

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АЭРОДРОМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

НАБИЕВ Р.Н.

*Национальная академия авиации*

В последние десятилетия стали интенсивно развиваться различные виды преобразования электроэнергии, что способствовало развитию преобразовательной техники и созданию таких статических преобразователей, как ПОС-125, ПТС-500, а также разработанной нами БСПН-500 [1]. Однако создание мощных и сверхмощных преобразователей сопровождается огромными трудностями и требует всестороннего экспериментального исследования каждого узла всей системы. Физические принципы работы применяемых и разрабатываемых преобразователей определяются назначением этих устройств [2-6].

В настоящее время все интенсивнее электромеханические преобразователи вытесняются вторичными источниками электропитания, собранными на полупроводниковых приборах, состоящих из прерывателя постоянного тока и трансформатора. Сердечник трансформатора изготавливается из ферромагнитного материала с прямоугольной петлей гистерезиса. В качестве прерывателя тока могут применяться транзисторы или тиристоры [4]. Для потребителей мощности не менее 1 кВт обычно применяют инверторы, собранные на тиристорах. Также последние годы применяются мощные полевые транзисторы [7].

Применение преобразователей на основе твердотельной электроники позволяет существенно улучшить их характеристики. Например: повышается КПД от 0,5 для электромеханических преобразователей до, как минимум, 0,75 для статических, т.е. электронных; в связи с отсутствием вращающихся элементов на статических преобразователях повышается их надежность и ресурс, уменьшается масса, улучшаются эргономические показатели и нагрузочные характеристики.

Обычно преобразователи электроэнергии рассчитываются на конкретную нагрузку и поэтому технические характеристики ограничиваются требованиями данной нагрузки. Однако, для проведения поверочных и ремонтных работ авиационного оборудования на технических базах аэропортов необходимо иметь преобразователи, имеющие высокие эксплуатационно-технические характеристики в широком диапазоне нагрузки.

Целью данной работы является создание мощного трехфазного статического преобразователя частоты и исследования возможности оптимизации его работы с целью улучшения его эксплуатационных характеристик.

Для достижения данной цели, анализируя современный уровень развития преобразовательной техники, постарались найти приемлемое схемное решение для аэродромного трехфазного статического преобразователя частоты, удовлетворяющего нижеприведенным техническим характеристикам:

- Выходное напряжение, В.....115/200
- Число фаз.....3 с нулевым выводом
- Частота, Гц.....400±4
- Диапазон изменения нагрузки, %.....0÷100
- КПД.....≥0,75
- Коэффициент мощности.....≥0,7

- Выходное напряжение не должно отличаться более чем на 2% от номинального значения;
- Фазное напряжение (~115В) не зависит от разбаланса нагрузки между фазами;
- Допустимое искажение синусоидальности выходного напряжения не более 5%;
- Модуляция выходного напряжения не должна превышать 3,5В;
- Модуляция частоты в установившемся режиме работы не должна превышать 0,5% от среднего значения частоты за любой период, равный 1 минуте.

Как видно из приведенных технических характеристик, разработка такого преобразователя требует решения нескольких взаимоисключающих проблем. Например, необходимо обеспечить стабилизацию напряжения на каждой фазе при предельном разбалансе нагрузок, сохранение синусоидальности напряжения во всем диапазоне нагрузки в допустимом пределе и т.д.

Анализ литературы показывает, что наиболее подходящей схемой, частично обеспечивающей вышеприведенные требования, является схема инвертора Мак-Маррея [4]. Этот инвертор обладает рядом положительных свойств: хорошая перегрузочная способность, т.е. малый спад коммутационной способности с увеличением тока нагрузки; к запираемому тиристорному приложено обратное напряжение на всем интервале восстановления запирающих свойств; плавное нарастание тока через рабочие тиристоры при переходе тока с обратных диодов и при срыве инвертирования; низкое напряжение на тиристорах, т.е.  $U_{т.маx} = U_n$  и т.д.

Однако исследования показали, что выбранный как функциональный базовый узел - инвертор Мак-Маррея, наряду с указанными положительными свойствами, также имеет ряд недостатков, не отраженных в литературе. В том числе, система управления данного инвертора, входящая в состав преобразователя, описанная в литературе, имеет ряд недостатков, которые не позволяют создавать полную принципиальную рабочую схему преобразователя с учетом требуемых мощностей, предъявляемых допусков к основным параметрам: выходному напряжению, частоте, коэффициенту гармоник, коэффициенту модуляции, недопустимым аварийным режимам и т.д.

В отличие от схемы Мак-Маррея, предлагаемый нами инвертор не имеет обратных диодов (рис.1). В этом случае получается схема резонансного инвертора без нагрузки. Подключение нагрузки по схеме, указанной на рис.1, позволяет снять энергию с колебательного контура, не нарушая его режим работы, если выполняется условие  $W_K \geq 2W_H$ , где  $W_K$  и  $W_H$  – мощность колебательного контура и мощность, потребляемая нагрузкой. КПД такого инвертора определяется активным сопротивлением обмоток дросселя и монтажных проводов схемы, и соответственно, имеет высокое значение, достигающее до 95%.

Выбранный вариант инвертора, как инвертора напряжения отличается простотой и удобностью при наладке. Преимуществом данного инвертора также считается хорошая форма выходного напряжения, низкое напряжение на тиристорах  $U_{т.маx} = U_n$  и отсутствие влияния коэффициента мощности нагрузки на форму выходного напряжения. Однако, т.к. коммутация в схеме происходит с помощью L, C цепи, возникают дополнительные проблемы, в частности, появляются большие выбросы напряжения, связанные с резкими изменениями тока в контуре в момент коммутации.

Исключение из схемы инвертора обратных диодов, которые возвращают энергию, накопленную в дросселях, в источник питания и защищают рабочие тиристоры, позволило выбрать самый эффективный режим работы.

Такой вариант включения выбранного базового инвертора позволил повысить к.п.д. до 90-95%, а форму выходного импульса приблизить к гармонической, которая даже при максимальной нагрузке не превышает допустимой нормы синусоидальности. Однако, такое исполнение инвертора, в свою очередь, создало дополнительные проблемы, разрешение которых в какой то мере усложняют систему, так как для под-

держания выходного напряжения постоянным пришлось разрабатывать управляемый выпрямитель, регулирующий напряжение питания инвертора в интервале 80-250 В.

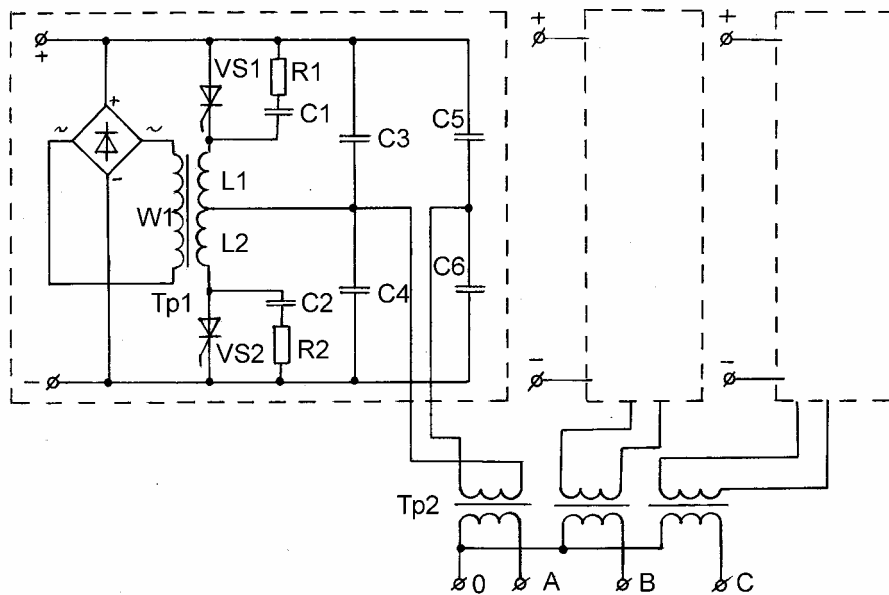


Рис. 1. Трехфазный резонансный инвертор

В мощных преобразователях частоты другим немаловажным функциональным узлом является система управления (СУ). СУ обеспечивает стабильность частоты преобразования, вырабатывание последовательных управляющих импульсов, которые через определенные интервалы времени отпирают тиристоры инвертора. Существующие варианты систем управления (СУ) рассмотренным инвертором, в частности, вариант СУ на базе генератора Ройера, отличаются наличием многих транзисторно-трансформаторных связей и малой помехоустойчивостью. Построение задающего генератора, фазосдвигающего устройства на транзисторно-трансформаторных элементных связях усложняет систему и затрудняет реализацию схемы. Однако существуют и варианты построения СУ на элементах цифровой техники. СУ многоступенчатыми инверторами очень сложны и имеют много межблочных связей. Современные СУ инверторами рассмотренного типа преимущественно включают в себя кварцевые генераторы и фазосдвигающие устройства, построенные на кольцевых счетчиках, которые, в свою очередь, могут быть построены на триггерах разного типа, счетчиках, регистрах и т.д. Наиболее эффективным при построении СУ оказалось применение генератора на логических элементах с времязадающими цепями в качестве задающего генератора, и кольцевого счетчика, построенного на Д - триггерах. Несмотря на то, что такие простые задающие генераторы, по сравнению с кварцевыми генераторами, не могут обеспечить высокую стабильность частоты, они дают возможность построить преобразователь частоты с любой частотой, без применения дополнительных делителей и расширителей импульсов, с достаточной стабильностью и точностью заданной частоты. Кольцевой счетчик на Д - триггерах обеспечивает наиболее устойчивую работу фазосдвигающего устройства.

Обеспечение хорошей гальванической развязки между СУ и силовыми блоками, особенно при больших мощностях, играет важную роль в целях обеспечения устойчивой работы СУ. С этой целью в СУ целесообразно включать оптронную гальваническую развязку, являющуюся самым надежным видом развязки. Оптронная развязка (ОР), включенная между фазосдвигающим устройством (ФСУ) и выходными транзисторными ключами (ТК), в коллекторные цепи которых включаются импульсные

трансформаторы, обеспечивающие подачу управляющих импульсов на тиристоры инвертора определенной мощности, обеспечивает двойную гальваническую развязку.

Преобразователи частоты, построенные на полупроводниковых приборах, наряду со многими достоинствами, имеют и некоторые недостатки. Поскольку, полупроводниковые коммутаторы, в отличие от механических коммутаторов, не могут длительное время выдерживать перегрузки тока и превышения напряжения. Наличие элементов, способствующих коммутации, т.е. дросселей и конденсаторов, определяет характер переходных процессов - время переходного процесса и значение мгновенного напряжения, возникающего во время переключения. Недооценка аварийных всевозможных случаев при проектировании преобразователей ограничивает эксплуатационные возможности и при нарушении рабочего режима приводит к повреждению отдельных узлов, или же самого преобразователя. Таким образом, при разработке схем необходимо предусматривать защиту полупроводниковых приборов и аппаратуры от перегрузок. С этой целью, при проектировании преобразователей создают надежную систему защиты (СЗ), являющуюся функциональным неотъемлемым узлом источников питания и, в частности, преобразователей. Построенная СЗ для трехфазного преобразователя позволяет предотвратить аварийные случаи, связанные с отклонениями напряжения, частоты выхода и перегрузками по току. Использование триггеров Шмитта ТТЛ- логики в качестве пороговых элементов, позволяющих с достаточной для этих аппаратов точностью контролировать пороги ограничения, позволило создать довольно простую и надежную СЗ. Учитывая, что в авиации применяют преимущественно необратимые СЗ, построенная СЗ, тоже имея триггерный выход с дополнительными входами запуска и сброса, является необратимой. Сигналы разрешения и аварии (логические «1» и «0»), вырабатываемые СЗ и поступающие на вход блока управления (БУ) управляемого выпрямителя (УВ), обеспечивают отпирание и запирающие тиристоры выпрямителя, тем самым обеспечивают подачу или прекращение подачи напряжения питания на инвертор. УВ, выполненный по схеме несимметричного трехфазного выпрямителя, обеспечивает плавную подачу на инвертор напряжения питания, необходимого для обеспечения на выходе преобразователя требуемого значения напряжения. Построение УВ по такой схеме позволяет упростить блок управления УВ и уменьшить количество управляемых вентилях, которые во время коммутации создают дополнительные помехи в сети и в питании инвертора.

Применяемые виды развязки и конструктивные меры, принимаемые в ходе разработки преобразователя, не смогли полностью обеспечить помехоустойчивость системы, т.к. при воздействии определенных видов помех, особенно воздействующих по цепи питания, время от времени может нарушаться устойчивая работа системы. Применение сетевого фильтра позволяет снизить помехи до допустимого уровня.

Высокое значение КПД обусловлено большим значением добротности колебательного контура-Q, собранного на L1,L2,C3,C4 (Рис.1), соответственно напряжение на обкладках конденсатора может достигать амплитудного значения (при резонансе), т.е. может меняться от  $2U_n$  до  $20 U_n$  ( $U_n$ - напряжение источника питания).

Это означает, что при постоянном значении напряжения питания инвертора  $U_n = \text{const}$  значение напряжения на выходе инвертора может превышать его номинальное значение  $\approx$  в 10 раз. Для ликвидации данной проблемы схему необходимо обеспечить обратной связью (БОСН), управляющей углом открывания тиристоров, управляемых выпрямителей (УВ) через схему управления тиристорами (СУ) (Рис.2). Таким образом, при  $U_n = \text{const}$ ,  $U_n$  меняется от  $U_n/2$  до  $U_n/20$  и десятикратное уменьшение напряжения питания в зависимости от мощности потребляемой нагрузки, что требует создания управляемого выпрямителя с очень широким диапазоном регулирования [8]. Создание и внедрение указанного блока питания инвертора позволяет сохранить высокое значение КПД даже при незначительных нагрузках. Это свойство в предложенной схеме существенно отличается от применяемых преобразователей частоты.

Также следует отметить, что если выполнить требования независимости номинального значения фазного напряжения от разбаланса нагрузки между фазами, то получается, что каждую фазу инвертора необходимо обеспечить самостоятельным источником питания, управляемым сигналом обратной связи соответствующей фазы. Итак, при обеспечении пофазной стабилизации напряжение на выходе трехфазного инвертора не будет зависеть от разбаланса нагрузки, а инвертор по каждой фазе будет вести себя как однофазный резонансный инвертор (ОРИ) напряжения.

Синхронизацию фаз обеспечивает схема управления тиристорами инверторов (СУТИ), по своей сути не отличающаяся от схемы управления трехфазным инвертором Мак-Маррея, применяемой в [2,4].

Как известно, при больших нагрузках на выходе управляемого выпрямителя для сглаживания выходного напряжения применяются пассивные LC фильтры. Поэтому, после индуктивности к схеме подключается электролитический конденсатор большой емкости. Соответственно при максимальной нагрузке напряжение на обкладках достигает максимального значения. При отключении нагрузки, за счет резонанса, напряжение на колебательном контуре может достигнуть значения, в 10-20 раз превышающего номинальное, и это приведет к выходу из строя используемых радиодеталей. Во избежание перенапряжения на дроссель намотана сбрасывающая обмотка  $W_1$ , позволяющая возвращать энергию колебательного контура обратно в источник через выпрямитель, ограничивая максимальное значение напряжения контура на нужном уровне.

Для обеспечения надежного функционирования преобразователя частоты предусмотрен функциональный блок защиты от перегрузок, коротких замыканий, повышения и понижения напряжения и ухода частоты (БФОЗПП), получающий сигналы от датчиков тока, напряжения и частоты (ДТНЧ)[9].

Для гашения выбросов напряжений в момент переключения тиристорov в замкнутое состояние используется гасящая цепочка из элементов  $R_1 C_1$  и  $R_2 C_2$ .

С учетом приведенного анализа и предъявляемых требований, разработанная новая структурная схема (Рис.2) аэродромного статического преобразователя частоты по своим техническим параметрам существенно превосходит своих предшественников.

Проводимые экспериментальные исследования в ходе разработки преобразователя ЦЧС-10 [10] позволили сделать вывод, что проектирование мощных преобразователей не может однозначно базироваться на схемах, теоретически описанных в литературе и в научных изданиях, по крайней мере, эти материалы не полностью отражают устройство и принцип работы рассмотренных схем, порядок полного расчета схемы преобразователя и зависимости параметров от режимов эксплуатации, т.к. при проектировании преобразователя установлено, что инвертор, используемый как базовый в традиционном варианте включения, наряду с некоторыми преимуществами, имеет ряд недостатков. Например, необходимо применить быстродействующие тиристоры, т.к. длительность обратных импульсов прикладываемых к тиристорам, уменьшается с увеличением мощности нагрузки и составляет  $\approx 100$  мкс, напряжение на выходе инвертора имеет ступенчатую форму, которое необходимо преобразовать в синусоидальную форму с помощью дополнительных контуров и т.д.

Анализируя результаты исследований, можно сделать заключение, что задача оптимизации режима работы мощного преобразователя должно осуществляться экспериментальным путем и при проектировании системы нужно предусматривать хорошую фильтрацию пульсаций и помех, вносимых по сети питания.

При создании СЗ преобразователя нужно учитывать все возможные аварийные случаи, которые могут нарушать режим работы или вывести систему из строя. В расчетах значение напряжения питания силовых блоков следует, по возможности, выбрать минимальной. При этом элементы силовых блоков необходимо выбрать с большим запасом допустимых предельных напряжений. Запирание каждого тиристора происходит

за счет э.д.с. в другой полуобмотке дросселя, возникающей в результате открывания встречного тиристора и протекания тока через другую полуобмотку дросселя.

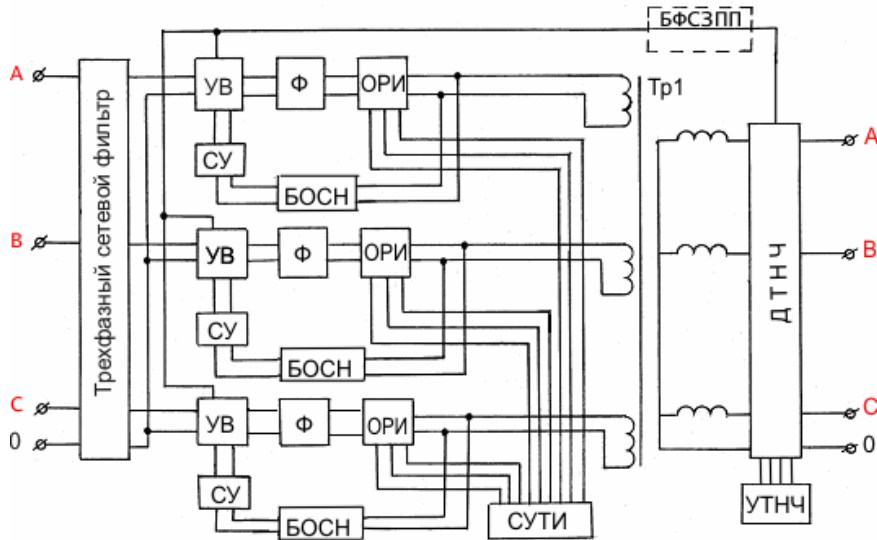


Рис.2. Функциональная схема аэродромного трехфазного статического преобразователя напряжения и частоты

УВ - управляемый выпрямитель; СУ – система управления тиристорами выпрямителя; Ф – фильтр; ОРИ – однофазный резонансный инвертор; БОСН – блок обратной связи по напряжению; БФСЗПП – блок формирования сигналов защиты от перегрузок и перенапряжений; СУТИ – система управления тиристорами инверторов; ДТНЧ – датчики токов, напряжений и частоты; УТНЧ – указатели токов, напряжений и частоты.

На обратное напряжение, прикладываемое к тиристорам, накладываются выбросы напряжения короткой длительности, создаваемые дросселем и определяемые выражением  $U_L = -L \frac{dI_L}{dt}$ . Таким образом, с увеличением нагрузки увеличиваются уровни выбросов, которые требуют подбора реальных элементов, т.е. тиристоров, конденсаторов, диодов и т.д. на большие допустимые напряжения и введение дополнительных цепей для гашения выбросов напряжения. Поэтому, при расчете инвертора, с учетом исходных требований, целесообразно выбирать напряжение питания  $U_n$  инвертора по возможности малым, параметры контура  $L, C$  такими, которые позволяют не превысить допустимые потери. Правильный выбор рабочего режима и реальных элементов инвертора играет особую роль для улучшения эксплуатационных показателей.

### Выводы

Применение резонансного инвертора с нагрузкой, не входящей в колебательный контур, позволяет снять энергию с контура, не нарушая его рабочий режим, т.е. сохраняя синусоидальность выходного напряжения.

Поскольку КПД резонансного инвертора с нагрузкой, не входящей в колебательный контур, определяется активными сопротивлениями обмоток дросселя и монтажных проводов схемы, то он имеет высокое значение и может достигать 95%. Создание и внедрение управляемого выпрямителя в качестве блока питания инвертора с широким диапазоном регулирования выходного напряжения позволяет сохранить высокое значение КПД при минимальных нагрузках.

Использование пофазной стабилизации обеспечивает независимость номинального значения выходного напряжения от разбаланса нагрузки во всем диапазоне нагрузки.

1. *Набиев Р.Н., Искендеров И.А.* Разработка бортового преобразователя напряжения. Elmi hesabat, əlyazma, ET,İKİ,MOİ DQM-nin arxivində, 37 səh., Inv.№ 0201AZ00977, DQ.№ 0196 AZ0169
2. *Пашаев А.М., Гаджиев Н.Д., Набиев Р.Н., Искендеров И.А.* «Современное состояние разработок в области преобразовательной техники и их применение». Бюллетень проблемных семинаров НАА Баку-1997, с.23-24.
3. *Руденко В.С., Сиенько В.И., Трифонюк В.В.* Приборы и устройства промышленной электроники. К.: Техника, 1990,368 с.
4. *Руденко В.С., Сенько В.И., Трифонюк В.В.*«Основы промышленной электроники». К.: Высшая школа. 1985, 400с.
5. *Макаров В., Жикленков Д.* Импульсные сетевые источники вторичного электропитания серии ИП1200А от ЗАО «МПП-ИРБИС». Электронные компоненты, 2002, 8, с.112-114.
6. *Гайно Е., Москатов Е.* Мощный импульсный источник питания. Радио, 2004, 9, стр.31-32.
7. *Косонов А.Н.* Частотные преобразователи. Отчет для управления асинхронными электродвигателями. Приборы системы управления.1998, №9, с.87-90.
8. *Гаджиев Н.Д., Набиев Р.Н., Мензелев М.Р.* Управляемый выпрямитель. Тезисы докл. Конференции НАА, вып.1, Баку-1998, с.26-27.
9. *Гаджиев Н.Д., Набиев Р.Н., Искендеров И.А.*Защитные устройства и проблемы создания оптимальных систем защиты и сигнализации. Тезисы докл. Конференции НАА, вып.1, Баку,1998, с.27-28.
10. *Наси́ев Н.С., Нəби́ев Р.Н.* Aviasiya NÖC-nin qidalanması üçün tətbiq edilən ÜÖC-10 tipli üçfazlı statik çeviricinin hazırlanması, Elmi hesabat, əlyazma, ET,İKİ,MOİ DQM-nin arxivində, 28 səh., Inv.№ 0201AZ00633, DQ.№ 0196 AZ039

## **ÜÇFAZALI GƏRGİNLİK VƏ TEZLIYIN AERODROM ÇEVİRİCİLƏRİNİN LAYİHƏLƏNDİRİLMƏSİ XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

**NƏBİYEV R.N.**

Məqalədə üçfazlı gərginlik və tezliyin aerodrom çeviricilərinin inkişafının müasir vəziyyəti təhlil olunur, çeviricilərin layihələndirilməsi xüsusiyyətlərinə baxılır və müəllifin təklif etdiyi və işlədiyi fazalara görə stabilləşməyə malik üçfazlı statik aerodrom tezlik çeviricisinin sxemi təsvir edilir. Göstərilmişdir ki, işlənmiş sxem gərginlik və tezliyin yüksək FİƏ ilə (95%-ə qədər) çevrilməsini təmin etməyə imkan verir və FİƏ-nın bu qiymətləri yüklənmənin kiçik qiymətlərində də invertorun qida gərginliyinin azaldılması hesabına təmin edilir.

## **DESIGNING FEATURES OF THREE-PHASE AIRFIELD CONVERTERS OF FREQUENCY AND VOLTAGE**

**NABIEV R.N.**

In the given article, the modern condition of development of three-phase airfield converters of voltage is analyzed and designing features of converters considered. The circuit of three-phase static airfield converter of voltage, offered by the author, on phase stabilization is described in the article. It is shown that, the developed circuit allows to provide conversions of voltage with high efficiency (up to 95 %) and high value of efficiency is remained even at small loadings due to voltage reduction of power supply of the inverter.