

Министерство высшего и среднего специального образования
Белорусской ССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Л.С.Мирошниченко

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ВУЛЕВЫХ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ

Специальность 05.232 - "Электрооборудование"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск, 1971 г.

Работа выполнена на кафедре "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Ивановского энергетического института имени В.И.Ленина.

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

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Л.Б.Гейлер

Кандидат технических наук О.Н.Парфеневич

Ведущее предприятие - Ивановское отделение
ВНИИЭлектропривод

Автореферат разослан "10" августа 1971 г.

Защита диссертации состоится "18" мая 1971 года на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетической специальности Белорусского политехнического института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: г.Минск, 27, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, Ученому секретарю Совета по энергетическим специальностям.

Дата защиты будет объявлена дополнительно в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук

Л.Л.Червинский

Современный автоматизированный электропривод является одним из средств повышения производительности труда и совершенствования технологических процессов. В связи с этим исключительно большое значение приобретают вопросы, связанные с развитием автоматизированных регулируемых электроприводов переменного тока на базе конструктивно простых, надежных, дешевых асинхронных короткозамкнутых электродвигателей (АД).

Из известных в настоящее время способов регулирования скорости АД наиболее перспективным является частотное регулирование, когда одновременно изменяют частоту и амплитуду подводимого к электродвигателю переменного напряжения. Частотное регулирование обеспечивает экономичное и плавное изменение скорости двигателя в широком диапазоне. Асинхронный электродвигатель, управляемый изменением частоты и амплитуды питающего напряжения, обладает регулировочными возможностями двигателя постоянного тока.

Усовершенствование и развитие электропривода с частотным управлением имеет огромное народно-хозяйственное значение. Актуальность проблемы частотного регулирования несомненна. Однако, решение этой проблемы осуществляется очень медленно. Это объясняется трудностью создания простого, надежного и экономически выгодного источника переменного тока с независимо управляемыми частотой и амплитудой выходного напряжения. Поэтому частотнорегулируемый электропривод до сих пор еще не нашел широкого промышленного применения ввиду недостаточной изученности режимов работы статических преобразователей частоты (ПЧ) и невысокой их надежности, обусловленной сложностью принципиальных схем.

С разработкой силовых управляемых полупроводниковых приборов появилась возможность технической реализации статических преобразователей частоты для систем частотнорегулируемых электроприводов. Области применения последних, очевидно, будут определяться как характеристиками полупроводниковых приборов, так и совершенством схемных решений силовой части и цепей управления ПЧ, а также оптимальными режимами работы силовой части ПЧ.

В связи с этим работы по усовершенствованию существующих и созданию новых типов статических ПЧ, исследованию режимов работы и разработке методов анализа процессов в ПЧ являются целесообразными.

Одним из перспективных направлений в развитии статических ПЧ является разработка преобразователей с явно выраженным звеном постоянного тока. В состав такого ПЧ входят управляемый выпрямитель, осуществляющий выпрямление переменного тока питающей сети, и автономный инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный регулируемой частоты.

Автономный инвертор в составе ПЧ может быть выполнен как по мостовой, так и по нулевой схеме.

В то время как автономные инверторы, обладающие мостовой структурой достаточно глубоко изучены, практически отсутствуют исследования в области нулевых схем. Нулевые инверторы обладают рядом достоинств. Нулевая структура инвертора более надежна, чем мостовая, благодаря "избыточности" силовой части; в ней отсутствует режим сквозного короткого замыкания, характерный для мостовых структур; нулевые инверторы в ряде случаев позволяют упростить преобразователь в целом, возложив функции распределения импульсов управления на элементы силовой части.

Это позволяет рассматривать нулевые инверторы, как возможные источники питания АД.

Реферлируемая работа посвящена исследованию силовой части и схем управления нулевых автономных инверторов и состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений.

Глава I. [Д.1,2,3,4,5,6,7]

Исследования вопросов частотного регулирования и статических преобразователей частоты (ПЧ) для питания АД посвящены работы М.П.Костенио, И.М.Садовского, А.А.Булганова, М.З.Хамудханова, А.А.Эфенди-Заде, Д.А.Завалишина, И.Л.Каганова, Т.А.Глазенако, Г.И.Шевченко, В.Ф.Шуналова, П.А.Ровинского, А.С.Сандлера, О.И.Хасиева, Ж.И.Кантера, В.А.Лабунцова и многих других. В настоящее время известно большое количество схемных решений статических ПЧ, основанных на различных принципах преобразования. ПЧ для питания АД могут быть выполнены как с непосредственной связью, так и с промежуточным звеном постоянного тока.

Автономный инвертор в ПЧ со звеном постоянного тока преобразует постоянный ток в переменный. Преобразование постоянного тока в переменный возможно двумя группами статических устройств: 1) непрерывными и 2) дискретными устройствами.

Непрерывные преобразователи (L C - генераторы и др.)

обладают синусоидальной выходной кривой и низким КПД. По последней причине они не нашли применения в силовой преобразовательной технике.

Дискретные преобразователи постоянного тока в переменный представляют собой систему ключей, которые в определенной последовательности подключают фазы нагрузки к зажимам звена постоянного тока либо непосредственно, либо через формирующий трансформатор. Дискретные преобразователи можно разделить на:

1) преобразователи с гальванической связью источника постоянного тока и нагрузки (мостовые инверторы),

2) полупроводниково-магнитные преобразователи, где связь нагрузки и источника постоянного тока осуществляется через формирующий трансформатор (нулевые инверторы).

Различия внутри указанных групп дискретных преобразователей возникают в результате применения в качестве ключей тех или иных полупроводниковых приборов (полностью управляемых или с неполным управлением), а также в зависимости от характера нагрузки, индуктивности и емкости фильтра в цепи постоянного тока, способа компенсации реактивной энергии нагрузки.

Общим недостатком дискретных преобразователей является принципиальная невозможность получения синусоидальной кривой выходного напряжения: форма напряжения на выходе инвертора ступенчатая. При питании АД таким напряжением ухудшаются его рабочие характеристики. К достоинствам дискретных преобразователей относятся незначительные потери мощности.

Попытки улучшить кривую выходного напряжения ПЧ привели к разработке ряда способов управления силовыми ключами, а также схемных решений, позволяющих приблизить кривую выходного напряжения к синусоидальной. Однако, улучшение выходной кривой обычно ведет к усложнению силовой части и схемы управления преобразователя, и, следовательно, к снижению надежности частотно-регулируемого электропривода. Таким образом, при разработке частотно-регулируемого электропривода возникает две противоречивые задачи:

- 1) задача обеспечения высокой надежности инвертора;
- 2) задача обеспечения хорошей формы выходного напряжения.

Поэтому при решении конкретных задач проектирования преобразователя необходимо иметь в виду лишь технико-экономически

целесообразную кривую выходного напряжения, когда характеристики электродвигателя ухудшаются приемлемо для заданных условий, и при этом инвертор достаточно надежен и прост.

Наиболее простым из трехфазных является элементарный нулевой инвертор, где первичные фазные обмотки формирующего трансформатора одним концом постоянно присоединены к одному из полюсов звена постоянного тока, а свободные концы фазных обмоток с помощью полупроводниковых ключей в заданной последовательности подключаются к другому полюсу звена постоянного тока. Если в качестве ключей применены тиристоры с межфазной конденсаторной коммутацией, то первичные фазные обмотки питаются трехфазной системой однополярных импульсов шириной 120 электрических градусов, а выходная кривая искажена четными гармониками и не приемлема для питания АД.

Для улучшения выходной кривой элементарного нулевого инвертора может служить предложенный автором способ расширения длительности импульсов, питающих фазы трансформатора, до 180 эл. град. [Л.1]. В этом случае реализация силовой части нулевого инвертора на тиристорах с межфазной конденсаторной коммутацией возможна для схем с катодной связью коммутирующих конденсаторов (двухступенчатая коммутация) с помощью встречно-параллельных цепочек из тиристора и диода, обеспечивающих задержку разряда коммутирующего конденсатора [Л.2]. В схемах с анодной связью коммутирующих конденсаторов работу тиристоров в течение 180 эл.град реализовать невозможно из-за наличия ложных контуров коммутации; для задержки разряда коммутирующего конденсатора здесь должен быть установлен симметричный тиристор или эквивалентная ему цепь.

Устройство возврата реактивной энергии источнику постоянного тока может быть реализовано с помощью вспомогательного трансформатора [Л.3]. Параллельно фазным первичным обмоткам выходного трансформатора присоединены с помощью последовательно включенных диодов первичные фазные обмотки вспомогательного трансформатора. Ток вторичной стороны вспомогательного трансформатора выпрямляется и возвращается звену постоянного тока. Для нулевых инверторов это устройство является аналогом диодов реактивного тока в мостовом инверторе, отличие его в гибкой связи, осуществляемой с помощью вспомогательного трехфазного

трансформатора.

Для формирования двуполярной кривой выходного напряжения могут быть использованы многообмоточные трансформаторы. Приведен ряд принципиальных схем силовой части на тиристорах с многообмоточным формирующим трансформатором. Достоинством этих схем является возможность выполнения инвертора без промежуточного распределителя импульсов — функции распределения импульсов выполняет силовая часть инвертора.

Улучшить форму выходной кривой элементарного нулевого инвертора тока, можно воспользовавшись принципом "геометрического суммирования" выходных кривых двух элементарных инверторов, параллельно работающих на общую нагрузку. Чтобы в выходном напряжении отсутствовали четные гармоники, а также гармоники нулевой последовательности, разность номеров групп выходных трансформаторов должна быть равна шести, включение одноименных первичных фазных обмоток производят со сдвигом 180 эл.град., а каждая фазная обмотка подключается к источнику постоянного тока в течение 120 эл.град.

Рассмотренные принципиальные схемы силовой части нулевых инверторов позволяют сделать вывод о том, что в трехфазных нулевых инверторах в качестве формирователя двуполярной кривой выходного напряжения могут быть использованы как один трехфазный трехстержневой трансформатор, когда улучшение формы выходной кривой достигается определенным режимом коммутации ключей и схемой соединения сложных обмоток выходного трансформатора, так и два (или более) выходных трансформатора, где используется принцип "геометрического суммирования", причем трансформаторы могут иметь как одну трехфазную первичную обмотку, так и сложную, обеспечивающую магнитное равновесие трансформатора и хорошую форму выходной кривой.

Наиболее целесообразными схемами управления тиристорными автономными нулевыми инверторами являются схемы, построенные на основе кольцевых счетчиков (регистров сдвига) и обеспечивающие высокую стабильность симметрии выходного напряжения.

Кольцевая пересчетная схема, выполненная на тиристорах, позволяет с помощью одних и тех же элементов осуществить логические операции сдвига сигнала последовательно по ячейкам и обеспечить на выходах ячеек импульсы достаточной мощности и необхо-

днкой формы, что является известным преимуществом по сравнению с транзисторными счетчиками, требующими, как правило, на выходах усилителей-формирователей.

Для формирования выходного импульса ячейки тиристорного кольцевого регистра сдвига может быть использован разряд коммутирующего конденсатора [Л.4,5], а также формирователи на основе однородных и неоднородных цепных схем, анализ процессов в которых изложен в [Л.6,7].

Логические операции по выбору и вводу в работу очередной ячейки обычно обеспечиваются коммутирующими диодами. Отключение работавшей ячейки осуществляется автоматически коммутирующим конденсатором.

Приведено описание работы одного из возможных вариантов кольцевого счетчика на тиристорах с трансформаторными выходами, где формирование выходного импульса осуществляется разрядным током коммутирующего конденсатора [Л.4].

Глава 2. [Л.8,]

Во второй главе реферруемой работы разрабатывается линейная теория идеальных m -фазных нулевых инверторов тока и напряжения.

За обобщенную расчетную модель принят элементарный инвертор, имеющий в своем составе m ключей и m -стержневой идеальный формирующий трансформатор, вторичная обмотка которого соединена в m -лучевую звезду (рис.1). На каждом стержне трансформатора расположено m -различных обмоток, подключаемых любым ключем. В общем случае обмотки, подключаемые одним ключем, располагаются на всех стержнях трансформатора. Реактивная энергия нагрузки возвращается источнику питания устройством реактивного тока (УРТ). Коммутации ключей мгновенны.

Цепь нагрузки и магнитная цепь трансформатора на междокоммутиционном интервале описываются уравнениями, составленными на основании законов Кирхгофа. Работа ключей во времени описывается переключающими функциями, построенными на основе единичной функции Хевисайда. В результате совместного решения системы уравнений, определяющих процессы в нагрузке и инверторе на междокоммутиционном интервале, с учетом переключающих функций получены матричные равенства, описывающие выходные кривые нулевого автономного инвертора с конечным числом фаз (ступенчатые кривые фазных токов инвертора тока; кривые фазных напряжений инвертора

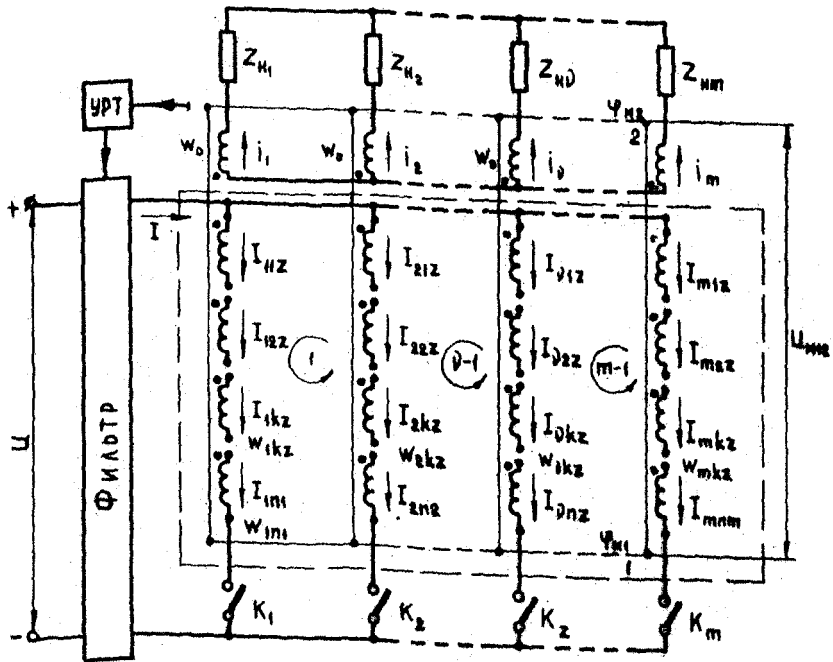


Рис. 1

напряжения).

Для инвертора тока и произвольного сочетания обмоток формирующего трансформатора выходные кривые определяются как

$$\dot{i}_y(\bar{t}) = \frac{I}{m \bar{t}_z} \| a_{\ell j} \|_1^m \| \pm C_{yz}^{-1} \|_1^m f_z(\bar{t}) \quad (I)$$

где $\dot{i}_y(\bar{t})$ - столбцевая матрица фазных токов на выходе инвертора, I - ток, потребляемый инвертором, m - число фаз, $\| a_{\ell j} \|_1^m$ - квадратная матрица порядка m коэффициентов

$$a_{\ell j} = \begin{cases} -1 & \text{при } \ell \neq j \\ m-1 & \text{при } \ell = j \end{cases}$$

C_{yz} - коэффициент трансформации обмотки расположенной на y -м стержне и подключаемой z -м ключом,
 $f_z(\bar{t})$ - столбцовая матрица переключающих функций с элементами

$$f_z(\bar{t}) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\gamma}(\bar{t} - (z-1)\bar{\lambda} - n) - \bar{\gamma}(\bar{t} - (z-1)\bar{\lambda} - \bar{\theta} - n), \quad (2)$$

где $\bar{\lambda}$ - сдвиг по фазе момента замыкания ключа, $\bar{\theta}$ - угол проводимости ключа, n - номер периода, $\bar{t} = \frac{t}{T}$ - относительное время, T - период коммутаций, $\bar{\gamma}(\bar{t})$ - единичная функция Хевисайда, $\bar{\gamma}(\bar{t}) = 1$ при $\bar{t} > 0$, $\bar{\gamma}(\bar{t}) = 0$ при $\bar{t} \leq 0$;

$$\bar{f}_z = \sum_1^m f_z(\bar{\gamma}) \quad (3)$$

- сумма переключающих функций.

Для анализа процессов в инверторе напряжения рассмотрены более частные задачи: первичная обмотка трансформатора соединена 1) в m -фазную звезду, 2) в m -фазный неравноплечий ангулар.

Выходные кривые инвертора напряжения описываются матричным соотношением

$$u_y(\bar{t}) = \frac{C_{yz} U}{1+k^2} \| e_{lj} \|_1^m \| A_{f,z} f_z(\bar{\gamma}) \|, \quad (4)$$

где $u_y(\bar{t})$ - столбцовая матрица фазных напряжений,
 U - напряжение звена постоянного тока,

$$e_{lj} = \begin{cases} a & \text{при } l=j, \\ -d & \text{при } j=l-1, \\ b & \text{при } l \neq j, j \neq l-1, \end{cases}$$

$\| A_{f,z} f_z(\bar{\gamma}) \|$ - столбцовая матрица, где коэффициенты изменения ЭДС $A_{f,z}$ учитывают взаимное влияние параллельных цепей подключенных и замыкам звена постоянного тока и определяются из соотношений

$$\| A_{f,z} f_z(\bar{\gamma}) \| = (1+k^2) \| e'_{lj} \|_1^m, \quad (5)$$

k - параметр схемы соединения, определяющий отношение числа витков полуобмоток неравноплечего зигзага первичной стороны (при $k=0$ - соединении λ_0/λ , при $k=1$ - z_0/λ);

$$e'_{2j} = \begin{cases} a_1 & \text{при } l=j, \\ d_1 & \text{при } j=l \pm 1, \\ b_1 & \text{при } l \neq j, j \neq l \pm 1 \end{cases}$$

$$a_1 = a + kd, \quad d_1 = b + ka = -d - kb, \quad b_1 = b - kb$$

$$a = 1 + \frac{k}{m-1}, \quad b = -\frac{1}{m-1} + \frac{k}{m-1}, \quad d = k + \frac{1}{m-1}.$$

Матричные равенства (1), (4), описывающие выходные кривые инверторов тока и напряжения, в смысле теории линейных импульсных систем Цыкина Я.З. являются соотношениями, определяющими коэффициент формы. При известной матрице передаточных функций многофазной нагрузки и известном законе изменения напряжения (тока) звена постоянного тока методами теории линейных импульсных систем получены в общем виде выражения, описывающие напряжения на нагрузке инвертора тока и тока нагрузки инвертора напряжения. Такой подход к анализу процессов в инверторе позволил получить аналитические выражения, в общем виде описывающие в смещенных решетчатых функциях нестационарные процессы в нагрузке многофазного инвертора.

Периодические процессы в инверторе получены предельным переходом в формулах для нестационарных режимов при $n \rightarrow \infty$, где n - номер периода. Как показал анализ, форма выходной кривой нулевого инвертора (как тока, так и напряжения) зависит от схемы соединения формирующего трансформатора и углов проводимости ключей. Из соотношений (1), (2), (3) следует, что при $\bar{\theta} < \bar{\lambda}$ работа нулевого инвертора тока может быть реализована лишь при наличии дополнительного устройства отводящего ток от инвертора в промежутки времени, когда $f_x = 0$. Режим $\bar{\theta} = \bar{\lambda}$ наиболее просто реализуем практически и может быть выполнен с помощью тиристоров с межфазной конденсаторной коммутацией. Режимы $\bar{\theta} \neq \bar{\lambda}$ требуют индивидуальной принудительной коммутации ключей. При $\bar{\theta} > \bar{\lambda}$ с увеличением $\bar{\theta}$ f_x

последовательно принимает значения от 1 до m , когда $f_z = m$ ток вторичной стороны $i_y(\bar{t}) \equiv 0$. Нулевой инвертор напряжения, в отличие от инвертора тона, работоспособен без дополнительного устройства при $\bar{\theta} < \bar{\lambda}$. При $\bar{\theta} > \bar{\lambda}$ на интервалах параллельной работы нескольких первичных обмоток формирующего трансформатора растет ток холостого хода, что приводит к снижению КПД преобразователя. При $f_z = m$ $u_y(\bar{t}) \equiv 0$, а звено постоянного тона замкнуто накоротко.

Глава 3. [Л. 9.]

В третьей главе исследуются трехфазные нулевые автономные инверторы. Расчетные зависимости для трехфазных нулевых инверторов получены как частные из общих соотношений, описывающих многофазные инверторы.

В качестве элементарного трехфазного нулевого инвертора принят инвертор, содержащий в своем составе три ключа и

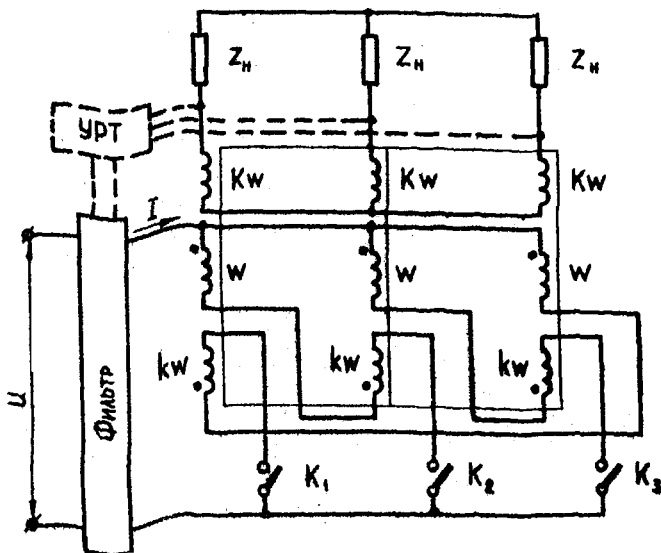


Рис. 2

трехфазный трехстержневой формирующий трансформатор. Вторичная обмотка трансформатора соединена в звезду, первичная - в неравноключий зигзаг (рис. 2).

Сравнительная оценка режимов работы ключей и схем соединения трансформатора получена на основе гармонического анализа выходных кривых трехфазного элементарного инвертора.

Установлены общие соотношения между разложениями в ряды Фурье выходных кривых нулевого инвертора. Как показал анализ, выходные кривые напряжения инвертора напряжения независимо от углов проводимости ключей θ могут быть представлены в виде тригонометрических рядов:

1. При $k=0$

$$u(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \cos n\omega t, \quad (6)$$

где
$$u_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t);$$

2. При $k=1$

$$u(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} u'_n \sin n\omega t, \quad (7)$$

где
$$u'_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t);$$

3. При $0 < k < 1$

$$u(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_{u1}(k) u_n \cos n\omega t + c_{u2}(k) u'_n \sin n\omega t, \quad (8)$$

где
$$c_{u1}(k) u_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t),$$

$$c_{u2}(k) u'_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t),$$

т.е. гармонический состав выходного напряжения для $0 \leq k \leq 1$ может быть получен в результате линейной комбинации рядов Фурье соответствующих крайним значениям k на интервале $(0,1)$.

Коэффициенты $C_{u1}(k)$ и $C_{u2}(k)$ определены из рекуррентных соотношений между соответствующими амплитудами гармоник для различных k при произвольных фиксированных $\bar{\theta}$.

Аналогичны общие свойства для выходных кривых инвертора тока.

Для различных углов проводимости ключей ($0 \leq \bar{\theta} \leq 2\pi$) для схем соединения формирующего трансформатора Z_0/λ ($k=0$) и Z_0/λ ($k=1$) рассчитан гармонический состав выходных кривых трехфазных автономных инверторов тока и напряжения, построены графики амплитуд гармонических составляющих в функции углов проводимости ключей.

Проведенные расчеты позволяют установить зону углов проводимости ключей, в которой гармонический состав выходной кривой нулевого инвертора является наилучшим. Эта зона лежит в пределах $\frac{2}{3}\pi \leq \bar{\theta} \leq \frac{4}{3}\pi$.

Для фиксированных значений углов проводимости ключей из зоны $\frac{2}{3}\pi \leq \bar{\theta} \leq \frac{4}{3}\pi$ рассчитан гармонический состав выходных кривых инвертора при меняющейся схеме соединений формирующего трансформатора ($0 \leq k \leq 1$), построены графики амплитуд гармонических составляющих в зависимости от параметра схемы соединения k для фиксированных значений $\bar{\theta}$.

Анализ полученных кривых показывает, что наилучшей из рассмотренных следует считать схему соединения, соответствующую параметру $k=1$ (соединение Z_0/λ), кроме того, достоинством такого соединения является то, что трансформатор магнитно уравновешен.

Рассмотрены общие энергетические соотношения для асинхронного электродвигателя, питающегося от нулевого инвертора. При расчетах использована методика Хасаева О.И.

Рассчитаны и построены кривые коэффициента мощности, КПД, потребляемого тока двигателя в зависимости от мощности на валу для углов проводимости ключей $\bar{\theta} = \frac{2}{3}\pi, \frac{5}{3}\pi, \pi, \frac{7}{3}\pi$ и схемы соединения формирующего трансформатора Z_0/λ . Для сравнения приведены аналогичные кривые, полученные Хасаевым О.И. для АД питающегося от мостового инвертора.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что

наилучшие энергетические соотношения АД характерны для случая, когда угол проводимости ключей нулевого инвертора соответствует $\frac{5}{6}\pi$. Несколько худшие энергетические соотношения для $\bar{\theta} = \pi$. Однако, если инвертор выполнен на тиристорах, то чтобы обеспечить режим работы ключей $\bar{\theta} = \pi$ требуется в два раза меньше элементов распределителя импульсов, т.е. схема инвертора в целом при $\bar{\theta} = \pi$ более надежна, чем при $\bar{\theta} = \frac{5}{6}\pi$.

Таким образом, работа элементарного нулевого автономного инвертора совместно с АД может быть рекомендована при схеме соединений формирующего трансформатора z_0 / λ , углах проводимости ключей $\bar{\theta} = \pi$, $\frac{5}{6}\pi$, нагрузках на валу двигателя близких к номинальной, для двигателей небольших мощностей порядка до 3 квт.

Глава 4. [Л. II, 10]

Если гармонический анализ выходных кривых нулевого инвертора позволяет оценить общие энергетические соотношения в нагрузке и выявить область применения того или иного режима работы ключей и целесообразную электрическую схему силовой части, то подход к инвертору, как к системе с периодически замыкающимися элементами позволил разработать методику расчета мгновенных значений напряжений и токов нагрузки, мгновенных значений напряжения на вентилях, времени предоставляемого схемой для восстановления управляющих свойств вентиля. В четвертой главе развивается метод "мгновенных значений", который разработан Кантером И.И. применительно к анализу квазистационарных режимов в трехфазном автономном нулевом инверторе тока. Привлечение аппарата теории линейных импульсных цепей Цыпкина Я.Э. для анализа процессов в нулевом инверторе позволило рассмотреть более общую задачу, а полученные результаты включают, как частный случай задачу решенную Кантером И.И. теоретически и проверенную экспериментально.

Благодаря дуальности нулевого инвертора тока при активно-емкостной нагрузке и нулевого инвертора напряжения при активно-индуктивной нагрузке возможен единый подход к решению задачи по нахождению закона изменения напряжений инвертора тока и токов инвертора напряжения.

На межкоммутационном интервале π -го периода трехфазная нагрузка инвертора тока и инвертора напряжения описывается дифференциальными уравнениями:

$$\frac{1}{\beta_i} \frac{dU_{im}}{d\bar{t}} + U_{im} = \tau_i I_{\phi im} , \quad (9)$$

$$\frac{1}{\alpha_i} \frac{di_{im}}{d\bar{t}} + i_{im} = \frac{U_{\phi im}}{\tau_i} . \quad (10)$$

Решение уравнений (9), (10) дает соответственно

$$U_{im}(\bar{t}) = \tau_i I_{\phi im} + C_{im} e^{-\beta_i \bar{t} m} , \quad (11)$$

$$i_{im}(\bar{t}) = \frac{U_{\phi im}}{\tau_i} + D_{im} e^{-\alpha_i \bar{t} m} , \quad (12)$$

где индексы $i = 1, 2, 3$ номер фазы, $m = 1, 2, 3, \dots$ номер межкоммутационного интервала. $I_{\phi im}$, $U_{\phi im}$ - значения тока и напряжения вторичной стороны, определяемое соотношениями (1) и (4);

$$\beta_i = \frac{T}{\tau_i C_i} ; \quad \alpha_i = \frac{\tau_i}{L_i} T ; \quad \tau_i , C_i , L_i$$

- сопротивление, индуктивность, емкость фазы нагрузки;

$$\tau_1 = \bar{t} - n , \quad \tau_2 = \bar{t} - n - \gamma_1 , \quad \tau_3 = \bar{t} - n - \gamma_1 - \gamma_2 \quad \text{и т.д.}$$

γ_m - относительный межкоммутационный интервал; C_{im} , D_{im} - зависящие от n константы интегрирования.

Последовательное решение соотношений (11), (12) в течение n -го периода дает конечно-разностное уравнение, которое определяет связь между дискретными значениями напряжений и токов в начале каждого периода и позволяет определить постоянные интегрирования. Подстановки решения полученного разностного уравнения в выражения (11), (12) дает в смещенных результирующих функциях закон изменения напряжений и токов фазы нагрузки. Предельным переходом при $n \rightarrow \infty$ получены зависимости описывающие квазистационарный режим.

Используя законы изменения напряжения и токов в нагрузке

инвертора, определяются законы изменения напряжения на вентилях. Выведены формулы определяющие время предоставляемое схемой для восстановления управляющих свойств вентиля.

Применительно к нулевым схемам рассмотрен метод "геометрического суммирования". Любой сколь угодно сложный трехфазный нулевой автономный инвертор может быть составлен из элементарных. Если допустить, что инвертор выполнен из линейных элементов, то задача исследования процессов в сложном инверторе может быть решена наложением процессов элементарных нулевых инверторов.

Для сложного нулевого инвертора, составленного из двух элементарных, получены аналитические выражения, описывающие процессы в нагрузке, выведено правило соединения формирующих трансформаторов инверторов составляющих сложный и правило последовательности коммутаций обмоток. Задача улучшения выходной кривой составного инвертора решается таким образом, что четные гармоники, входящие в состав выходных кривых элементарных инверторов взаимно компенсируются. В результате - форма выходной кривой составного инвертора и устойчивость его работы лучше, чем у каждого из элементарных инверторов.

Глава 5. [Л.4,5]

В пятой главе рассматривается, предложенный автором, вариант реализации тиристорных кольцевых счетчиков (регистров сдвига) с трансформаторными выходами, работающих на низкоомную нагрузку, которой, в частности, могут быть управляющие переходы силовых тиристоров инвертора.

Поскольку кольцевой регистр сдвига составлен из одинаковых ячеек анализируются процессы в цепях одной ячейки.

По функциям, которые выполняют электрические цепи кольцевого регистра сдвига, последние можно разделить на:

1. Цепи подготовки, осуществляющие подготовку к включению очередного тиристора ячейки при открытом предыдущем тиристоре и запрет включения остальных тиристоров.

2. Словные цепи, обеспечивающие формирование выходных импульсов и гашение предыдущего тиристора.

При подаче напряжения питания, чтобы избежать ложного срабатывания ячеек, ток в цепях подготовки не должен превышать ток на управление тиристором, вызывающего срывление характеристики при заданном анодном сопротивлении и напряжении питания.

Формирование выходного импульса ячейки обеспечивается разрядом предварительно заряженного коммутлирующего конденсатора.

Проведен анализ процессов в цепях ячейки кольцевого регистра сдвига. Получены аналитические зависимости, характеризующие процессы в цепях ячейки, и приближенные соотношения, позволяющие предварительно выбрать элементы ячейки.

Процессы подготовки к включению и подготовке запрета включения тиристоров ячеек протекают одновременно. Время подготовки запрета определяет верхнюю предельную частоту работы кольцевого регистра сдвига, поскольку подготовка к включению происходит быстрее, чем подготовка запрета.

Рассмотренный кольцевой регистр сдвига содержит сравнительно малое число элементов, так как в одном устройстве совмещены функции сдвига и формирования выходных импульсов. Энергия выходных импульсов не зависит от частоты тактовых импульсов и определяется емкостью коммутлирующих конденсаторов и напряжением питания. Устройство не чувствительно к коротким замыканиям на выходах.

Предложенный кольцевой регистр сдвига принят Ивановским филиалом ВНИИЭлектропривод для использования в схемах управления преобразователями частоты.

В приложении I приводятся некоторые результаты экспериментального исследования составного нулевого инвертора, работа которого протекает в инверторно-переключающем режиме. Благодаря введению устройства реактивного тона и двухступенчатой коммутации оказалась возможной работа инвертора тока с активно-индуктивной нагрузкой и асинхронным электродвигателем. Приведены осциллограммы напряжений и токов на элементах инвертора при работе с асинхронным двигателем АОД011-4 для частоты 50 гц и номинального момента на валу электродвигателя. Рассмотрен вопрос структурной надежности нулевого инвертора в сравнении с мостовым. Структурная надежность нулевого инвертора выше, чем у мостового.

Для модернизации электроприводов кольцепрядильных машин фирмы "Уайтин" и "Сако-Лоуэл" при участии автора для Ивановского отделения ВНИИЭлектропривод разработан составной нулевой инвертор. Мощность на валу асинхронного двигателя 7 квт.

В приложении 2 сообщаются краткие сведения о разработке серии частотнорегулируемых маломощных (0,05 - 1,5 квт) электро-

приводов для специальных станков, выполненной при участии автора в ИЭИ им.В.И.Ленина. Приведена принципиальная электрическая схема преобразовательной установки.

Основные результаты

1. Разработана общая линейная теория многофазных и частная теория трехфазных автономных нулевых инверторов.
2. Предложен новый способ управления тиристорами трехфазного нулевого инвертора, обеспечивающий улучшение кривой выходного напряжения.

Предложены и разработаны новые схемы силовой части нулевых инверторов на тиристорах и новая схема распределителя импульсов для силовых тиристорных инверторов.

4. Установлены общие соотношения между разложениями в ряды Фурье выходных кривых элементарного трехфазного автономного нулевого инвертора.

5. Гармонический анализ выходных кривых элементарного нулевого инвертора показал, что при совместной работе асинхронного электродвигателя и элементарного нулевого инвертора оптимальными углами проводимости ключей инвертора являются углы разные 150 и 180 эл.градусов, а оптимальной схемой соединения первичной обмотки является соединение в равноплечий зигзаг.

6. Нулевые автономные инверторы, построенные по принципу "геометрического суммирования" обладают улучшенной кривой выходного напряжения, высокой надежностью и повышенной устойчивостью работы.

По основным результатам работы сделаны доклады:

1. На Всесоюзной научно-технической конференции по производству и применению средств силовой преобразовательной техники в народном хозяйстве, Москва, 1968.

2. На республиканской научно-технической конференции по преобразовательной технике, Киев, 1969.

3. На Всесоюзной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу в текстильной и легкой промышленности, Иваново, 1970.

4. На итоговых научно-технических конференциях Ивановского энергетического института им.В.И.Ленина, Иваново, 1967, 1968, 1969, 1970.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах.

1. Мирошниченко Л.С., Королев А.Н. Способ управления автономным трехфазным инвертором. Авт.св. № 221808. Бюллетень изобретений № 22, 1968
 2. Мирошниченко Л.С. Трехфазный нулевой инвертор. Авт.св. № 213161. Бюллетень изобретений № 10, 1968
 3. Мирошниченко Л.С. Трехфазный нулевой инвертор. Авт. св. № 262255. Бюллетень изобретений № 6, 1970.
 4. Мирошниченко Л.С. Кольцевой регистр сдвига. Авт.св. № 221049. Бюллетень изобретений № 21, 1968.
 5. Мирошниченко Л.С., Тихонов А.И. Кольцевой регистр сдвига на тиристорах. Технический листок № 136/2529/. Изд.Верхне-Волжское ЦБТИ, 1968 г.
 6. Мирошниченко Л.С., Никитин В.П. Анализ однородных цепных схем. Известия АН Тадж.ССР, № 4/26/, 1967
 7. Никитин В.П., Мирошниченко Л.С. Об одном частном случае анализа неоднородных линий: Доклады АН Тадж.ССР ТМХ, № 8, 1967 .
 8. Мирошниченко Л.С. Линейная теория идеального нулевого ~~779~~ - фазного автономного инвертора. Часть I, Известия АН Тадж.ССР № 1 / 39 / 1971г.
 9. Мирошниченко Л.С. Нулевые автономные инверторы в электроприводах поточных линий текстильной промышленности. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу в текстильной и легкой промышленности, Иваново, 1970. Информэлектрo, Москва, 1970
 10. Мирошниченко Л.С. Линейный анализ нулевых автономных инверторов, материалы итоговой НТК ИЭИ им.В.И.Ленина, Иваново, 1970 .
- II. Мирошниченко Л.С. Линейный анализ нулевых автономных инверторов для питания асинхронных электродвигателей. В сб. " Устройства преобразовательной техники". Вып. 2. Изд. " Наукова думка ", Киев, 1969.