



Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ГОЛЬДШТЕЙН Михаил Ефимович

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК ПО
ВЕНТИЛЯМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Специальность 05.12.08 - "Электронная техника
и приборы"

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1976

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель -

кандидат технических наук, доцент

М. В. ГЕЛЬМАН.

Официальные оппоненты -

доктор технических наук, профессор

В. Н. ЗАЖИРКО
(г. Омск);

кандидат технических наук, доцент

О. Н. КАЗЬМИН
(г. Челябинск).

Будущее предприятие - завод Уралэлектротрактор им. В. И. Ленина
(г. Свердловск)

Автореферат разослан " _____ " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " 10 " декабря 1975 г.,
в 15 часов, на заседании Совета по присуждению ученых степеней при-
боростроительного и энергетического факультетов Челябинского поли-
технического института им. Ленинского комсомола в ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

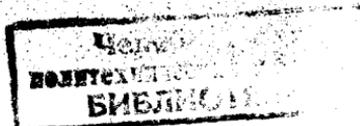
Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся те-
мой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или
прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу:
454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В. И. Ленина, 76, Ученому секре-
тарю Совета института.

Ученый секретарь Совета

кандидат технических наук, доцент



Д. А. КОРОЛЕНКО



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Программа научно-технического прогресса, принятая XXIV съездом КПСС и осуществляемая советским народом предусматривает широкое внедрение силовой полупроводниковой техники в различные области народного хозяйства.

Отечественной промышленностью освоен выпуск кремниевых вентиляей на токи 1000 А и напряжения 3,5-4 кВ. При создании преобразователей электрической энергии большой мощности применяется групповое (параллельное и последовательное) соединение вентиляей. Рост единичной мощности преобразователей приводит к тому, что, несмотря на увеличение номинальных токов полупроводниковых вентиляей, их параллельное включение наряду с параллельным соединением вентиляйных блоков, а также твердых вентиляйных схем, будет продолжать широко применяться во вновь разрабатываемых преобразователях. Параллельное соединение вентиляей является и средством увеличения надежности преобразователей, так как позволяет обеспечить их безотказную работу при отказе одного или нескольких вентиляей.

Современная технология производства не позволяет комплектовать преобразователи вентиляями с полностью одинаковыми параметрами. Поэтому необходимо создание методов и средств для наилучшего распределения токов и температур полупроводниковых структур (ТПС) параллельно включенных вентиляей. В решение этих задач внесли вклад многие ученые, в числе которых А.Е.Алексеев, А.В.Башарин, В.А.Бунько, И.С.Ефремов, С.Д.Соколов, И.Г.Толстов, И.П.Чучалин, В.П.Шипилю, Э.М.Алтер, В.С.Богрий, Ф.Н.Голубев, Г.А.Куртосов, И.А.Мугимштейн, О.А.Некрасов, И.Р.Линдберг и др.

При разработке преобразователей большой мощности с номинальными токами вентиляей 200-1000 А первостепенными являются задачи создания высокоэффективных надежных схем выравнивания нагрузок параллельно включенных вентиляей и задачи снижения влияния магнитных полей сборных шин на условия их работы.

Цель работы - исследование и разработка методов и средств выравнивания и контроля нагрузок параллельных ветвей вентиляйных преобразователей большой мощности.

В связи с этим задачей, решаемой в диссертации, формулируются следующие образои:

- 1) оценить существующие методы и средства выравнивания нагрузок

параллельных ветвей с учетом возможных их обрывов и выявить наиболее целесообразные для преобразователей большой мощности;

2) выполнить в общем виде для различных схем выравнивания токов, работающих с обрывом параллельной ветви, анализ электромагнитных процессов в группе вентилях и установить взаимосвязи между их токами небаланса параметрами вентилях, делителей тока и сборных шин преобразователя;

3) выявить взаимосвязи ТПС параллельно включенных вентилях с конструктивными параметрами преобразователей и разработать инженерные методы выбора параметров группы вентилях в преобразователях большой мощности с учетом возможных обрывов параллельных ветвей;

4) исследовать методы измерения токораспределения между параллельными ветвями вентилях преобразователей и разработать прибор, предназначенный для таких измерений;

5) провести промышленные испытания разрабатываемых средств выравнивания и контроля нагрузок параллельных ветвей и определить возможности их применения.

Общая методика выполнения исследований сочетает теоретические и экспериментальные методы. При сравнении схем делителей по работе с обрывом параллельных ветвей и схем подвода тока к сборным шинам преобразователя применены качественные методы, позволяющие выбрать наилучший вариант, не применяя громоздких вычислений. При анализе электромагнитных процессов применен метод контурных токов в сочетании с преобразованием Лапласа, позволившим получить ток параллельной ветви в виде суммы реакций на отдельные виды возмущений. Анализ предельных параметров группы и анализ погрешности измерения токораспределения выполнялись статистико-вероятностными методами. Экспериментальная проверка методов расчета проведена на промышленных преобразователях при испытании и внедрении разработанных индуктивных делителей тока (ИДТ) и приборов для измерения токораспределения.

Научная новизна. В общем виде для группы параллельных вентилях, работающих как в нормальном режиме так и с обрывом параллельных ветвей, с различными схемами выравнивания токов, с учетом индуктивностей и взаимоиндуктивностей участков сборных шин выполнен анализ электромагнитных процессов. Определены взаимосвязи между предельно допустимыми нагрузками вентилях и статистическими распределениями их пара-

метров, параметрами ИДТ и сборных шин и взаимосвязи между погрешностью измерения токораспределения и диапазоном изменения нагрузки преобразователя во время измерений.

Практическая ценность. Предложенные методы расчета позволяют выбирать предельные нагрузки вентиляей, число параллельных ветвей и параметры ИДТ при проектировании преобразователей большой мощности с компенсированными и некомпенсированными магнитными полями сборных шин и позволяют определить допустимые колебания нагрузки преобразователя при измерениях токораспределения. Предложена схема ИДТ - двойная замкнутая цепочка,* обеспечивающая выравнивание токов параллельных ветвей при обрыве одной или двух из них. Предложенный способ измерения вентиляйных токов [13] и способ ** и устройство [14] деления сигналов позволили создать прибор для измерения токораспределения в вентиляйных преобразователях.

Реализация работы в промышленности. Делители тока, выполненные по схеме двойной замкнутой цепочки, прошли заводские испытания и устанавливаются на серийных преобразователях, выпускаемых заводом Уралэлектротяжмаш. В частности в 1975 году этими делителями укомплектованы преобразователи типа КУВ $\frac{320 \times 6}{22 \times 1}$ х 6М, КУВ $\frac{320 \times 6}{22 \times 2}$ х 6М, КУВ $\frac{320 \times 6}{22 \times 3}$ х 6М, КУВ $\frac{320 \times 6}{22 \times 3}$ х 6М, предназначенные для систем тиристорного возбуждения генераторов Усть-Илимской, Саратовской, Красноярской ГЭС, ГЭС Дженепег (Канада), АЭС Ловизаа (Финляндия). Разработанные делители с декабря 1973 года эксплуатируются на вентиляйных секциях ШВП-7500/24 (с одиннадцатью параллельными ветвями), питающих линию электролитического лужения листопркатного цеха Р 2 Магнитогорского металлургического комбината. Таллинским электротехническим заводом принято решение об установке этих делителей на вновь разрабатываемых преобразователях на токи 5000 А с испарительным охлаждением и тиристорами ТД-630. Приборы для измерения токораспределения типа ИВТ-2/3 в настоящее время эксплуатируются заводами Уралэлектротяжмаш и Таллинским электротехническим, Магнитогорским металлургическим комбинатом и Троицкой ГРЭС.

* Индуктивный делитель тока. Положительное решение ВНИИГПД от 25.07.1975 по валяке № 1847080/24-7 от 17.11.1972. (Соватор Гельман М.В.).

** Способ деления двух непрерывных электрических сигналов. Положительное решение ВНИИГПД от 28.03.1974 по валяке № 1891074/18-24 от 9.03.1973. (Соваторы Портнов Е.В., Секигов П.И.)

Апробация работ. Диссертационная работа и отдельные ее разделы обсуждались на:

Всесоюзной научно-технической конференции "Современные задачи преобразовательной техники", Киев, 1975;

8-ой традиционной научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства НИИ АЭМ, ТИАСУР и ТПИ, Томск, 1973;
на технических совещаниях заводов Уралэлектротяжмаш (1972, 1974 г.г.), Таллинского электротехнического (1975 г.), Магнитогорского металлургического комбината (1974 г.);

научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1972, 1973, 1974, 1975 г.г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 15 статей, получено 2 авторских свидетельства и 2 положительных решения ВНИИГПЭ по заявкам на изобретение.

Объем работ. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, приложения и содержит 142 страницы машинописного текста, 45 рисунков, 11 таблиц, список использованной литературы из 122 наименований и приложение на 34 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе анализа методов распределения нагрузок по вентилям мощных преобразователей сформулированы требования к ИДТ и выполнено качественное сравнение их работы при обрыве параллельных ветвей.

Включая вентили на параллельную работу следует свести к минимуму разброс их ТПС. Если токораспределение между параллельными ветвями определяется только параметрами вентилях, то, как показал ряд исследований, минимум может быть достигнут при оптимальных значениях токов небаланса параллельных ветвей.

Наиболее перспективным методом снижения токов небаланса (в частности до оптимальных значений) является применение ИДТ. Однако ряд схем ИДТ неудовлетворительно работает в наиболее распространенном аномальном режиме преобразователей, появляющемся при обрыве параллельных ветвей.

Предложена схема делителя - двойная замкнутая цепочка, обеспечивающая взаимоиндуктивные связи как между соседними параллельными

ветвями так и между ветвями, номера которых отличаются на два. Схема эффективно выравнивает токи при обрыве одной или двух параллельных ветвей.

Особенности работы схем ИДТ без обрыва и с обрывом параллельных ветвей можно проследить, анализируя в этих режимах характер и величину взаимоиндуктивных связей между отдельными ветвями. Эти связи характеризуются матрицей и схемой магнитных связей. По главной диагонали матрицы располагаются индуктивности делителя, входящие в параллельные ветви. Остальными элементами являются взаимоиндуктивности между параллельными ветвями, номера которых соответственно равны номеру строки и столбца, на пересечении которых находится рассматриваемый элемент. Наглядней будут матрицы, записанные в относительных единицах. Для этого надо каждую строку исходной матрицы разделить на суммарную индуктивность одной из параллельных ветвей. На схемах магнитных связей узлами показываются параллельные ветви, а линиями между узлами взаимоиндуктивные связи между соответствующими ветвями.

При обрыве параллельной ветви из-за насыщения магнитопровода, на котором расположена обмотка делителя, включенная в эту ветвь, нарушается ряд взаимоиндуктивных связей, реализуемых в делителе через эту ветвь. В результате схема магнитных связей изменяется (в ней отсутствует соответствующий оборванной ветви узел и все связи, идущие к нему). Это изменение отражается и в матрице магнитных связей.

С помощью матриц и схем магнитных связей рассмотрены особенности работы различных схем ИДТ при обрывах параллельных ветвей. В результате показано, что с точки зрения сохранения работоспособности преобразователя при обрывах параллельных ветвей все схемы могут быть разделены на три группы.

К первой — относятся схемы, работа которых нарушается при обрыве одной параллельной ветви (невозможна принципиально). Такими схемами являются схема незамкнутая цепочка, схема с ведущим вентиляем, делитель со связями между всеми параллельными ветвями, осуществляемыми с помощью обмоток с различным числом витков.

К второй группе относятся схемы, индуктивности обмоток которых выбираются из условия обеспечения требуемого токораспределения при обрыве одной из параллельных ветвей. Таковы схемы замкнутой и двойной замкнутой цепочки, с короткозамкнутым витком и многостержневым магнитопроводом.

К третьей группе относятся схемы, для сохранения работоспособности которых при обрыве параллельных ветвей не надо принимать дополнительных мер. Такова схема без взаимоиндуктивных связей между параллельными ветвями.

Требования надежности, предъявляемые к преобразователям систем возбуждения турбогенераторов и гидрогенераторов и систем мощного электропривода, позволяют применять в них только схемы второй и третьей групп. Ряд ИДТ с взаимоиндуктивными связями также как и индивидуальные реакторы являются конструктивными и обеспечивают требуемое токораспределение и при обрывах параллельных ветвей. В преобразователях большой мощности таким делителям должно быть отдано предпочтение, так как они имеют лучшие технико-экономические показатели (меньшие потери и меньший расход меди) чем индивидуальные реакторы, включенные в параллельные ветви.

Во второй главе в общем виде для различных схем выравнивания токов, сохраняющих работоспособность и при обрыве параллельных ветвей, выполнен анализ электромагнитных процессов в группе параллельно и последовательно включенных вентилях. Анализ учитывает влияние активных сопротивлений и магнитных полей сборных шин на токораспределение между параллельными ветвями.

Существует большое количество работ, в которых выполняется анализ электромагнитных процессов в группе параллельно включенных вентилях на интервале их проводящего состояния. В некоторых из них ток небаланса параллельных ветвей вычисляется со значительной точностью. Однако задача решается или графоаналитическими или вычислительными методами. Поэтому в этих работах не получено общее выражение для тока небаланса параллельных ветвей, и их результаты не могут быть применимы для статистико-вероятностного анализа нагрузок вентилях.

В другой группе работ найдено общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы при групповом соединении вентилях. Среди этих исследований следует отметить работу Быкова Д.М. и Шипилова В.П., в которой впервые на основе единой методики анализируется большое количество схем выравнивания токов. Однако в этих работах либо имеются значительные допущения, не позволяющие произвести анализ с достаточной полнотой, либо решения не обладают общностью и не могут быть в одинаковом виде распространены на различные схемы выравнивания токов как в нормальном режиме

их работы так и при обрыве параллельных ветвей. Ни в одной из этих работ не учтено влияние магнитных полей сборных шин преобразователя на параллельную работу вентиляей. Таким образом, ни одна из рассмотренных работ не отвечает в полной мере поставленной задаче.

При анализе электромагнитных процессов в группе вентиляей принято, что группа подключена к источнику тока $n\bar{i}$ (n — число параллельных ветвей в группе, \bar{i} — среднееарифметическое значение токов всех ветвей), вольтамперная характеристика вентиляей аппроксимируется кусочно-линейной функцией (пороговое напряжение U_n и динамическое сопротивление r), параметры которой на рабочем участке не зависят от ТПС вентиляей, индуктивности делителя и участков сборных шин не зависят от тока.

Участки сборных шин преобразователя между отдельными параллельными ветвями заменяются активными сопротивлениями и индуктивностями. При этом учитываются и взаимные индуктивности как между участками одной и той же шин так и взаимные индуктивности между участками различных шин (подводящей и отводящей ток от плеча). Это позволяет провести анализ влияния конструктивных параметров сборных шин плеча (их геометрических размеров и расстояний между ними, расстояний между параллельными ветвями, характера подвода тока к сборным шинам) на условия параллельной работы вентиляей.

При написании уравнений, описывающих электромагнитные процессы в группе вентиляей, принят метод контурных токов. Преимущества этого метода проявляются, если в качестве отдельного независимого контура выбирается контур, состоящий из параллельной ветви, участков сборных шин между этой параллельной ветвью и точками подвода тока к плечу и генератора $n\bar{i}$. При таком выборе независимых контуров задача сводится к нахождению контурных токов, так как они равны искомым токам параллельных ветвей, входящих в эти контура.

Представив параметры вентиляей и их токи а также входящие в отдельные контура индуктивности и активные сопротивления сборных шин в виде суммы соответствующих среднееарифметических значений ($\bar{U}_n, \bar{r}, \bar{L}_{ш}, \bar{r}_{ш}$) и отклонений от них ($\Delta U_n, \Delta r, \Delta L_{ш}, \Delta r_{ш}$), пренебрегая бесконечно малыми величинами второго порядка малости, систему уравнений запишем в форме прямого преобразования Лапласа:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n \Delta i_k = 0 & j = 1, 2, 3, \dots (n-1) \\ \sum_{k=1}^n M_{jk} p \Delta i_k + r \Delta i_j = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^n U_{jk} - i \sum_{k=1}^n \Delta r_{jk} - \Delta L_{ш} (p \bar{i} - \bar{i}_0) - \Delta r_{ш} \bar{i} + \sum_{k=1}^n M_{jk} \Delta i_k \end{cases} \quad (1)$$

Здесь M_{jk}^* - взаимноиндуктивность ИДТ между ветвями j и k ;
 Δi_{ok}^* - начальное значение тока небаланса ветви k ;
 C - число последовательных вентилей в ветви.

Обозначив правые части этих уравнений через a_j , найдем ток небаланса ветви k :

$$\Delta i_k^* = \sum_{j=2}^n a_j \frac{|B_{jk}^*|}{PL|B^*|} \quad (2)$$

где L - суммарная индуктивность обмоток делителя, включенных в одну ветвь;

$$|B^*| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ M_{21}^* & M_{22}^* - \alpha & M_{23}^* & \dots & M_{2n}^* \\ M_{31}^* & M_{32}^* & M_{33}^* - \alpha & \dots & M_{3n}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1}^* & M_{n2}^* & M_{n3}^* & \dots & M_{nn}^* - \alpha \end{vmatrix} \quad (3)$$

$|B_{jk}^*|$ - алгебраические дополнения этого определителя;

$$M_{jk}^* = M_{jk} / L ; \quad \alpha = -r / \rho L$$

Таким образом, ток небаланса ветви k можно представить в виде суммы отдельных слагаемых, каждое из которых учитывает влияние одного из факторов, приводящих к отклонению токов параллельных ветвей от среднеарифметического значения;

$$\Delta i_k^* = \Delta i_k^* (\Delta L_{\text{ин}}) + \Delta i_k^* (\Delta r_{\text{ин}}) + \Delta i_k^* (\Delta U_{\text{н}}) + \Delta i_k^* (\Delta r) + \Delta i_k^* (\Delta i_o) \quad (4)$$

Значения отдельных слагаемых этого выражения, записанные в операторной форме, и средние за период значения слагаемых тока небаланса в общем виде, а также для симметричных и остальных (несимметричных) схем выравнивания токов (к симметричным отнесены схемы, в которых равны все взаимные индуктивности M_{qjk}) приводятся в табл.1. Форма суммарного тока плеча принята трапециевидальная.

В табл.1 вводятся следующие обозначения:

\bar{I} - среднее за период T значение тока \bar{i} ;

t_k, σ - соответственно интервалы коммутации и проводимости (при $f=0$);

τ_1, τ_2, τ - постоянные времени делителя токов ($\tau = L/r$);

Таблица 1

Слагаемые тока небаланса параллельной ветви

Слагаемое $\Delta \zeta_k$	Операторная форма записи	Среднее за период значение тока небаланса			несимметричные схемы
		$L=0$	в общем виде	симметричные схемы	
$\Delta \zeta_1 (\Delta L_{m1})$	$-\sum_{j=2}^n \Delta L_{mj} \cdot (p \vec{I} \vec{I}_0) \frac{ B_{jk} }{PL B^* }$	0	$-\sum_{j=2}^n \Delta L_{mj} \cdot C_j$	$C_j = \frac{\sigma}{\sigma^2} (1-e^{-\sigma t})$ при $j=k$ $C_j = 0$ при $j \neq k$	$G_j = \sum_{f=1}^n \sigma_f N_{jk} (\sigma_f) C_f$ $C_f = \frac{\sigma_f}{\sigma} (1-e^{-\sigma_f t}) (1-e^{-\sigma t})$
$\Delta \zeta_2 (\Delta C_1)$	$-\sum_{j=2}^n \Delta C_{mj} \frac{ B_{jk} }{PL B^* }$	$-\sum_{j=2}^n \frac{\Delta C_{mj}}{r}$	$-\sum_{j=2}^n \Delta C_{mj} G_j$	$G_j = 1 - \sum C_j$ при $j=k$ $G_j = 0$ при $j \neq k$	$G_j = \sum_{f=1}^n \sigma_f N_{jk} (\sigma_f) [1 - \sum C_f]$
$\Delta \zeta_3 (\Delta r)$	$-\sum_{j=2}^n \Delta r_j \frac{ B_{jk} }{PL B^* }$	$-\sum_{j=2}^n \frac{\Delta r_j}{r}$	$-\sum_{j=2}^n \Delta r_j G_j$	$G_j = 1 - \sum C_j$ при $j=k$ $G_j = 0$ при $j \neq k$	$G_j = \sum_{f=1}^n \sigma_f N_{jk} (\sigma_f) [1 - \sum C_f]$
$\Delta \zeta_4 (\Delta \sigma_1)$	$-\sum_{j=2}^n \Delta \sigma_{1j} \frac{ B_{jk} }{PL B^* }$	$-\frac{\Delta \sigma_{1j}}{r}$	$-\sum_{j=2}^n \Delta \sigma_{1j} W_j$	$W_j = \frac{\sigma_j}{r} (1 - \sum C_j - V_j)$ при $j=k$ $W_j = 0$ при $j \neq k$	$W_j = \sum_{f=1}^n N_{jk} (\sigma_f) W_f$ $W_f = \frac{\sigma_f}{r} (1 - \sum C_f) - V_f$
$\Delta \zeta_5 (\Delta \sigma_2)$	$\sum_{j=2}^n M_{jk}^* \Delta \sigma_{2j} \frac{ B_{jk} }{PL B^* }$	0	$\sum_{j=2}^n M_{jk}^* \Delta \sigma_{2j} V_j$	$V_j = \frac{\sigma_j}{r} (1 - e^{-\frac{\sigma_j t}{T}})$ при $j=k$ $V_j = 0$ при $j \neq k$	$V_j = \sum_{f=1}^n N_{jk} (\sigma_f) V_f$ $V_f = \frac{\sigma_f}{r} (1 - e^{-\frac{\sigma_f t}{T}})$

x_j - собственные значения матрицы, образованной из матрицы $|B^*|$ путем вычитания первого столбца из всех остальных;

$$N_{jk} = -\frac{|B_{jk}^*(x_j)|}{x_j |B^*(x_j)|}$$

Анализ отдельных слагаемых тока небаланса показывает, что каждое из них может быть представлено в виде произведения параметра, из-за которого появляется это слагаемое, (зависящего от типа применяемых вентилях или конструкции сборных шин преобразователя) и универсальной (не зависящей от типа вентилях, из которых комплектуется преобразователь) функции схемы и параметров ИДТ.

В третьей главе выявлены зависимости максимальных значений токов небаланса параллельных ветвей не только от параметров вентилях и делителей тока, но и магнитных полей сборных шин. При этом ток небаланса рассматривается как функция случайных аргументов - параметров вентилях.

Наибольшее значение тока небаланса параллельных ветвей, характерное для преобразователя, определяется при нормированной вероятности p достижения этой величины:

$$\Delta I_p = m(\Delta I) + \sqrt{p} \sqrt{D(\Delta I)} \quad (5)$$

Математическое ожидание $m(\Delta I)$ и дисперсию $D(\Delta I)$ среднего за период значения тока небаланса находим, применяя к его функции от параметров вентилях теоремы о числовых характеристиках линейных функций и, учитывая, что математические ожидания параметров $\Delta u_n, \Delta r, \Delta l_n$ равны нулю.

$$m(\Delta I_n) = \bar{I} m^*(\Delta I_n) = \bar{I} \Delta I_{m^*} = \bar{I} \left[-\frac{1}{r} \left(\sum_{j=2}^n \Delta L_{mj} C_j + \sum_{j=1}^n \Delta l_{mj} G_j \right) \right]; \quad (6)$$

$$D(\Delta I_n) = \frac{c}{r} W^2 D(u_n) + c \frac{\bar{I}^2}{r^2} G D(r) + 2c \frac{\bar{I}}{r^2} F' K(r, u_n) + V^2 D(l_n). \quad (7)$$

при значениях функций w', G', F', V' приведенных в табл. 2.

Характерно, что эти функции не зависят от параметров вентилях, а определяют только схему выравнивания токов и в этом смысле (как и функции c, e, w, v) являются универсальными. Набор таких функций позволяет вычислить максимальные значения тока небаланса характерные для преобразователя.

Для симметричных схем выравнивания токов

$$m^*(\Delta I_n) = -\frac{1}{r} (\Delta L_{mna} C_n + \Delta l_{mna} G_n) \quad (8)$$

и появляется явная зависимость дисперсии тока небаланса от числа

Таблица 2

Универсальные функции параметров ИДТ

Универсальная функция	Несимметричные схемы	Симметричные схемы
W'	$\frac{n-1}{n} \sum_{j=2}^n W_j^2 - \frac{2}{n} \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n W_j W_i$	$\frac{n-1}{n} W_a^2$
G'	$\frac{n-1}{n} \sum_{j=2}^n G_j^2 - \frac{2}{n} \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n G_j G_i$	$\frac{n-1}{n} G_a^2$
V'	$\frac{n-1}{n} \sum_{j=2}^n V_j^2 - \frac{2}{n} \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n V_j V_i$	$\frac{n-1}{n} V_a^2$
F'	$\frac{n-1}{n} \sum_{j=2}^n W_j G_j - \frac{1}{n} \sum_{j=2}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n (W_j G_i + W_i G_j)$	$\frac{n-1}{n} W_a G_a$

параллельных ветвей:

$$\mathcal{D}(\Delta I_0) = \frac{n-1}{n} \mathcal{D}_0(\Delta I_a) \quad (9)$$

$$\text{при } \mathcal{D}_0(\Delta I_a) = c \frac{\sigma^2}{r^2} \mathcal{D}(r) + c \frac{r}{r^2} W_a^2 \mathcal{D}(u_n) + 2c \frac{\sigma}{r^2} W_a G_a K(r, u_n) + V_a^2 \mathcal{D}(i_0) \quad (10)$$

Здесь $\mathcal{D}(r)$, $\mathcal{D}(u_n)$, $\mathcal{D}(i_0)$ — соответственно дисперсии динамических сопротивлений, пороговых напряжений и начальных значений токов ветвей;

$K(r, u_n)$ — корреляционный момент параметров r и u_n .

Заметим, что математическое ожидание тока небаланса параллельной ветви отличается от нуля из-за конструктивной асимметрии преобразователя — влияния активных сопротивлений и магнитных полей сборных шин на токораспределение и наличие соответствующей составляющей в токе небаланса. Исследования показали, что при числе параллельных ветвей больше пяти доля ее в токе небаланса существенная и, в частности, для преобразователей серии КУВ $\frac{250 \times \eta}{\delta \times c}$ х 6М и КУВ $\frac{320 \times \eta}{\delta \times c}$ х 6М составляет от 15% (при схеме ИДТ двойная замкнутая цепочка и $n=5$) до 80% (при $n=10$).

Эта составляющая тока небаланса неоднозначно зависит от постоянной времени делителя токов, так как, с одной стороны, с ростом постоянной времени уменьшается амплитуда составляющей в интервалы коммутации, а с другой, — снижается скорость приближения к нулю на участке между первым и вторым интервалами коммутации. Тем не менее для преоб-

разователей с ИДТ, выполненными по симметричным схемам или схеме двойной замкнутой цепочки, увеличение постоянной времени ИДТ в области практически приемлемых значений приводит к снижению этой составляющей (рис. 1).*

При числе параллельных ветвей ниже семи эффективней других ее снижение достигается делителями, выполненными по схеме двойной замкнутой цепочки (рис. 2). При числе параллельных ветвей больше десяти действия только делителей недостаточно - необходимо изменять и конструкцию сборных шин.

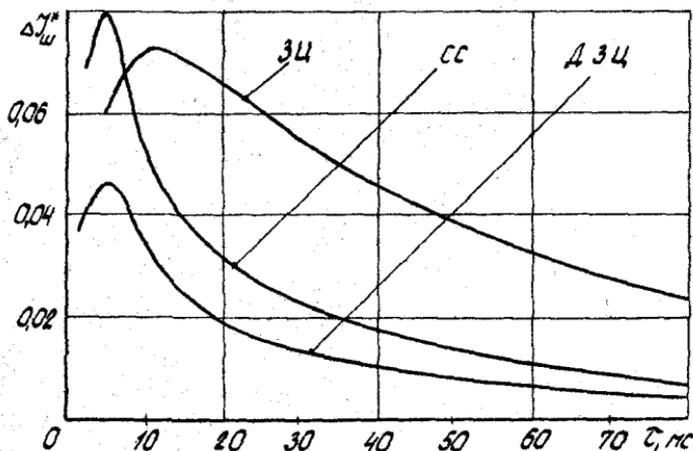


Рис. 1. Зависимость составляющей ΔJ_w^* от постоянной времени делителей, выполненных по схемам: симметричным (СС), замкнутой цепочки (ЗЦ), двойной замкнутой цепочки (ДЗЦ)

Обрыв параллельной ветви в преобразователе приводит к изменению взаимоиндуктивных связей между оставшимися в работе ветвями, то есть к изменению матрицы $\|g\|$ и величин M_{ijik} и G_{ijik} . При этом дисперсия тока небаланса в симметричных схемах остается одинаковой для всех параллельных ветвей, а в остальных схемах выравнивания токов есть ветви, у которых эта дисперсия наибольшая. Влияние магнитных полей и активных сопротивлений сборных шин приводит к тому, что математическое ожидание тока небаланса одной из ветвей также будет

* Все зависимости на рис. 1-5 построены для преобразователей типа КУВ $\frac{250 \times n}{8 \times c}$ х 6М, работающих с обрывом одной параллельной ветви.

наибольшим. Очевидно, при обрыве параллельной ветви максимальное значение ток небаланса примет в том случае, если этот обрыв приведет к появлению наибольшей дисперсии у ветви с максимальным значением математического ожидания тока небаланса. Вероятность такого сочетания значительна и условия работы вентилях в такой ветви самые тяжелые. Поэтому условия работы вентилях в такой ветви и будут определять допустимую нагрузку и параметры всей группы вентилях.

Выявление ветви с наибольшим значением ΔJ_{ω}^* и качественная оценка различных схем подвода тока к группе и схем присоединения венти-

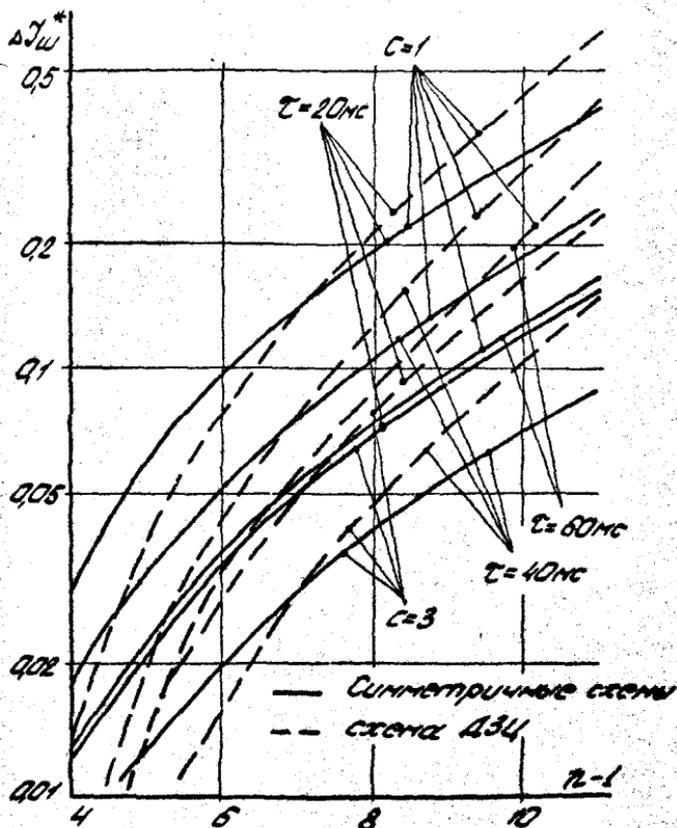


Рис. 2. Зависимости величины ΔJ_{ω}^* от числа параллельных ветвей при одном ($C=1$) и трех ($C=3$) вентилях в ветви

лей к сборным шинам выполняются приближенным методом путем сравнения падений напряжения на участках сборных шин между точками присоединения отдельных параллельных ветвей и точками подвода тока к сборным шинам.

В четвертой главе исследуются числовые характеристики функций распределения, мощностей и ТПС группы параллельно включенных вентилялей и определяются взаимосвязи между ее параметрами и допустимой нагрузкой. Рассматриваются методы решения практических задач по выбору параметров группы вентилялей.

Диапазон тепловых сопротивлений R и классификационных падений напряжений ΔU вентилялей, из которых комплектуется преобразователь, параметры ИДТ и сборных шин выбираются такими, чтобы температуры перегрева полупроводниковых структур вентилялей θ_p из-за потерь мощности P в них не превышали допустимой величины $\theta_{p, доп}$

$$\theta_p < \theta_{p, доп}$$

$$\theta_p = m(\theta_p) \cdot \sqrt{D(\theta_p)}; \quad m(\theta_p) = m(R)m(P); \quad D(\theta_p) = m^2(R)D(P) + m^2(P)D(R) \quad (11)$$

Если в преобразователе отсутствует влияние активных сопротивлений и магнитных полей сборных шин на токораспределение, то

$$m(P) = \bar{J}[m(\alpha_n) + K_p^2 \bar{J}m(r)] \quad (12)$$

и не зависит от токораспределения между ветвями. При влиянии сборных шин на токораспределение

$$m(P_{ин}) = m(P) \cdot \Delta P_{ин} \quad \text{при} \quad \Delta P_{ин} = \delta \bar{J} \Delta J_{ин}^* \quad \text{и} \quad \delta = \bar{\alpha}_n + 2K_p^2 \bar{J}F. \quad (13)$$

$$\text{Дисперсия } D(P) \text{ будет } D(P) = D(\Delta P) \cdot nc / (nc - 1) \quad (14)$$

$$\text{при } D(\Delta P) = \bar{J}^2 D(\Delta \alpha_n) + (K_p^2 \bar{J}^2)^2 D(\Delta r) + 2\bar{J}^3 K_p^2 K(\Delta r, \Delta \alpha_n) +$$

$$+ \delta^2 D(\Delta J) + 2\bar{J}\delta K(\Delta J, \Delta \alpha_n) + 2K_p^2 \bar{J}^2 \delta K(\Delta J, \Delta r), \quad (15)$$

где корреляционные моменты

$$K(\Delta J, \Delta \alpha_n) = -\frac{1}{r} [W_n - \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n W_j] D(\alpha_n) + \frac{1}{r} [G_n - \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n G_j] K(r, \alpha_n); \quad (16)$$

$$K(\Delta J, \Delta r) = -\frac{1}{r} [G_n - \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n G_j] D(r) + \frac{1}{r} [W_n - \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n W_j] K(r, \alpha_n).$$

Наличие этих корреляционных моментов и тот факт, что они отрицательны приводит к появлению минимума в зависимостях $D(\Delta P) = f(\tau)$ а значит при $\Delta J_{ин} = 0$ и в зависимостях $D(\theta_p) = f(\tau)$ и $\theta_p = f(\tau)$ (рис.3).

Постоянная времени ИДТ, обеспечивающая этот минимум, приводит к наименьшим предельным значениям ТПС группы вентилях и поэтому является оптимальной для группы. Чем менее развиты взаимдуктивные связи между параллельными ветвями (например в схеме делителя замкнутая цепочка по сравнению со схемой двойная замкнутая цепочка) тем больше величина оптимальной постоянной времени.

При влиянии факторов, снижающих корреляционные связи (уменьшение тока \bar{I} , увеличение числа последовательных вентилях в ветви (с), снижение диапазона Δu прямых падений напряжений вентилях, из которых комплектуется преобразователь), минимум в кривых становится менее выраженным.

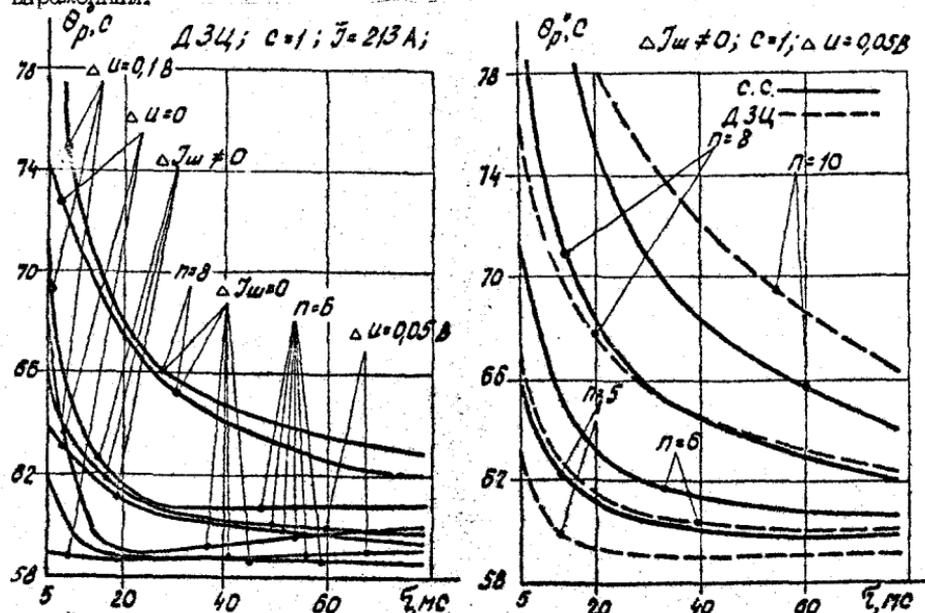


Рис. 3. Зависимости температуры перегрева вентилях от их параметров, параметров ИДТ и сборных шин

Характер зависимости отдельных слагаемых $\omega(\Delta p)$ от постоянной времени делителя предопределяет, что их левые ветви будут значительно круче правых. Поэтому постоянная времени делителя должна быть такой, чтобы ни при каких режимах преобразователя нельзя было попасть на левую ветвь этих зависимостей.

В преобразователях с компенсированными магнитными полями сборных

шли оптимальные постоянные времени лежат в области практически приемлемых значений. Поэтому при проектировании ИДТ для таких преобразователей следует и принимать оптимальное значение их постоянных времени. При этом удается осуществить и оптимальную величину корреляционных связей между токами небаланса параллельных вентиляей и их параметрами, и ТПС, соответствующие оптимальным постоянным времени ИДТ, практически не зависят ни от их схемы, ни от числа параллельных ветвей в группе, ни от диапазона прямых падений напряжений вентиляей, из которых комплектуется преобразователь, слабо зависят от числа вентиляей в ветви. Поэтому с помощью функций, определяющих взаимосвязь между максимальными ТПС вентиляей в группе и их допустимыми токами, при оптимальных постоянных времени ИДТ (рис.4) решаются задачи выбора числа параллельных вентиляей и их допустимых токов в преобразователях.

В преобразователях с нескомпенсированными магнитными полями обмоток увеличивается температура перегрева вентиляей (рис.5), минимум в кривых $\varrho_p = f(\tau)$ сдвигается в область больших (часто практически неприемлемых) значений τ . Поэтому выбор постоянной времени ИДТ и числа параллельных вентиляей в группе в этом случае производится непосредственно по допустимому значению ТПС вентиляей (рис. 3 и 5).

Выполненный анализ ТПС вентиляей с учетом функций распределения их параметров положен в основу разработанных методов выбора допустимых токов вентиляей, числа параллельных ветвей, постоянных времени делителей тока и их конструктивных размеров в преобразователях с компенсированными и некомпенсированными магнитными полями сборных шин.

В пятой главе анализируются примененные при исследованиях методы контроля состояния параллельных вентиляей. Показана эффективность контроля токораспределения между параллельными ветвями. Исследуются способы измерения токораспределения, и приводятся результаты разработки специализированного прибора для этих целей.

Распространенным методом измерения токораспределения является поочередное измерение токов вентиляей с последующим расчетом токов небаланса. Однако из-за колебаний нагрузки преобразователя во время измерений погрешность метода велика. Снизить погрешность можно, применив относительные методы измерений.

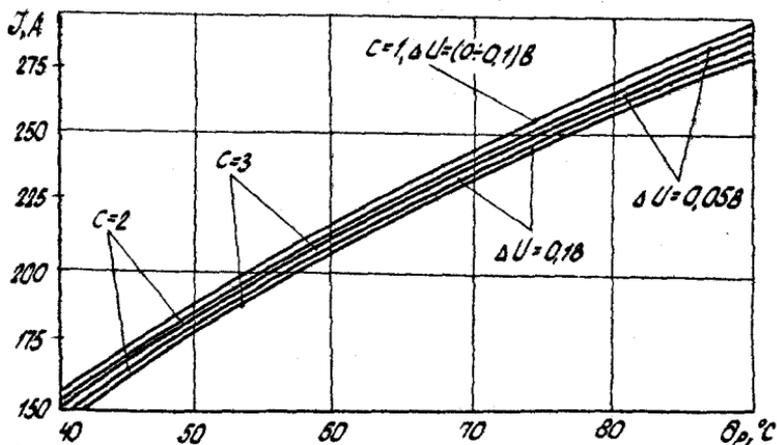


Рис.4. Взаимосвязь допустимых значений токов и температур перегрева вентилей для преобразователей с компенсированными магнитными полями сборных шин

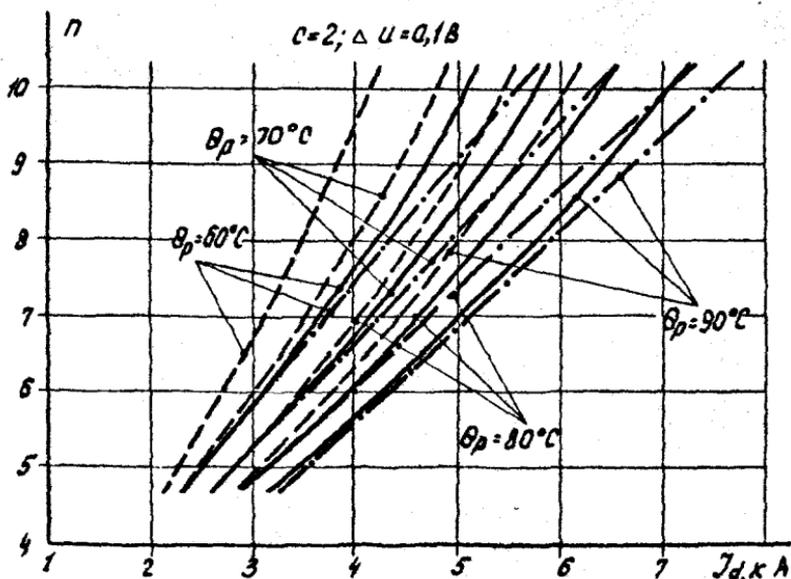


Рис.5. Зависимости числа параллельных ветвей от нагрузки преобразователя с компенсированными (---) и некомпенсированными магнитными полями сборных шин при $\epsilon = 30$ мс (—) и 2 мс (----)

Так как нагрузка преобразователя во время измерений является случайной величиной, то и измеренные значения токов небаланса случайные функции. Их анализ показывает, что математическое ожидание измеренного значения тока небаланса соответствует действительному значению тока небаланса при нагрузке преобразователя, равной ее математическому ожиданию. Взаимосвязь между дисперсией измеренного значения тока небаланса ΔI и дисперсией тока нагрузки I будет

$$D^*(\Delta I) = \psi D^*(I), \quad (17)$$

где $\psi=1$ при поочередном измерении токов параллельных ветвей, и $\psi=0,05 \pm 0,1$ при относительном методе измерений, когда за базовый ток принимает либо суммарный ток группы либо ток одной из параллельных ветвей. Поэтому, если при поочередном измерении токов параллельных ветвей для определения тока небаланса с точностью 1% необходимо, чтобы и колебания нагрузки не превышали 1%, то при относительных методах эти отклонения могут составить (10-20)%.

Разработан прибор для измерения токораспределения в вентилях преобразователях, основанный на относительном методе и реализующий предложенные способы измерения вентилях токов и их отношений [13, 14]. Датчиками тока в приборе являются трансформаторы тока с разъемными магнитопроводами. Первичные преобразователи выполнены как пассивные четырехполюсники и позволяют выделить сигнал, пропорциональный среднему значению измеряемого вентилях тока и не зависящий от его формы.

В шестой главе рассматривается методика внедрения результатов выполненных исследований. Результаты внедрения рассмотрены в вводной части автореферата. Следует отметить, что при создании всех внедренных устройств применялись разработанные методы анализа и расчета.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В преобразователях большой мощности с номинальными токами вентилях 200+1000А наиболее перспективными по технико-экономическим показателям являются одновитковые делители тока с взаимоиндуктивными связями.
2. Разработаны методы оценки работы делителей при обрывах параллельных ветвей по анализу матриц и схем их магнитных связей.
3. Анализ работы делителей тока со взаимоиндуктивными связями

при обрыве параллельных ветвей показал перспективность применения предложенного делителя токов, выполненного по схеме двойная замкнутая цепочка.

4. Проведенный в общем виде для различных схем делителей токов анализ электромагнитных процессов в группе вентилях, учитывающий индуктивности и активные сопротивления сборных шин и возможные обрывы параллельных ветвей, позволил выявить соотношения между величинами их токов небаланса и конструктивными параметрами группы.

5. Дополнительная составляющая, появляющаяся в токе небаланса из-за магнитных полей сборных шин, неоднозначно зависит от постоянной времени ИДТ. Тем не менее, для преобразователей с ИДТ, выполненными по симметричным схемам или схеме двойной замкнутой цепочки, увеличение постоянной времени ИДТ в области практически приемлемых значений приводит к снижению этой составляющей.

6. На основе статистико-вероятностного подхода к нагрузкам вентилях при групповом соединении показано, что из-за отрицательной корреляционной связи между токами небаланса параллельных ветвей и пороговыми напряжениями и динамическими сопротивлениями вентилях появляется минимум в зависимостях их максимальных ТПС от постоянной времени ИДТ. Причем, в преобразователях с компенсированными магнитными полями сборных шин, работающими с оптимальной постоянной времени делителя, эти ТПС практически не зависят ни от схемы делителя, ни от диапазона прямых падений напряжений вентилях, из которых комплектуется преобразователь, ни от числа параллельно и последовательно включенных вентилях в группе. В преобразователях с некомпенсированными магнитными полями сборных шин минимум в зависимостях максимальных ТПС вентилях от постоянной времени ИДТ слабо выражен и обычно находится при практически неприемлемых постоянных времени ИДТ. В этом случае индуктивности обмоток делителей выбирают непосредственно по допустимому значению ТПС вентилях.

7. Разработаны методы решения практических задач, возникающих при проектировании вентиляхных секций с ИДТ, учитывающие статистику параметров вентилях, возможные обрывы параллельных ветвей и индуктивности сборных шин.

8. Выполненный анализ методов измерения вентиляхных токов и их распределения по параллельным ветвям показал преимущества относительного метода измерения токораспределения и предложенного метода

измерения вентильных токов. Их применение позволило создать прибор для измерения токораспределения в вентильных преобразователях, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым предприятиями, как выпускающими так и эксплуатирующими вентильные преобразователи.

9. Внедрение ИДТ, выполненных по схеме двойная замкнутая цепочка, на серийных преобразователях, выпускаемых заводом Уралэлектротяжмаш и на преобразователях, эксплуатируемых Магнитогорским металлургическим комбинатом, подтвердило их эффективность, а эксплуатацию на этих же предприятиях и на Троицкой ГРЭС приборов для измерения токораспределения показала целесообразность их применения.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Выбор параметров схемы параллельного соединения вентиляей. Сб. № 95 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧПИ, 1971.
2. Анализ надежности работы схемы деления токов между управляемыми полупроводниковыми вентилями при обрыве одной из параллельных ветвей. Сб. № 110 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок", Челябинск, ЧПИ, 1972.
3. Выбор параметров магнитопроводов индуктивных делителей, обеспечивающих параллельную работу управляемых полупроводниковых вентиляей. Сб. № 110 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок", Челябинск, ЧПИ, 1972.
4. Анализ параллельной работы динамически управляемых ртутных вентиляей с индуктивными делителями тока. - "Изв. вузов. Электромеханика", 1963, № 9. (Соавтор Дритов Л.А.).
5. Повышение надежности управляемых ртутных вентиляей при параллельной работе, серия Передовой научно-технический опыт, № 23-64-1264/56, М., ГОСИНТИ, 1964. (Соавтор Дритов Л.А.).
6. Определение рассогласования в замкании параллельно включенных управляемых ртутных вентиляей. - "Изв. вузов. Электромеханика", 1966, № 2. (Соавтор Дритов Л.А.).
7. О сравнении параметров индуктивных схем выравнивания токов вентильных преобразователей. Сб. № 124 "Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей", Челябинск, ЧПИ, 1973.

8. Анализ электромагнитных процессов в индуктивных схемах выравнивания токов. Сб. № 124 "Исследование автоматизированных приводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей". Челябинск, ЧПИ, 1973.

9. Электромагнитные процессы в индуктивных схемах выравнивания токов. Сб. № 141 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск, ЧПИ, 1974.

10. Исследование влияния магнитных полей сборных шин на токораспределение в вентиляльных преобразователях. Сб. № 160 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧПИ, 1975.

11. К вопросу оптимального проектирования группы параллельно выключенных вентилялей. Сб. № 160 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий", Челябинск, ЧПИ, 1975.

12. Допустимые нагрузки вентилялей при групповом соединении и методы их контроля. Сб. "Современные задачи преобразовательной техники", вып. № 6. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции, Киев, 1975. (Соавтор Сенигов П.Н.).

13. Способ измерения вентиляльных токов. Авт. свид. № 444990, Бюллетень изобретений 1974, № 36. (Соавтор Гельман М.В.).

14. Множительно-делительное устройство. Авт. свид. № 432527, Бюллетень изобретений, 1974, № 22. (Соавторы Портнов Е.В., Сенигов П.Н.).

15. Погрешность токоизмерительных клещей при измерении вентиляльных токов. Сб. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Тезисы докладов научно-технического совещания, Челябинск, ЧПИ, 1972. (Соавтор Гельман М.В.).

16. Прибор для измерения токораспределения в вентиляльных преобразователях. Сб. № 141. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск, ЧПИ, 1974. (Соавторы Гельман М.В., Сенигов П.Н.).

17. Анализ методов измерения токораспределения в вентиляльных преобразователях. Сб. № 160 "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск, ЧПИ, 1975. (Соавторы Гельман М.В., Сенигов П.Н.).