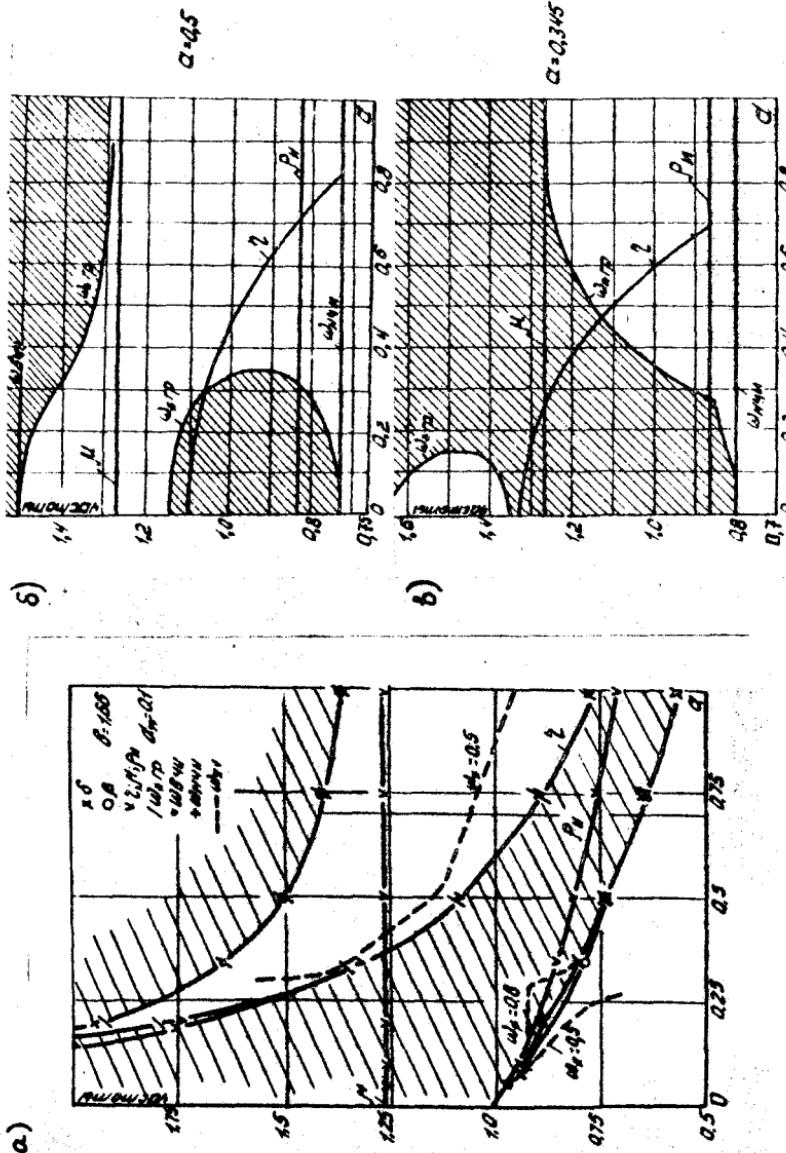
В третьей главе сначала дана оценка точности ряда инженерных методов расчёта колебательных инверторов. Рассмотрены методы, изложенные в работах М.Дементинье, Кевай, И.М.Аксодиса, Г.В.Ивенского - С.А.Буранова, А.В.Донского - В.В.Смородинова - Т.С.Тодорова. Показано, что погрешности при расчёте этими методами и несинусоидальном напряжении на выходе инвертора могут достигать десятков процентов. При параметрах, соответствующих электротермическим нагрузкам, наибольшую точность обеспечивает метод, разработанный в ЛПИ.

Показано также, что точность методов определяется точностью определения угла проводимости ϑ .

Предложен частотный метод анализа автономных колебательных инверторов. На рис.За представлена схема колебательного инвертора, где сопротивление любой сложной нагрузки и коммутирующего контура $L_K C_K$. Эта схема может быть преобразована в симметричный вентилем и прямоугольным входным напряжением. Эта нелинейная схема может быть приведена к линейной (рис.3б), на входе которой действует источник э.д.с. u , имеющий неизвестную форму. Э.д.с. u можно представить в виде гармонического ряда. Тогда, зная эквивалентное сопротивление \bar{Z}_L и угол φ_L сдвига между током и напряжением для n -ной гармоники, кратной частоте управления ω , т.е. зная частотную характеристику $Z(j\omega)$, можно записать следующие выражения:

$$u = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t). \quad (25)$$

Рис.2. Зоны работы инвертора в режиме прерывистых токов. Заштрихованы зоны, где невозможна работа инвертора в режиме естественной коммутации



$$i = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{a_n}{x_n} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{b_n}{x_n} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right], \quad (26)$$

где a_n и b_n - коэффициенты разложения в ряд Фурье, а x_n и φ_n - полное сопротивление и угол сдвига между током и напряжением n -й гармоники всей цепи инвертора. Функции u и i определены на части полупериода

$$u = E_d \text{ при } 0 < \omega t < \delta_1, \quad (27)$$

$$i = 0 \text{ при } \omega t = 0 \text{ и } \delta_1 \leq \omega t \leq \pi. \quad (28)$$

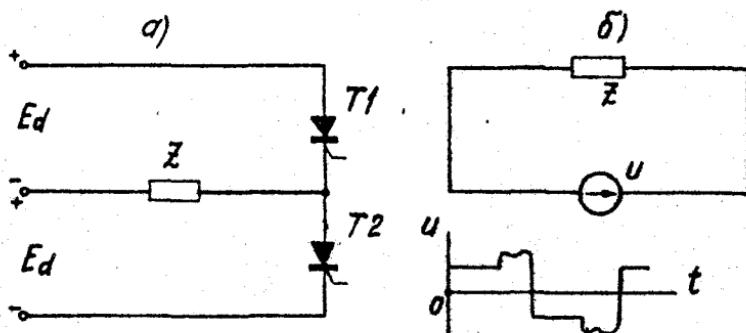


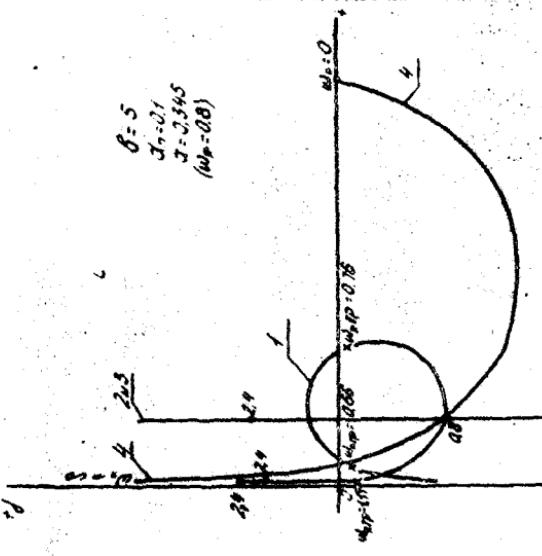
Рис.8. Схема колебательного инвертора при любой сложной нагрузке (а) и её схема замещения (б)

Из выражений (25)–(28) видно, что коэффициенты a_n и b_n , а следовательно, и ток при заданном E_d определяются только частотной характеристикой цепи инвертора. Следовательно, и угол проводимости однозначно определяется частотной характеристикой цепи инвертора. Поэтому можно считать, что два инвертора эквивалентны, если они имеют одинаковые значения x_n и φ_n при частотах, кратных частоте управления. Очевидно, максимальную точность может обеспечить тот приближённый метод расчёта, который использует наиболее точную аппроксимацию частотной характеристики инвертора в точках, кратных частоте управления.

На рис.4а изображены амплитудно-фазовые характеристики последовательно-параллельного инвертора при различных d_n .

При $d_n \geq 1$ амплитудно-фазовая характеристика идёт почти вертикально, а затем стремится к оси j . Ось действительных чисел пе-

б)



а)

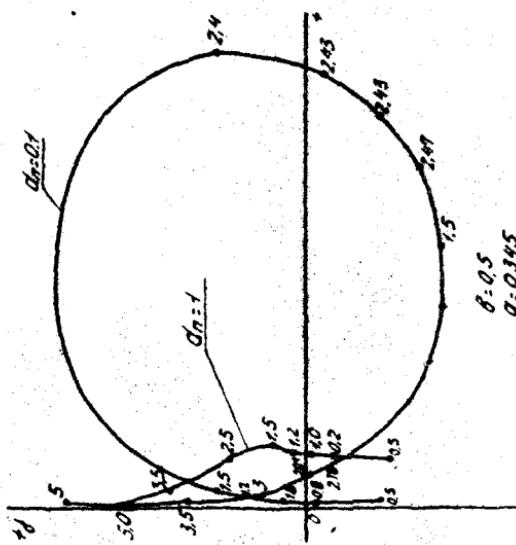


Рис. 4. Амплитудно-фазовые характеристики последовательного-параллельного магнито-ротора
(цифры возле точек указывают $\pi\omega_n$)

рассматривается один раз, что свидетельствует о наличии в цепи инвертора одного резонанса напряжений. При $d_n < 0$ амплитудно-фазовая характеристика имеет петлю, обусловленную наличием резонанса в параллельном контуре.

Амплитудно-фазовые характеристики позволяют определить области, где инвертор не может работать в режиме прерывистого тока, а также установить вероятность возникновения нескольких граничных режимов.

Инвертор работоспособен при частотах управления, при которых $\varphi_n < 0$. На основании вышесказанного можно сформулировать следующие положения: 1) необходимым и достаточным условием существования одного граничного режима колебательного инвертора является отсутствие петли в амплитудно-фазовой характеристике, или расположение её только в положительной полуплоскости; 2) необходимым условием существования нескольких граничных режимов является наличие петли амплитудно-фазовой характеристики в области отрицательных углов.

На рис.4б приведены амплитудно-фазовые характеристики последовательно-параллельного инвертора (кривая 1) и эквивалентного по первой гармонике последовательного (кривая 2) и параллельного (кривая 3) инверторов. Видно существенное различие характеристик, что определяет возможность возникновения значительных погрешностей при применении методов, основанных на замене сложных инверторов простыми по первой гармонике. Поэтому в общем случае необходим учёт высших гармоник.

Если в выражении (26) с учётом (28) все члены умножить на $\frac{1}{Z_1}$, то равенство не изменится

$$a_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + b_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + \frac{z_1}{z_3} [a_3 \cos(3\omega t - \varphi_3) + b_3 \sin(3\omega t - \varphi_3)] + \\ + \frac{z_1}{z_5} [a_5 \cos(5\omega t - \varphi_5) + b_5 \sin(5\omega t - \varphi_5)] = 0. \quad (29)$$

Определяющими, как правило, являются первая и третья гармоники, так как при более высоких частотах Z_n быстро растёт, а φ_n стремится к 90 град.эл. С учётом этого можно рассматривать зависимости угла проводимости ϑ_1 от сопротивлений и углов первой и третьей гармоник, выражив $\vartheta_1 = f(\frac{z_1}{z_3}, \varphi_1, \varphi_3)$. Введённые параметры позволяют представить на плоскости $(-\varphi_1, \frac{z_3}{z_1})$ кривые постоянства угла проводимости ϑ_1 при различных φ_3 . Эти кривые можно построить по численным результатам, полученным точным методом.

Показано, что большинство исследованных режимов при широкой вариации параметров соответствует углам φ_3 , близким к 90 град.эл. Снижение угла φ_3 имеет место лишь при значительном активном эквивалентном сопротивлении параллельного контура для третьей гармоники.

ки, либо за счёт сопротивления потерь последовательного колебательного контура d_n .

На рис.5 в координатах $\frac{z_3}{z_1}$ и $-\varphi$, для $\varphi_3 = 90$ град.эл. построены кривые постоянства угла проводимости вентиля $\vartheta_v = \text{const}$. Данные кривые, построенные на основе точного расчёта для широкого круга сочетаний параметров, являются основой предлагаемого инженерного метода расчёта. Кривые для ϑ_v справедливы для любых схем колебательных инверторов (мостовых, нулевых, полумостовых, параллельных, последовательных, последовательно-параллельных и более сложных). На том же рисунке нанесены кривые постоянства угла восстановления управляемости $\vartheta_B = \text{const}$ и амплитуд прямого напряжения на вентилях $U_{abm} = \text{const}$, которые позволяют ориентировочно определить значения ϑ_B и U_{abm} для рассматриваемой схемы.

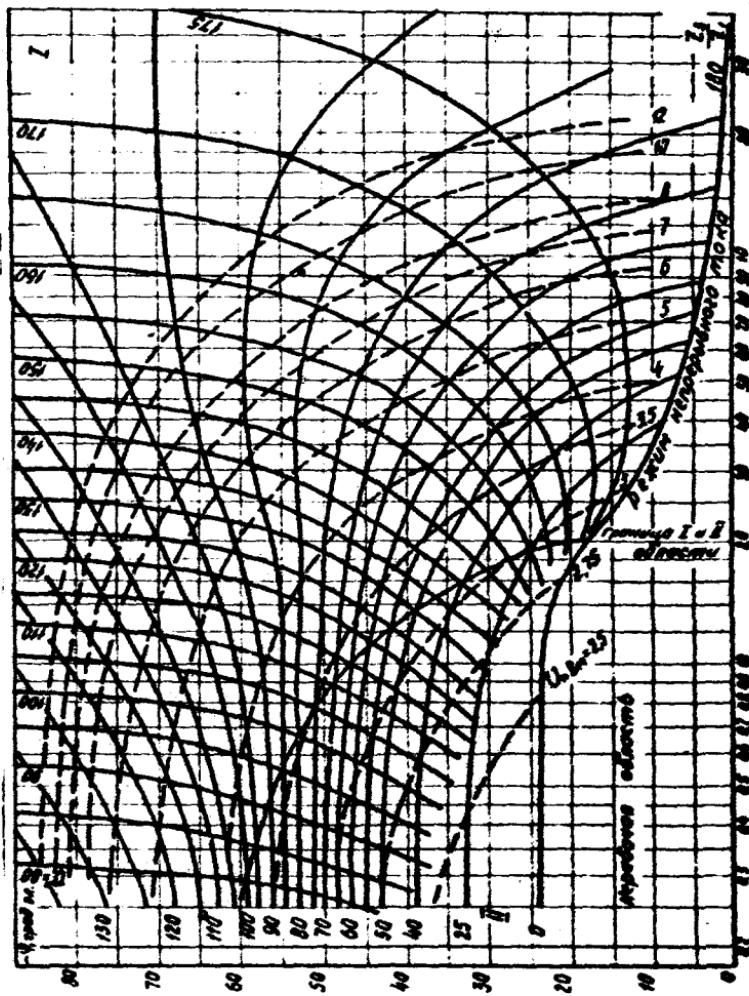
На кривых рис.5 соединены точки пересечения семейств кривых ϑ_v и ϑ_B , в которых $\vartheta_v + \vartheta_B = 180$ град.эл. Полученная кривая является границей между двумя областями, в первой из которых во время пауз обратное напряжение на вентилях не переходит через нуль (правая область) и менее целесообразной, обычно не рекомендуемой для работы, в которой обратное напряжение на вентилях переходит через нуль (левая область). Кривая, соответствующая $\vartheta_v = 180$ град.эл. является границей области прерывистого тока. Ниже этой границы начинается режим с принудительной коммутацией. Граница этой области начинается с $\frac{z_3}{z_1} = 2$. При $\frac{z_3}{z_1} < 2$ переход в режим принудительной коммутации невозможен. Вторая область прерывистых токов, в которой обратное напряжение на вентилях в паузу переходит через нуль, граничит с нерабочей областью. Граница проходит по кривой ϑ_B .

Таким образом, зная значения $\frac{z_3}{z_1}$, ϑ_v и φ_3 , можно определить по рис.6 режим работы инвертора и основные величины ϑ_v , ϑ_B и U_{abm} .

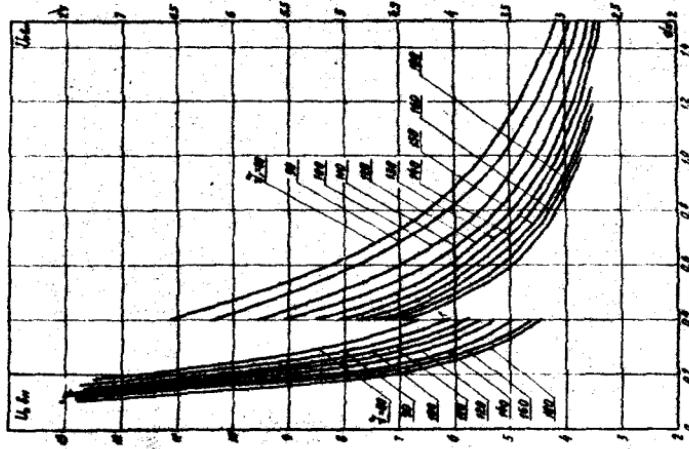
Если построить на номограмме рис.6 траектории рабочей точки при изменении любого из параметров (частоты, затухания d_n , индуктивности Q), можно полностью охарактеризовать работу инвертора при изменении данного параметра и определить зоны его работы. Однако, точность определения ϑ_B и U_{abm} по номограмме рис.5 недостаточна (погрешности порядка 10%), поэтому на рис.6 приведены зависимости U_{abm} и ϑ_B от затухания инвертора d_n при различных углах проводимости ϑ_v .

$$d_n = \frac{z_{n1} \cos \varphi_1}{\sqrt{\omega_n (\omega_2 - z_{n1} \sin \varphi_1)}} \quad (30)$$

Рис. 5. Номограммы для определения угла проходимости ленты γ_1 , угла засечки конца γ_2 упаковываемой смеси углем при его напряжении на единицу $\sigma_{\text{нап}}$



a)



b)

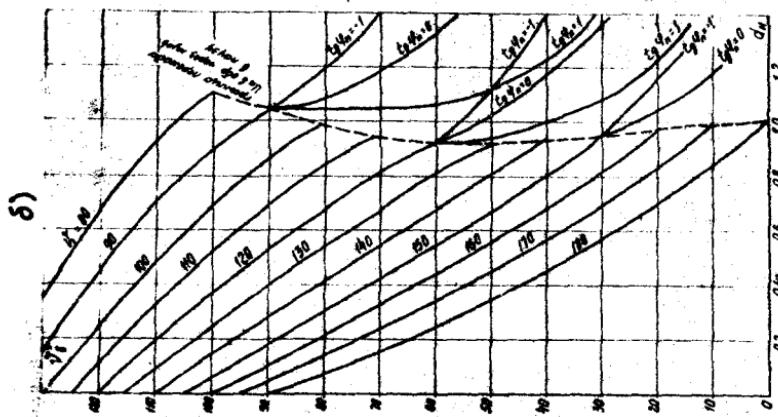


Рис. 6. Кривые для определения амплитуды прямого напряжения на величине U_8 и угла, предоставленного на величине U_6

Эти зависимости получены при нахождении точек, рассчитанных точным методом для полумостовой схемы. В диссертации даны аналогичные зависимости и для мостовой схемы.

Другие величины (токи и напряжения) предложено определять аналитически с учётом высших гармоник.

Первая гармоника напряжения на нагрузке в относительных единицах

$$U_{cpl} = \frac{\left[1 - \left(\frac{\vartheta_1}{180} \right)^2 \right] Q_k}{\sqrt{2} \cos \frac{\vartheta_1}{2} \cos \varphi_{n1} \cdot k_z}, \quad (81)$$

где Q_k — коэффициент полевого действия последовательного колебательного контура.

$$\left. \begin{aligned} k_z &= 1 + \sum_{n=3}^m \frac{I_n}{I_1} \cdot \frac{U_{cpl}}{U_{cpl}} \cdot \frac{\cos \varphi_n}{\cos \varphi_1} = 1 + \sum_{n=3}^m k_{In} \cdot k_{Un} \cdot k_{\varphi_n}, \\ k_{In} &= \frac{I_n}{I_1} = \frac{1 - \left(\frac{\vartheta_1}{180} \right)^2}{1 - n^2 \left(\frac{\vartheta_1}{180} \right)^2} \cdot \frac{\cos n \frac{\vartheta_1}{2}}{\cos \frac{\vartheta_1}{2}}, \\ k_{Un} &= k_{In} \frac{z_{nn}}{z_m}, \quad k_{\varphi_n} = \frac{\cos \varphi_{nn}}{\cos \varphi_{n1}}. \end{aligned} \right\} \quad (82)$$

Здесь $I_1, I_n, U_{cpl}, \cos \varphi_{n1}, \cos \varphi_{nn}, z_{n1}, z_{nn}$ — значения тока, напряжения, $\cos \varphi$ и сопротивления параллельного контура соответственно для первой и n -й гармоники.

Коэффициенты искажений и гармоник k_u и k_r определяются по k_{Un} .

Средний ток через вентиль находится по формуле

$$I_a = \frac{\frac{U_{cpl}}{z_m} \left[1 - \left(\frac{\vartheta_1}{180} \right)^2 \right]}{2\sqrt{2} \cos \frac{\vartheta_1}{2}}. \quad (83)$$

Для определения параметров инвертора (решения задачи синтеза) установлена связь между параметрами частотной характеристики и параметрами инвертора. Так

$$L_k = \frac{0.375}{\omega} \left[(R_{31} + z_k) \operatorname{tg} \varphi_1 \left(\frac{x_3}{z_1} \cdot \frac{\sin \varphi_3}{\sin \varphi_1} - \frac{1}{3} \right) + \frac{x_{31}}{3} - x_{33} \right], \quad (84)$$

$$C_k = \frac{1}{\omega [\omega L_k + x_{31} - (R_{31} + z_k) t g \varphi_1]} \quad (35)$$

Разработанный метод расчёта позволяет на основе частотных характеристик нагрузки или инвертора в целом рассчитать элементы и все токи и напряжения. Угол проводимости по предложенному методу определяется точнее, чем по всем известным методам расчёта, что является предпосылкой более точного расчёта и других величин.

В данном методе впервые даётся расчёт гармонического состава напряжения на нагрузке, т.е. определяется качество выходного напряжения.

В диссертации даётся методика инженерного расчёта колебательных автономных инверторов и пример расчёта преобразователя частоты, разработанного для одного из предприятий.

Предложенный метод может обеспечить также расчёт инвертора с нагрузкой, включённой через выпрямитель. Даны особенности расчёта такого инвертора.

В четвёртой главе описаны результаты экспериментальных исследований, проведённых на лабораторном стенде.

Расхождения при сравнении токов и напряжений, полученных точным методом в результате расчётов на ЭВМ и экспериментально не превышают 7%. Погрешности по углу не превышают 6 град.эл. Полученные погрешности находятся в пределах точности использованных электроизмерительных приборов и осциллографа С1-17.

Проверена возможность существования нескольких граничных режимов. Погрешности по частоте при определении граничных режимов до 3%.

Экспериментальные исследования переходных процессов проводились с целью выявления возможности достижения установившихся режимов при различных сочетаниях параметров и частот для разных областей работы инвертора. Исследования показали, что пуск инвертора в области частот ниже первого граничного режима не вызывает затруднений. Пуск инвертора в области частот выше второго граничного режима вызывает трудности (возникает режим принудительной коммутации) и возможен не во всей области работы инвертора. Так как пуск возможен не во всех режимах, которые физически реализуются при установившемся процессе, то для достижения таких режимов необходима разработка специальных методов пуска.

Для исключения срывов работы колебательного инвертора при преждевременном переходе обратного напряжения на тиристоре через нуль предложен новый способ управления. Способ состоит в том, что разре-

шение на включение следующего тиристора осуществляется в схеме управления только тогда, когда проходит достаточное время для восстановления управляемости выключившегося тиристора. Поскольку время выключения тиристоров в определённом диапазоне является функцией величины приложенного обратного напряжения, то время запрета включения последующего вентиля должно зависеть от его величины. При реализации данного способа учитываются эти зависимости. Таким образом, во всех переходных режимах, включая пусковые, устраивается возможность срывов работы колебательного инвертора, а также перехода его в режим принудительной коммутации. Пуск происходит при существенно облегчённых условиях при сильно прерывистом токе.

В работе дана оценка точности предложенного инженерного метода по сравнению с экспериментальными данными и данными точного расчёта на ЭЦВМ. Погрешности по углу проводимости не превышают 2%, а по углу, предоставляемому на восстановление управляемости - 2-3 град.эл. Погрешности в определении токов и напряжений не превышают 4%.

В заключение описаны практические разработки колебательных инверторов, рассчитанных методами, предложенными автором.

Метод расчёта колебательных инверторов, работающих на нагрузку включённую через выпрямитель, был использован при разработке тиристорного возбудителя для тягового двигателя электровоза *ЕЛ-1*, обеспечивающего режим рекуперативного торможения. При разработке тиристорного преобразователя для ультразвуковой очистки был использован точный метод расчёта, а на его основе - элементы инженерного метода. Имеется отзыв предприятия о соответствии разработанного преобразователя требованиям технического задания и его использовании по назначению.

Разработанный метод был применён также при разработке статического преобразователя частоты мощностью 2 кВт. По данной работе автор являлся ответственным исполнителем. На основе данной разработки НИИИТом был изготовлен опытный образец стабилизированного источника питания.

В заключении сформулированы следующие основные результаты работы.

I. Известные методы инженерного расчёта колебательных автономных инверторов, базирующиеся в основном, на методе первой гармоники и замене сложных схем инверторов простыми эквивалентами, упрощая анализ работы, могут вносить большие погрешности, что существенно ограничивает область их применения. В связи с этим известные методы без дополнительного анализа или экспериментального исследования не могут быть использованы в общем случае расчёта колебательных инверторов при произвольной нагрузке.

2. Разработанный метод расчёта колебательных автономных инверторов на ЭЦВИ позволил провести широкий анализ режимов последовательно-параллельного инвертора с активной или активно-индуктивной нагрузкой при любых сочетаниях параметров с учётом потерь и оценить на основе его точность и области возможного использования существующих инженерных методов расчёта колебательных инверторов.

3. Рассмотрены зависимости напряжений, токов, угла проводимости угла, предоставляемого на выключение, а также коэффициента гармоник от параметров схемы. Показано, что все параметры a , b , d , ω , d_k оказывают существенное влияние на режим работы инвертора, поэтому аналитическое или графическое представление полной информации, полученной в результате точных расчётов в этих координатах практически невозможно.

4. Установлена возможность существования нескольких граничных режимов работы колебательного инвертора, показана связь областей возможной работы в режиме прерывистого тока с корнями характеристического уравнения, парциальными частотами и частотными характеристиками инвертора.

5. Показано, что необходимым условием возникновения нескольких граничных режимов является наличие петли в отрицательной полуплоскости амплитудно-фазовой характеристики цепи инвертора.

6. Предложен и разработан частотный метод анализа и расчёта колебательных инверторов.

7. Показано, что длительность тока через вентиль определяется частотной характеристикой цепи инвертора. Предложенные обобщённые параметры $\frac{d_3}{\omega}$, φ_1 и φ_3 однозначно и с высокой степенью точности определяют угол проводимости независимо от схемы инвертора при любом произвольном сочетании его параметров.

8. В координатах $\frac{d_3}{\omega}$, φ_1 , при $\varphi_3 = \text{const}$ построены обобщённые кривые для определения угла проводимости, угла, предоставляемого на выключение и амплитуды напряжения на тиристоре.

9. Разработанный инженерный метод, основанный на использовании обобщённых кривых и простых аналитических соотношений, позволяет обеспечить высокую точность расчёта параметров колебательных инверторов и их режимов, включая качество выходного напряжения.

10. Показана возможность использования предложенного инженерного метода для расчёта колебательных инверторов с нагрузкой, включённой через выпрямитель.

11. Экспериментальные исследования переходных процессов подтвердили возможности работы инвертора в двух областях при частотах ниже первого и между вторым и третьим граничными режимами. Однако, пуск

во второй области встречает затруднения и не всегда возможен. Предложенная система управления позволила резко повысить устойчивость работы инвертора в любых переходных режимах. При применении разработанной системы управления возможен пуск при любой частоте.

12. Применение предложенных алгоритмов и программ точного, а также инженерного метода расчёта при разработке тиристорного возбудителя для тягового двигателя электровоза *ЕЛ-1*, автономного источника питания специального назначения и инвертора для ультразвуковой очистки позволили за счёт повышения точности расчётов выбрать оптимальные варианты параметров этих установок. Работоспособность разработанных и внедрённых инверторов подтверждает правильность выполненных расчётов.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Савинова Д.В. К расчёту последовательно-параллельного инвертора. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". (Краткое изложение докладов к научно-технической конференции). Челябинск, ЧПИ, 1969.

2. Баев А.В., Савинова Д.В. Последовательно-параллельный инвертор с выпрямительной нагрузкой. В сб.: "Вентильные преобразователи частоты. Схемы и коммутационные процессы". Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Свердловск, 1969.

3. Савинова Д.В. Методика расчёта последовательно-параллельного инвертора, работающего за выпрямитель. В сб.: "Вентильные преобразователи в энергетических установках" № 70, Челябинск, 1970.

4. Савинова Д.В., Баев А.В. Применение ЭЦВМ для расчёта электромагнитных процессов в последовательно-параллельном автономном инверторе. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий" № 95, Челябинск, 1971.

5. Баев А.В., Савинова Д.В. Анализ электромагнитных процессов в автономных инверторах, работающих на активно-индуктивную нагрузку. Материалы XXIII научно-технической конференции института (ЧПИ). Челябинск, 1971.

6. Баев А.В., Савинова Д.В. Анализ процессов в последовательно-параллельном инверторе с учётом потерь. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Тезисы докладов к научно-техническому совещанию, которое состоится в феврале 1973 года. Челябинск, 1972.

7. Баев А.В., Савинова Д.В. О граничных режимах работы последовательно-параллельного инвертора. В сб.: "Исследование автомати-

зированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей" № 124, Челябинск, 1978.

8. Савинова Д.В., Баев А.В. Оценка погрешностей приближённых методов расчёта последовательно-параллельного автономного инвертора. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий" № 122, Челябинск, 1973.

9. Савинова Д.В. Анализ электромагнитных процессов в последовательно-параллельном автономном инверторе. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий" № 122, Челябинск, 1973.

10. Баев А.В., Савинова Д.В. Анализ и расчёт электромагнитных процессов в последовательно-параллельном автономном инверторе. В сб.: "Повышение эффективности устройств преобразовательной техники". Материалы научно-технической конференции. Часть II. "Наукова думка", Киев, 1972.

11. Гельман И.В., Савинова Д.В. Методы расчёта колебательных автономных инверторов с применением частотных характеристик с помощью ЭЦВМ. Тезисы докладов к Всесоюезному научно-техническому семинару: "Разработка и промышленное применение полупроводниковых преобразователей для индукционного нагрева металлов", Уфа, 1974.

12. Савинова Д.В. Исследование характеристик включения тиристоров. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", вып.2, Челябинск, 1966.

13. Савинова Д.В. К вопросу снижения потерь при включении тиристоров. В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий" № 48, Челябинск, 1968.