



На правах рукописи

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

БОРИСОВА ИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

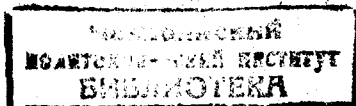
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК  
УПРАВЛЯЕМЫХ КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ И НЕСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЕ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Специальность 05.12.08 -

"Электронная техника и приборы"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1974



Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электро-  
техники" Челябинского политехнического института им. Ленинского  
комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент А.В.БАЕВ.

Официальные оппоненты: 1. Доктор технических наук,  
профессор Ф.Я.ИЗАКОВ (г.Челя-  
бинск).

2. Кандидат технических наук,  
доцент М.В.Гельман  
(г.Челябинск).

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский институт  
электродинамики АН УССР (г.Киев).

Автореферат разослан \_\_\_\_ мая 1974 г.

Защита диссертации состоится 12 июня 1974 г., в ауд.244,  
на заседании Совета по присуждению ученых степеней приборо-  
строительного и энергетического факультетов Челябинского поли-  
технического института имени Ленинского комсомола.

454044, Челябинск, пр.им.В.И.Ленина, 76, телефон 39-39-64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующих-  
ся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Сове-  
та 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 Ю.А.)

## Общая характеристика работы

**А к т у а л ь н о с т ь п р о б л е м ы .** В соответствии с решениями XXIV съезда КПСС за годы текущей пятилетки будут введены в действие электростанции суммарной мощностью 65-67 млн. кВт, а общая их мощность достигнет 230 млн кВт. Электроэнергии будет произведено в 1975 г. 1065 млрд. кВт.-часов против 740 млрд. кВт.-час. в 1970г. По технологическим и экономическим причинам уже сейчас около трети ее потребляется на постоянном токе, который получают путем выпрямления переменного тока. В современной электротехнике для выпрямления, инвертирования и преобразования частоты электрического тока, а также для регулирования и усиления мощности широко используются вентильные преобразователи. Они применяются в электрохимической и электрометаллургической промышленности, на электрифицированном транспорте, в электроприводе постоянного тока и в других различных электротехнических устройствах. Ускоренный рост производств цветных металлов (особенно алюминия) методом электролиза, широкое развитие электроосной химии, дальнейшее развитие электрифицированного транспорта, возрастающая роль электропривода постоянного тока обуславливают высокие темпы развития преобразовательных установок.

В области передачи электрической энергии постоянным током большую роль играют преобразовательные установки, осуществляющие по концам линии передачи выпрямление и инвертирование тока.

Имеются перспективы применения постоянного тока и в области производства электроэнергии. Поэтому еще большее значение приобретает задача преобразования постоянного тока в переменный. Удельный вес инверторов в энергетике в этой связи уже в ближайшее время должен существенно возрасти.

Таким образом, развитие преобразовательной техники сопровождается усложнением ее функций и расширением областей использования. Среди многих научно-технических задач, которые решаются при этом, важное место занимают вопросы совершенствования схем и конструкций преобразователей, повышения технико-экономических показателей преобразовательных установок, а также разра-

ботки путей наиболее рациональной эксплуатации преобразовательных агрегатов. Одной из важных народно-хозяйственных задач является задача повышения коэффициента мощности преобразовательных установок, тесно связанная с вопросами регулирования напряжения, тока и мощности.

Для улучшения коэффициента мощности вентильных преобразователей кроме применения обычного (универсального) способ параллельного включения конденсаторов или синхронных компенсаторов, все шире используются схемы вентильных преобразователей с конденсаторами, включенными в их силовые цепи.

По вопросу компенсированных вентильных преобразователей опубликовано значительное количество работ. Сюда, прежде всего, относятся работы Г.И.Бабата, А.В.Баева, Ф.Бузиана, Ю.Ф.Выдолоба, С.Р.Глинтерника, В.Г.Енина, И.Л.Каганова, О.А.Шаевского, Л.Р.Неймана, А.В.Орловского, В.А.Палванова, Ю.Г.Толстова, Н.А.Троицкого, А.М.Утевского, М.З.Хамуджанова, И.М.Чиженко, Н.А.Шилулиной и др. Широкие исследования компенсированных вентильных преобразователей проводятся в Киевском политехническом институте под руководством чл.-корр.АН УССР И.М.Чиженко. Эти работы в 1962 г. были удостоены Ленинской премии.

В Челябинском политехническом институте многие годы ведутся работы по исследованию общих свойств и принципов построения различных схем компенсации реактивной мощности преобразователей, а также по внедрению этих схем.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных компенсированным преобразователям, ряд важных теоретических и практических задач еще недостаточно разработан. В первую очередь это относится к управляемым преобразователям.

**Ц е л ь р а б о т ы .** Реферлируемая работа посвящена исследованию управляемых компенсированных преобразователей и ставит своей целью решить следующие вопросы:

1) установить удобную для расчетов систему параметров многофазных трансформаторов и компенсирующих устройств и дать методику определения этих параметров;

2) провести анализ электромагнитных процессов в компенсированном управляемом преобразователе при несимметрии в сети переменного тока, вызванной однофазными и двухфазными короткими замыканиями;

3) получить и исследовать основные зависимости, характеризующие компенсированный преобразователь при симметричной и несимметричной системе переменного тока;

4) установить зоны работы управляемого компенсированного преобразователя;

5) оценить эффективность использования конденсаторов в схемах управляемых компенсированных преобразователей;

6) провести экспериментальные исследования управляемого компенсированного преобразователя.

#### Методика выполнения исследований

При исследовании компенсированных преобразователей при несимметрии системы переменного тока эффективно используется метод симметричных составляющих. Этот метод позволяет установить общие свойства и параметры многофазного преобразователя, включая его трансформатор и компенсирующее устройство, полностью охарактеризовать несимметрию параметрами симметричного режима преобразователя и степень несимметрии  $\lambda$ , определяемой отношением э.д.с. обратной к прямой последовательности, а также получить в общем виде для всех схем компенсированных преобразователей каноническое уравнение коммутации.

для решения дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в компенсированных преобразователях (для определения постоянных интегрирования) используется метод приспособывания, заключающийся в приспособывании решений неоднородных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на границах интервалов постоянной структуры.

**Н а у ч н а я н о в и з н а .** В работе установлена новая удобная для практического определения и использования в расчетах система параметров многофазных трансформаторов. Предложены методы определения указанных параметров. Определены свойства и параметры компенсированного преобразователя в целом. Впервые в практике проведен анализ электромагнитных процессов в управляемых компенсированных преобразователях при установившихся несимметричных коротких замыканиях в системе переменного тока. Анализ электромагнитных процессов позволил определить основные харак-

теристики преобразователя и установить зоны его работы, как при симметричной системе переменного тока, так и при ее несимметрии. Исследовано влияние управления и коэффициента заполнения графика нагрузки на эффективность использования конденсаторов в схемах управляемых компенсированных преобразователей.

**Практическая ценность.** Широкому внедрению схем управляемых компенсированных преобразователей препятствует недостаточная изученность ряда важных теоретических и практических вопросов, а, следовательно, и отсутствие методики расчета таких преобразователей. Проведенные исследования, восполняющие данный пробел, доведены до ряда важных практических рекомендаций. Разработанная в результате проведенных исследований методика расчета позволила рассчитать и внедрить компенсированный инверторно-выпрямительный агрегат на одной из тяговых подстанций Южно-Уральской железной дороги.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались:

а) на четвертой всесоюзной междуузловской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем (г.Ташкент, 1971 г.);

б) на научно-технической конференции по повышению эффективности устройств преобразовательной техники (г.Киев, 1972 г.);

в) на восьмой традиционной научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства (г.Томск, 1973 г.);

г) на ежегодных научно-технических конференциях ЧПИ им. Ленинского комсомола в 1971+1973 годах;

д) на производственных совещаниях ИТР службы электрификации управления Южно-Уральской железной дороги.

**Публикация.** По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ.

**Объем работы.** Диссертация, включающая 150 страниц машинописного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 50 наименований и приложения (15 страниц).

## Содержание работы

В первой главе исследуются общие свойства и параметры компенсированных вентильных преобразователей.

Показано, что линейная часть  $m$ -фазного компенсированного вентильного преобразователя может быть охарактеризована  $\left[ \frac{m+1}{2} \right]$  независимыми параметрами (здесь  $\left[ \frac{m+1}{2} \right]$  наибольшее целое число не превышающее  $\frac{m+1}{2}$ ). Причем, эти параметры могут быть как фазными сопротивлениями преобразователя, так и его сопротивлениями током различного следования фаз.

Процессы в линейной части компенсированного преобразователя описываются следующей системой уравнений:

$$(u) = [Z](i), \quad (1)$$

где  $(i)$  - столбцовая матрица токов вентилях;

$(u)$  - столбцовая матрица падений напряжений на линейной части преобразователя;

$[Z]$  - квадратная матрица сопротивлений преобразователя, причем

$$Z = r + x_L \frac{d}{d\vartheta} + x_C \int d\vartheta$$

Матрицы преобразования  $[A]$  и  $[A]^{-1}$  позволяют получить соотношения между токами и напряжениями в системе координат симметричных составляющих. Матрица  $\frac{1}{\sqrt{m}}[A]$  унитарная, т.е.  $\sqrt{m}[A]^{-1} = \frac{1}{\sqrt{m}}[A]^* = \frac{1}{\sqrt{m}}[\tilde{A}]$  ( $[A]$  - симметричная). Ее элемент  $A_{\ell n} = a^{-n(i-1)}$  ( $n = 0 \div m-1, \ell = 1 \div m$ ),  $a = e^{j\frac{2\pi}{m}}$ .

Симметричные составляющие токов и напряжений связаны между собой соотношением

$$(u_q) = [Z'](i'_q), \quad (2)$$

где

$$[Z'] = \frac{1}{m} [\tilde{A}]^* [Z] [A]. \quad (3)$$

Поскольку линейная часть компенсированного преобразователя симметрична, то токи каждой последовательности вызывают напряжения той же последовательности и в системе параметров  $Z'$  отличными от нуля могут быть только параметры  $Z'_{\ell\ell} = Z_q$  ( $q = 0 \div m-1$ ). В этом случае элементы матрицы  $[Z]$  определяются через  $Z_q$  следующим образом:

$$Z_{en} = \frac{1}{m} \sum_{q=0}^{m-1} a^{q(n-l)} Z_q = Z_{1, n-l+1}, \quad (4)$$

а матрица  $[Z]$  будет выглядеть так:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{13} \\ Z_{13} & Z_{12} & Z_{11} & \dots & Z_{14} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & \dots & Z_{11} \end{bmatrix}$$

Матрица  $[Z]$  циклическая, так как описывает симметричную часть преобразователя и симметрическая, так как определяет линейную цепь.

Элементы матрицы  $[Z']$  при этом определяются следующим образом:

$$Z_q = \sum_{n=1}^m a^{-q(n-1)} Z_{1n}. \quad (5)$$

При анализе общих свойств многофазных трансформаторов используется терминология, принятая в теории многополюсников. В качестве практически удобной системы параметров многофазных преобразовательных трансформаторов предложено использовать смешанные параметры.

При синусоидальной системе напряжений на входе преобразователя трансформатор может быть представлен следующей системой уравнений в смешанных параметрах (сам трансформатор принят линейным):

$$\begin{aligned} (\dot{I}_1) &= [G_{11}](\dot{U}_1) + \|G_{12}\|(\dot{I}_2), \\ (\dot{U}_2) &= \|G_{21}\|(\dot{U}_1) + [G_{22}](\dot{I}_2) \end{aligned} \quad (6)$$

$$(\dot{I}_1) = \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{pmatrix}, (\dot{U}_1) = \begin{pmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{pmatrix}, (\dot{I}_2) = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{pmatrix}, (\dot{U}_2) = \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \end{pmatrix}.$$

столбцовые матрицы токов и напряжений соответственно на входе и выходе преобразователя.

Все коэффициенты уравнений (5) многофазного трансформатора могут быть определены через его собственные и взаимные индуктивности. Однако такой способ неудобен. Проще параметры определять непосредственно из опытов холостого хода и короткого замыкания. При этом уравнения многофазного трансформатора примут вид:



$$\begin{aligned} (\dot{I}_1) &= [Y_x](\dot{U}_1) + \|\tilde{k}\|(\dot{I}_2), \\ (\dot{U}_2) &= \|\tilde{k}\|'(\dot{U}_1) + [Z_k](\dot{I}_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь матрицы  $[Y_x]$  и  $\|\tilde{k}\|$  определяются опытом холостого хода, при котором разомкнута вторичная обмотка; матрица  $[Z_k]$  определяется опытом короткого замыкания, проводимого со стороны первичной обмотки.

В случае несимметричной системы напряжения на вводах трансформатора целесообразно определять его параметры на основе метода симметричных составляющих.

Через симметричные составляющие уравнения трансформатора запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} (\dot{I}_A) &= \{Y_x\}(\dot{U}_A) + \|\tilde{k}'\|(\dot{I}_a), \\ (\dot{U}_a) &= \frac{1}{m}\|\tilde{k}'\|'(\dot{U}_A) + \{Z'\}(\dot{I}_a). \end{aligned} \quad (8)$$

В этой системе  $(\dot{I}_A)$ ,  $(\dot{U}_A)$ ,  $(\dot{I}_a)$ ,  $(\dot{U}_a)$  — матрицы симметричных составляющих токов и напряжений соответственно на входе многофазного трансформатора и на его выходе. Поскольку трансформатор симметричный, матрицы  $\{Y_x\}$  и  $\{Z_k\}$  диагональные и система (7) распадается на  $\frac{m}{2}$  независимых уравнений для отдельных симметричных составляющих. Поэтому трансформатор будет полностью охарактеризован, если произвести опыты холостого хода и короткого замыкания для токов  $q=1, 2, \dots, \frac{m}{2}$ . Нулевое следование фаз при этом исключено, поскольку с первичной стороны преобразовательного трансформатора отсутствует нулевой провод, а с вторичной стороны трансформатора токи нулевого следования фаз замыкаться не могут ( $X_0 = \infty$ ). Реальные, фазные параметры трансформатора, при необходимости, могут быть получены из параметров для симметричных составляющих по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} [Y_x] &= [A]_3 \{Y_x'\} [A]_3^{-1}, [Z_k] = [A]_m \{Z_k'\} [A]_m^{-1}, \\ \|\tilde{k}\| &= [A]_3 \|\tilde{k}'\| [A]_m^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Метод симметричных составляющих позволил также получить формулы для приведения токов, напряжений и сопротивлений с первичной стороны многофазного трансформатора к его вторичной стороне и, в случае необходимости, с вторичной к первичной.

Анализ, проведенный в настоящей главе, дал возможность определить общие свойства матрицы  $[Z]$ , характеризующей линейную часть преобразователя и предложить пути для определения ее элементов, что позволило в дальнейшем провести анализ электромагнитных процессов и получить мгновенные значения токов вентилей и напряжений на элементах преобразователя.

Во второй главе выполнен анализ электромагнитных процессов в управляемом компенсированном вентильном преобразователе при несимметрии системы переменного тока. Теоретические исследования выполнены для случая бесконечно большой индуктивности сглаживающего реактора.

Принята обычная при анализе электромагнитных процессов в мощных преобразователях идеализация элементов цепей:

а) считается, что все элементы, за исключением вентилей, линейны и параметры их постоянны;

б) у вентилей не учитывается порог зажигания и обратный ток;

в) потери в сети переменного тока и в преобразователе считаются ничтожными;

г) не учитывается ток намагничения трансформатора.

Падение напряжения на вентилех учитывается как часть выпрямленного напряжения.

Несимметрично - однофазные и двухфазные - короткие замыкания учитывались индуктивной нагрузкой  $X_{\Sigma}$  (рис. I), присоединенной к шинам преобразователя.

Использовано также то, что токи во всех ветвях вентильного преобразователя выражаются линейно и однородно через токи в ветвях с вентилями.

Приведение несимметричной системы напряжений и сопротивлений сети переменного тока к схемной стороне преобразователя оказалось удобным осуществить при помощи метода симметричных составляющих. При этом были получены следующие выражения для фазной в.д.с. на вторичной стороне трансформатора и сопротивлении системы, приведенного к схемной стороне преобразователя:

$$e_c = E'_{km} K_c \sin(\delta + \alpha + \frac{\gamma_c}{2} + \psi'_c + \psi_c), \quad (10)$$

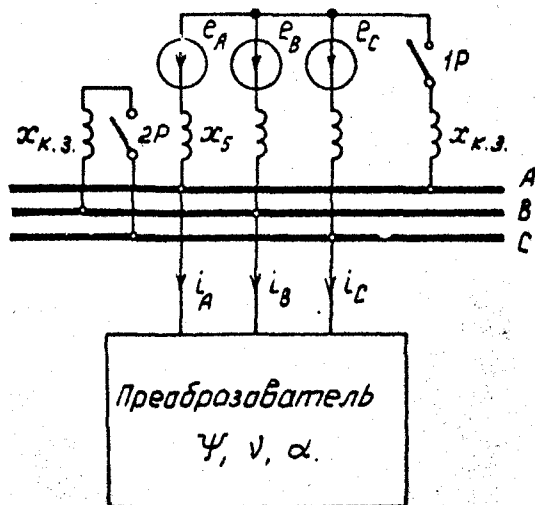


Рис. I. Эквивалентная схема системы переменного тока, питающей преобразователь, при несимметричных коротких замыканиях

где  $E'_{кт}$  и  $\psi'_e$  - амплитуда и начальная фаза э.д.с. на схемной стороне преобразователя при симметричной системе переменного тока;

$\alpha$  - угол регулирования симметричной системы управления;

$K_e = \frac{1}{1+\lambda} \sqrt{1+\lambda^2+2\lambda \cos 2\left[\frac{2\psi}{m}(l-1)+\alpha\right]}$  - коэффициент, учитывающий изменение амплитуды фазной э.д.с. преобразователя;

$\psi_e = \alpha z \operatorname{ctg} \frac{\lambda \sin 2\left[\frac{2\psi}{m}(l-1)+\alpha\right]}{1+\lambda \cos 2\left[\frac{2\psi}{m}(l-1)+\alpha\right]}$  - изменение начальной фазы э.д.с. на вторичной стороне трансформатора при коротких замыканиях в системе переменного тока.

В выражения для  $K_e$  и  $\psi_e$  входит параметр  $\lambda$ , учитывающий степень несимметрии системы переменного тока и равный отношению э.д.с. обратного и прямого следования фаз.

Сопротивление системы, приведенное ко вторичной стороне трансформатора:

$$Z_{in}'' = \frac{2x_s}{3k^2(1+\lambda)} \left\{ \cos\left[\frac{2\pi}{m}(n-l)\right] + \lambda \cos\left[\frac{2\pi}{m}(n+l-2)+2\alpha\right] \right\}. \quad (11)$$

При принятых допущениях  $m$ -фазный преобразователь описывается системой  $m$  дифференциальных нелинейных уравнений второго порядка с  $m$  неизвестными, в качестве которых могут быть взяты токи  $i_1, i_2, \dots, i_m$  в ветвях с вентилями:

$$\sum_{\ell=1}^m (x_{\ell j \ell} \frac{di_{\ell}}{d\vartheta} + x_{\ell j \ell}) i_{\ell} d\vartheta + u_{\ell j} = e_j - u_0, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (12)$$

где

$$\vartheta = \omega t,$$

$u_{\ell j}$  - напряжение на  $j$ -ом вентиле;

$e_j$  - несимметричная э.д.с., приведенная ко вторичной стороне трансформатора;

$u_0$  - напряжение, пропорциональное выпрямленному напряжению.

Система (12), записанная в матричной форме, примет вид:

$$[Z](i_j) + (u_{\ell j}) + (u_0) = (e_j), \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

Здесь  $Z = z + x_L \frac{d}{d\vartheta} + x_C \int d\vartheta$ .

В случае несимметрии сети переменного тока матрица  $[Z]$ , характеризующая как линейную часть преобразователя, так и несимметричную систему переменного тока, утрачивает свойство цикличности, но остается симметричной, поскольку, как и ранее, составлена для линейной части схемы преобразователя. Столбцовая матрица фазных э.д.с. вторичных обмоток трансформатора содержит наряду с э.д.с. прямого следования фаз, э.д.с. обратного следования фаз.

В отличие от симметричного режима, где интервал повторемости электромагнитных процессов равен  $\frac{1}{m}$  периода напряжения сети переменного тока, при несимметрии питающей сети он возрастает до

$\frac{3}{m}$  периода. В связи с этим при несимметричной системе переменного тока при анализе электромагнитных процессов необходимо рассматривать не два интервала постоянной структуры, как это было в симметричном режиме, а шесть: три коммутационных и три внекоммутационных. Показано, что дифференциальные уравнения для всех трех коммутационных и трех внекоммутационных интервалов различаются лишь соответствующими коэффициентами, которые учитывают влияние несимметрии питающей сети на амплитуды и фазы коммутирующих э.д.с., а также на сопротивления контуров коммутации.

Решение уравнения (13) сведено к решению двух видов линейных дифференциальных уравнений - первого порядка (для внекоммутационных интервалов) вида

$$u_{ki} = x_c \int_{-\frac{\gamma_i}{2}}^{\gamma} i_{ki} d\vartheta + u_{ki} \left( -\frac{\gamma_i}{2} \right) \quad (14)$$

и второго порядка (для коммутационных интервалов) вида

$$\frac{d^2 u_{ki}}{d\vartheta^2} + \nu_i^2 u_{ki} = \nu_i^2 e_{ki} \quad (15)$$

В уравнениях (14) и (15)  $u_{ki}$  - коммутирующее напряжение конденсаторов, приведенное к схемной стороне преобразователя;  $i_{ki}$  - ток коммутации, равный разности токов вступающего в работу и выходящего из работы вентиля;  $\nu_i$  - собственная частота контура коммутации, определяемая соотношением индуктивных и емкостных параметров контура коммутации;  $e_{ki}$  - коммутирующая э.д.с.  $i$ -го контура коммутации.

Постоянные интегрирования определяются из условия непрерывности токов в индуктивностях и напряжений на конденсаторах, а также из условия установившегося режима преобразователя, которое в случае несимметричной системы переменного тока принимает вид:

$$i_e(\vartheta) = i_{e,3} \left( \vartheta + 2\pi \frac{\ell-2}{m} \right). \quad (16)$$

Граничные условия, полученные для различных схем компенсированных преобразователей имеют единообразный вид и различаются лишь значениями схемного параметра  $\Psi$  :

$$\sum_{i=1}^3 \left[ u_{ki} \left( \frac{\gamma_i}{2} \right) + u_{ki} \left( -\frac{\gamma_i}{2} \right) \right] = 2\nu^2 x_k I_k \sum_{i=1}^3 \left( -\Psi + \frac{\gamma_i}{2} \right). \quad (17)$$

где параметр  $\Psi$  в общем случае равен  $\frac{2\pi}{m} \cdot \frac{x_{c11}}{x_c}$ .  
 Здесь  $x_{c11} = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^{m-1} x_{c,q}$  и  $x_c = \frac{2}{m} \sum_{q=1}^{m-1} x_{c,q} \sin^2 q \frac{\pi}{m}$ .

$x_{c,q}$  - сопротивление конденсаторов тока  $q$ -го следования фаз.

Решения уравнений коммутации (15) при граничных условиях (17) след: щие

$$u_{ki} = \frac{v_i^2}{v_i^2 - 1} K_i E_{km} \sin(\vartheta + \alpha + \frac{\gamma_i}{2} + \psi_i) + \frac{v_i}{1 - v_i^2} K_i E_{km} \cos(\alpha + \frac{\gamma_i}{2} + \psi_i) \cos \frac{\gamma_i}{2} \cdot \frac{\sin v_i \vartheta}{\cos v_i \frac{\gamma_i}{2}} + \frac{v_i}{1 - v_i^2} K_i E_{km} \sin(\alpha + \frac{\gamma_i}{2} + \psi_i) \sin \frac{\gamma_i}{2} \cdot \frac{\cos v_i \vartheta}{\sin v_i \frac{\gamma_i}{2}} - \frac{1}{v_i^2} x_k I_k \frac{\cos v_i \vartheta}{\sin v_i \frac{\gamma_i}{2}} \quad (18)$$

Здесь  $K_i$  и  $\psi_i$  являются функцией степени несимметрии системы  $\lambda$ .

Ток коммутации находится из соотношения  $i_{ki} = \frac{1}{x_c} \frac{du_{ki}}{d\vartheta}$ .

Зная ток коммутации и коммутирующее напряжение, можно найти мгновенные значения всех интересующих токов и напряжений.

Таким образом, во второй главе получены в общем виде дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в компенсированных преобразователях при несимметрии в сети переменного тока, и определены их решения с помощью граничных условий, полученных также в общем виде для шестипульсовых схем. Результаты данной главы используются в дальнейшем для нахождения и анализа основных зависимостей, характеризующих управляемый компенсированный преобразователь, и для определения зон его работы.

В третьей главе рассмотрены зоны работы и характеристики управляемых компенсированных преобразователей. Анализ электромагнитных процессов проведен во второй главе при условии несимметрии системы переменного тока. При этом же условии получены основные зависимости, характеризующие компенсированный преобразователь. Симметричный режим работы компенсированного преобразователя получен как частный случай его работы при несимметрии системы.

Уравнение внешней характеристики преобразователя в парамет-



рической форме для основного рабочего режима, когда  $\gamma \neq \frac{2\pi}{m}$  имеет вид:

$$I_{d_n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^3 v_i^2 K_i k_{I_i} \sin(\alpha + \frac{\gamma_i}{2} + \psi_i) \sin \frac{\gamma_i}{2},$$

$$U_{d_n} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 K_i k_{U_i} \cos(\alpha + \frac{\gamma_i}{2} + \psi_i) \cos \frac{\gamma_i}{2},$$

где

$$k_{I_i} = \frac{\frac{1}{v_i} \operatorname{ctg} v_i \frac{\gamma_i}{2} - \operatorname{ctg} \frac{\gamma_i}{2}}{\sum_{i=1}^3 [-\Psi + \frac{\gamma_i}{2} + \frac{1}{v_i} \operatorname{ctg} v_i \frac{\gamma_i}{2}]} \cdot \frac{1}{1 - v_i^2}, \quad (19)$$

$$k_{U_i} = 1 - (-\Psi + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \gamma_i - \gamma_{i-1}) k_{I_i},$$

$$k_{X_i} = \frac{v_i^2}{v_i^2 - 1} \left( \frac{1}{v_i} \operatorname{tg} v_i \frac{\gamma_i}{2} - \operatorname{tg} \frac{\gamma_i}{2} \right).$$

В частном случае симметричной системы переменного тока при  $\lambda = 0$ , имеем  $K_i = 1$ ,  $\psi_i = 0$ ,  $v_i = v$  и система (19) превращается в известное выражение внешней характеристики управляемого компенсированного преобразователя. Однако, хотя выражение внешней характеристики управляемого компенсированного преобразователя при симметрии и известно, подробного анализа этой зависимости, а также зависимости выпрямленного тока преобразователя от углов регулирования и коммутации в литературе для ряда схем не содержится. В работе проведен качественный анализ указанных зависимостей для трех наиболее распространенных схем компенсированных преобразователей с одинарной, двойной и тройной частотой токов коммутирующих конденсаторов. В качестве примера в данной реферате на рис.2 приведены зависимости  $I_{d_n} = f(\gamma)$  для схемы с тройной частотой напряжений на коммутирующих конденсатора при  $v = 4$ . Качественная картина семейства кривых  $I_{d_n} = f(\gamma)$  компенсированного и некомпенсированного преобразователя отлична. В случае компенсированного преобразователя при  $v > v_{кр} = 3\sqrt{\frac{6}{\pi(9\Psi - \pi)}}$  плоскость координат  $I_{d_n}$ ,  $\gamma$  разделяется двумя предельными линиями:

$$\gamma = \gamma_{кр} = \frac{3}{2} \Psi - \sqrt{\frac{9}{4} \Psi^2 - \frac{6}{v^2}} = \operatorname{const} \quad \text{и} \quad \alpha''_{кр} = \pi - \frac{\gamma_{кр}}{2} = \operatorname{const}.$$

И инвертор, работающий с углами инвертирования  $\beta > \pi - \alpha''_{кр} = \frac{\gamma_{кр}}{2} = \operatorname{const}$  приобретает ценное свойство повышенной устойчивости во всем диапазоне нагрузок.



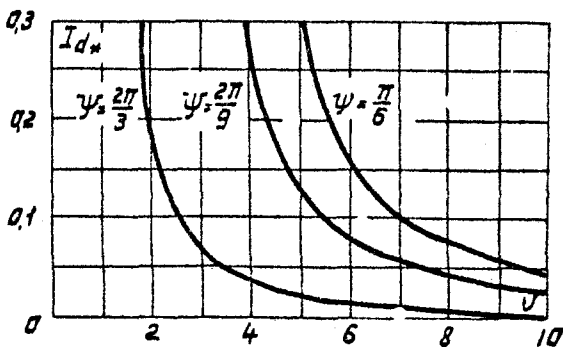


Рис.3. Границы работы компенсированного инвертора при регулировании его на постоянство угла запаса  $= 15^\circ$

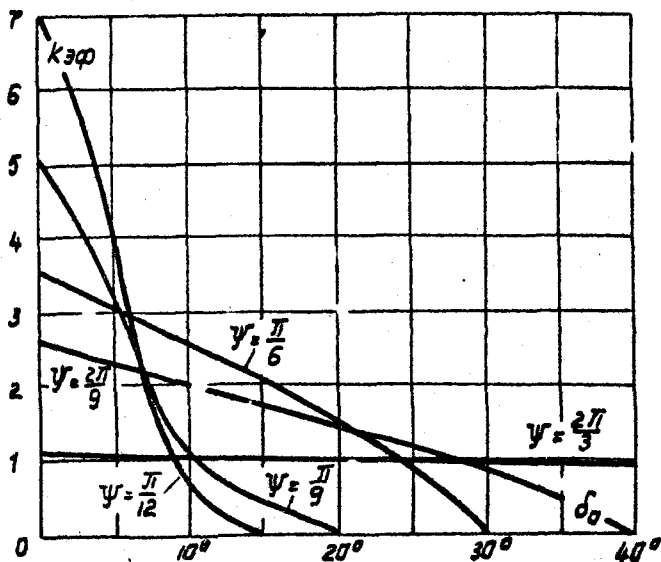


Рис.4. Зависимость эффективности использования конденсаторов от угла запаса инвертора

Показано, что внешние характеристики компенсированного преобразователя имеют более аста тический вид, чем у некомпенсированного, что выгодно отличает компенсированный преобразователь.

Анализ зависимостей угла запаса инвертора от углов регулирования и коммутации позволил определить границы устойчивой работы инвертора. Причем установлено, что даже при условии регулирования инвертора на постоянство угла запаса, он теряет устойчивость при некотором значении тока, соответствующем точке на внешней характеристике преобразователя, построенной при  $\delta_0 = const$ , при которой  $\frac{\alpha U_d}{\alpha I_d} = \infty$ . Граничные кривые для шестипульсовых схем представлены на рис.3.

Исследование энергетических характеристик управляемых компенсированных преобразователей, подсчитанных по точным формулам и сопоставление их с энергетическими характеристиками, построенным по приближенным формулам прямолинейной коммутации, позволило рекомендовать для подсчета энергетических характеристик следующие довольно простые выражения. Действующие значения токов могут быть подсчитаны по следующей формуле:

$$I = I|_{\gamma=0} \sqrt{1 - kF(\gamma, \alpha, \nu)}, \quad (20)$$

где  $k$  - числовой коэффициент, зависящий от вида схемы (для шестипульсовых схем  $k = 3$ );

$I|_{\gamma=0}$  - действующее значение тока, подсчитанное без учета угла коммутации (ток в этом случае ступенчатая функция времени);

$F(\gamma, \alpha, \nu) = F(\gamma) = \frac{\gamma}{8\pi}$  - универсальная функция перекрытия.

Полная мощность преобразователя  $S = \sqrt{3} U I_c$ ,

здесь  $U$  - линейное напряжение на входе преобразователя, которое при достаточно мощной системе может быть принято равным э.д.с.

Вычисление коэффициента мощности производится по общеизвестной формуле

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{U_d I_d}{S} \quad (21)$$

$$\text{и} \quad \cos \varphi = \begin{cases} \cos(\alpha + \frac{\gamma}{2}) & \text{при } \alpha + \frac{\gamma}{2} < 90^\circ, \\ -\cos(\alpha + \frac{\gamma}{2}) & \text{при } \alpha + \frac{\gamma}{2} > 90^\circ. \end{cases} \quad (22)$$

Коэффициент искажения подсчитывается по формуле:

$$k_u = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\gamma}{2\pi}}} \quad (23)$$

Необходимо отметить, что приведенные выше формулы прямолинейной коммутации дают высокую степень точности только в том случае, если основные величины (угол коммутации  $\gamma$ , угол регулирования выпрямителя  $\alpha$  или угол погасания инвертора  $\delta$ ) определены по точной методике.

Эффективность использования конденсаторов в схемах компенсированных преобразователей принято оценивать отношением мощности, генерируемой конденсаторной батареей в схеме компенсированного преобразователя к ее установленной мощности. Эффективность использования конденсаторов зависит от частоты напряжения на конденсаторах и от глубины регулирования и определяется следующим образом:

$$k_{эф} = N \frac{\Psi - \delta_0}{\cos \delta_0 \sum_n \frac{K_{n,q}^2}{n^3}} \quad (24)$$

где коэффициент  $N$  определяется частотой и напряжением на коммутирующих конденсаторах  $\nu_c$  и принимает значения  $\frac{\pi}{6}$  при  $\nu_c = 1$ ,  $\frac{4\pi}{3}$  при  $\nu_c = 2$  и  $\frac{3\pi}{4}$  при  $\nu_c = 3$ ;

$\Psi$  - схемный параметр;

$\delta_0$  - угол запаса инвертора (или угол задержки зажигания выпрямителя  $\alpha_2$ );

$K_{n,q}$  - поправочный коэффициент, учитывающий процесс коммутации;

$n = 1, \frac{m}{q} - 1, \frac{m}{q} + 1, \frac{2m}{q} - 1, \frac{2m}{q} + 1, \dots$

(здесь  $q$  - номер последовательности, на которую включены конденсаторы,  $m$  - число возможных последовательностей).

Из соотношения (24) видно, что при глубоком регулировании (большие значения  $\delta_0$ ) либо при малых значениях  $\Psi$  эффективность использования конденсаторов резко снижается и при  $\Psi = \delta_0$  становится равной нулю. Поскольку в реальных инверторах необходимо поддерживать угол запаса  $\delta_0$  большим или равным  $15^\circ$ , нецелесообразно для компенсации реактивной мощности в них включать кон-

денсаторы на частоты  $\nu_c > 3$ , поскольку эффективность использования конденсаторов, включенных на частоты  $\nu_c > 3$ , оказывается малой (при  $\nu_c = 4$ ,  $\psi = \frac{2\pi}{9}$  и  $K_{эф.} = 0,44$ ). На рис.4 приведены кривые зависимостей  $K_{эф.}$  от  $\delta_0$  для ряда схем.

Анализ влияния несимметрии сети переменного тока на работу управляемого компенсированного преобразователя показал следующее:

1) допустимые несимметричные режимы не вызывают особых изменений в характеристиках и режимах и могут не учитываться при исследовании компенсированных преобразователей;

2) при достаточно мощной системе переменного тока ( $\frac{I_f}{I_k} \leq 0,1$ ) собственные частоты контуров коммутации  $\nu_i$  при несимметрии сети переменного тока практически не отличаются друг от друга и равны параметру  $\nu$  симметричного компенсированного преобразователя;

3) внешние характеристики управляемого компенсированного преобразователя при несимметрии системы могут быть легко получены смещением вниз внешних характеристик преобразователя при симметрии системы параллельно самим себе на величину

$$\Delta U = E_{км} \left[ \cos \alpha - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 K_i \cos(\alpha + \psi_i) \right], \text{ где}$$

$K_i$  - коэффициент, учитывающий изменение амплитуды компенсирующей э.д.с. при несимметрии, а  $\psi_i$  - изменение фазы э.д.с.,

$\alpha$  - угол регулирования;

4) включенные в силовую цепь преобразователя конденсаторы в значительной мере повышают устойчивость преобразователя в инверторном режиме, что объясняется наличием в контуре коммутации конденсаторов, напряжение на которых благоприятно сказывается на процессе коммутации, увеличивая угол запаса инвертора. Компенсированный инвертор сохраняет устойчивость при степени несимметрии  $\lambda$ , изменяющемся в пределах от  $-0,4$  до  $0,6$ , в то время как некомпенсированный инвертор опрокидывается при несимметрии

$$-0,1 \leq \lambda \leq 0,15;$$

5) анализ напряжений на вентиллях компенсированного управляемого преобразователя при несимметрии системы переменного тока показал, что для подсчета максимально возможного напряжения на вентиллях можно пользоваться номограммами или формулами для напряжений на вентиллях симметричного преобразователя, подсчитанных

при значении выпрямленного тока, имеющем место при несимметрии;

б) поскольку при всевозможных коротких замыканиях на конденсаторах возникают нежелательные перенапряжения, необходимо предусмотреть устройства для защиты конденсаторов.

В четвертой главе дана методика расчета выпрямительно-инверторного агрегата, работающего как с неизменным углом регулирования, так и с неизменным углом запаса. Поскольку длительность работы в выпрямительном режиме у такого агрегата больше, чем в инверторном, а также в связи с тем, что нагрузки выпрямителя, как правило, больше, чем инвертора, рекомендуется выбор параметров компенсирующего устройства производить по неуправляемому выпрямительному режиму работы агрегата, методика расчета которого достаточно широко освещена в литературе. Затем следует проверить, будет ли инвертор при выбранных параметрах компенсирующего устройства устойчиво работать во всем диапазоне нагрузок. В работе приведены графики зависимости минимальных углов запаса инвертора от параметра  $\nu$  при  $\alpha = const$  и граничные кривые в координатах  $\Gamma_{\alpha} = f(\nu)$  при  $\delta_0 = 15^\circ = const$ . По этим кривым при заданном  $\nu$  определяется минимально возможный угол инвертирования (при условии работы преобразователя с неизменным углом регулирования) или проверяется, лежат ли максимальные нагрузки инвертирования в зоне устойчивой работы преобразователя (при условии  $\delta_0 = const$ ). Необходимо отметить, что при выбранных по выпрямительному режиму значениях параметра  $\nu$  инвертор работает устойчиво во всем диапазоне нагрузок при условии, что угол запаса его поддерживается постоянным и равным  $(1,5 + 2)\theta$  ( $\theta$  - угол воостановления управляющих свойств вентилей).

Промышленные испытания и внедрение компенсированного инверторно-выпрямительного агрегата, осуществленные на одной из тяговых подстанций Южно-Уральской железной дороги, подтвердили основные теоретические положения и показали правильность расчетной методики.

Выключение компенсирующего устройства в схему выпрямительно-инверторного агрегата позволило отказаться от увеличения коэффициента трансформации при работе агрегата в инверторном режиме, а, следовательно, и от весьма ненадежного или дорогого переключателя с одновременным улучшением технико-экономических показателей

преобразователя за счет повышения коэффициента мощности. Существующая на подстанции мостовая схема преобразователя позволила наиболее просто включить конденсаторы на однократную частоту ( $\sqrt{\epsilon} = 1$ ). При таком включении конденсаторов, однако, возникает опасность их пробоя при коротких замыканиях в контактной сети. Для защиты конденсаторов от перенапряжений параллельно конденсаторам были установлены насыщающиеся дроссели.

В процессе внедрения для получения практических рекомендаций, касающихся переходных процессов в рабочих и аварийных режимах, на промышленной установке были проведены следующие опыты:

1) включение компенсированного инверторно-выпрямительного агрегата в режим инвертирования без изменения коэффициента трансформации трансформатора;

2) короткое замыкание в контактной сети в наиболее тяжелом случае, когда агрегат работает в выпрямительном режиме и 3) двухфазное короткое замыкание в сети переменного тока агрегата, работающего в режиме инвертирования.

Во всех случаях снимались осциллограммы напряжений на вентиллях и конденсаторах, а также тока в сети и в насыщающихся реакторах.

Промышленные испытания подтвердили установленные теоретические положения:

1) работоспособность компенсированного инверторно-выпрямительного агрегата;

2) положительные качества компенсированного агрегата - возможность отказа от переключателя, повышенная устойчивость;

3) надежную работу быстро насыщающихся реакторов.

В а к л ю ч е н и и сформулированы следующие основные результаты диссертационной работы

1. Установлено, что общие свойства и параметры определяются линейной частью преобразователя. Число независимых параметров равно  $\left[ \frac{m+1}{2} \right]$ , где  $\left[ \frac{m+1}{2} \right]$  означает наибольшее целое число, не превосходящее  $\frac{m+1}{2}$ . Эти параметры могут быть как фазными сопротивлениями преобразователя, так и сопротивлениями токкам различных последовательностей.

2. Предложена практически удобная система параметров многофазного преобразовательного трансформатора, дана методика экспе-

риментального определения этих параметров. Предложенная система параметров позволяет правильно учесть индуктивность рассеяния трансформатора при различном гармоническом составе токов в обмотках преобразовательного трансформатора.

3. На основе метода симметричных составляющих оказалось возможным установить соотношения, позволяющие осуществить приведение токов, напряжений, а также сопротивлений со стороны первичной обмотки  $m$  - фазного трансформатора к его вторичной стороне.

4. Показано, что параметры однофазных и трехфазных компенсирующих устройств, подключенных к преобразователю при помощи фильтров трансформаторного типа, также могут быть приведены к схемной стороне преобразователя.

5. Анализ электромагнитных процессов в управляемых компенсированных преобразователях при несимметрии питающей сети показал, что все основные зависимости имеют общий характер (различаются только значением схемного параметра  $\Psi$ ) и могут применяться для расчета любых схем такого типа.

6. На основании аналитических зависимостей построены внешние и энергетические характеристики, которые могут быть использованы в инженерных расчетах.

7. Выявлены зоны устойчивой работы преобразователя в инверторном режиме, как при постоянстве угла инвертирования, так и при постоянстве угла запаса инвертора.

8. Показано, что конденсаторы, включенные в силовые цепи преобразователя, затягивают процесс опрокидывания инвертора при несимметричных коротких замыканиях в системе переменного тока, а при степени несимметрии  $-0,4 \leq \lambda \leq 0,6$  обеспечивают его устойчивую работу.

9. Указано на ценное свойство, приобретаемое компенсированными агрегатами при работе их с неизменным углом инвертирования, а именно:

а) противо - э.д.с. их на холостом ходу высока, в связи с чем отпадает необходимость в изменении коэффициента трансформации при переходе от выпрямительного к инверторному режиму;

б) с ростом нагрузки противо - э.д.с. инвертора возрастает незначительно;

в) коэффициент мощности высокий, хотя и носит индуктивный характер, и практически не зависит от тока.

10. Рассмотрены вопросы определения эффективности использования конденсаторов. Выяснено, что при равенстве числовых значений схемного параметра  $\Psi$  и угла запаса инвертора  $\delta_0$  эффективность использования конденсаторов снижается до нуля. Необходимость обеспечения угла запаса инвертора, равного  $15^\circ$ , делает нецелесообразным использование схем компенсированных преобразователей с  $\nu_c > 3$ . Коэффициент заполнения графика нагрузки также влияет на коэффициент эффективности, причем, чем меньше частота тока в конденсаторах, тем больший коэффициент загрузки обеспечивает тот же коэффициент эффективности.

11. Приведенные исследования и анализ компенсированных инверторно-выпрямительных агрегатов позволяют при наличии исходных данных рассчитать любую из предложенных схем, выработать параметры компенсирующего устройства и оценить эффективность использования конденсаторов в этой схеме.

12. Проведенные теоретические исследования, внедрение и пуско-наладочные испытания позволяют считать компенсированный инверторно-выпрямительный агрегат перспективным для внедрения на других подобных тяговых подстанциях.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Баев А.В., Борисова И.А. Общность основных соотношений для схем с одноступенчатой искусственной коммутацией в режимах инвертирования и выпрямления. Сб. Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, Челябинск, ЧПИ, 1969.

2. Борисова И.А., Баев А.В. Внешние характеристики и зоны возможной работы инвертора с одноступенчатой искусственной коммутацией. Сб. № 95 Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, Челябинск, ЧПИ, 1971.

3. Борисова И.А., Корнеев В.И. Энергетические характеристики компенсированных инверторов. Сб. № 95 Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, Челябинск, ЧПИ, 1971.

4. Борисова И.А., Моторин М.И., Корнеев В.И., Ченчик М.Ф. Применение метода симметричных составляющих к исследованию многофазных вентильных преобразователей. Сб. № 110 Автоматизация энергосистем и энергоустановок, Челябинск, ЧПИ, 1972.



5. Борисова И.А., Корнеев В.Я., Моторин М.И., Ченчик И.Ф. Анализ электромагнитных процессов в многофазных вентильных преобразователях с реактивными параметрами с применением метода симметричных составляющих. Сб. № 110 Автоматизация энергосистем и энергоустановок, Челябинск, ЧПИ, 1972.

6. Борисова И.А., Галагурия Б.Т., Корнеев В.Я., Моторин М.И., Ченчик И.Ф. Гармонический анализ токов и напряжений многофазных компенсированных преобразователей. Сб. № 122 Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, Челябинск, ЧПИ, 1973.

7. Борисова И.А., Корнеев В.Я., Ченчик И.Ф. Анализ условий работы вентилях мощных полупроводниковых компенсированных преобразователей в общем виде. Сб. № 122 Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, Челябинск, ЧПИ, 1973.

8. Борисова И.А., Корнеев В.Я. Характеристики компенсированных управляемых вентильных преобразователей при несимметрии системы переменного тока. Тезисы докладов IУ Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, Таш.ПИ, 1971.

9. Борисова И.А., Корнеев В.Я. Электромагнитные процессы в компенсированных вентильных преобразователях при несимметрии системы переменного тока. Материалы научно-технической конференции по повышению эффективности устройств преобразовательной техники. Изд-во "Наукова думка", Киев, 1972.

10. Долинин В.П., Борисова И.А. Работа преобразователя-компенсатора при несимметрии напряжений в питающей сети. Сб. № 95. Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий, Челябинск, ЧПИ, 1971.