

УДК 629.064.5

Выбор рациональной структуры автономного инвертора для использования в энергоснабжении сельскохозяйственного производства

Липкович И.Э., Пятикопов С.М., Егорова И.В., Петренко Н.В.

Азово-Черноморский инженерный институт Донского ГАУ

Аннотация

В статье рассмотрен выбор рациональной структуры автономного инвертора (АИ) для использования в энергоснабжении сельскохозяйственного производства. Использование рассмотренной структуры дает более широкие перспективы для улучшения технико-экономических показателей АИ, что позволит расширить поиск новых направлений и методов преобразования электрической энергии, а также, позволит варьировать увеличением промежуточной частоты преобразования. И еще немаловажным аспектом является тот момент, что использование электрической энергии повышенной частоты повышает электробезопасность применения данных преобразователей.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР, ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, СИСТЕМЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ

Электрификация сельскохозяйственного производства имеет свои особенности. Одна из основных — это удаление потребителей, таких как фермы, стригальные пункты, зернотоки и т.д. Для таких потребителей иногда выгоднее использовать автономные источники электроэнергии (АИЭ), чем прокладывать линии электропередачи от централизованной системы [1-4].

Использование электростанций, преобразующих энергию солнца в электрическую энергию, является одним из перспективных направлений. Как известно, одним из основных узлов солнечной электростанции (СЭ) являются автономные инверторы (АИ), предназначенные для преобразования электрической энергии постоянного тока в энергию переменного тока.

На рис. 1 приведена структурная схема системы гарантированного электроснабжения (СГЭ) сельскохозяйственных потребителей [5, 6].

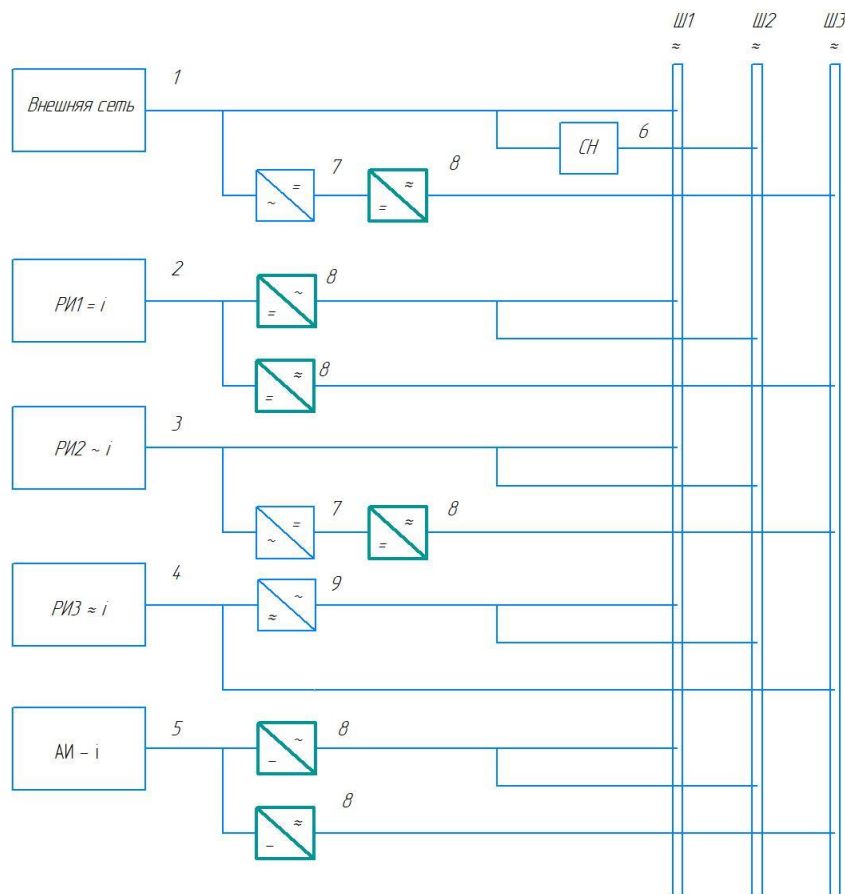


Рис. 1. Структурная схема СГЭ сельскохозяйственных потребителей

Примечание: РИ1–РИ3 – резервные источники электроэнергии; СН – стабилизатор напряжения; Ш1 – шина потребителей переменного тока не требовательных к качеству электроэнергии и к бесперебойности электроснабжения; Ш2 – шина потребителей переменного тока первой категории; Ш3 – шина переменного тока повышенной частоты; 1 – источник внешней сети; 2–4 – резервные источники электроэнергии; 5 – аварийный источник; 6 – стабилизатор напряжения; 7 – выпрямители; 8 – инверторы; 9 – непосредственный преобразователь частоты.

Для того, чтобы правильно выбрать АИ сформулируем требования к нему [2-4, 7].

Электрические требования, предъявляемые к АИ. В процессе работы систем управления (СУ) АИ должны обеспечивать стабилизацию параметров электроэнергии в заданных пределах при изменениях величины входного напряжения и изменениях величины и характера нагрузки, а также обеспечивать защиту при отклонениях указанных параметров за допустимые пределы.

К конструктивным требованиям, с одной стороны, относятся требования к необходимой стойкости при воздействии различных эксплуатационных факторов (температуры, влаги, вибрации, агрессивных сред и др.), а с другой, требования к обеспечению механического сочленения с несущими конструкциями устройства. Кроме того, к конструктивным относятся требования по созданию необходимых условий и разработке различных способов отвода тепла, которое образуется за счет внутренних потерь. Наряду с указанными требованиями конструкция АИ должна обеспечивать возможность контроля электрических параметров в процессе эксплуатации и технического обслуживания.

К эксплуатационным требованиям относятся требования к показателям надежности АИ и, прежде всего, по безотказности работы на протяжении всего срока эксплуатации, который для СЭ составляет более 10 лет.

Основным недостатком эксплуатируемых АИ является относительно большая масса согласующего трансформатора, составляющая более 50% его общей массы, относительно низкое качество выходного напряжения, что требует также применения массивных фильтров и что в свою очередь значительно снижает их КПД [5-8]. На рис. 2 приведены зависимости удельной массы АИ от мощности.

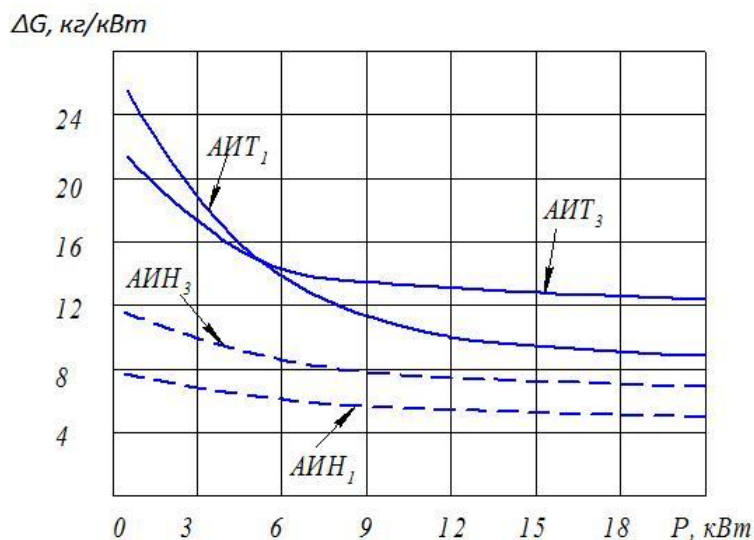


Рис. 2. Зависимости удельной массы однофазных и трехфазных АИТ ($АИТ_1$, $АИТ_3$) и АИН ($АИН_1$, $АИН_3$) от мощности $\Delta G=f(P)$ при входном напряжении 24 В и выходных параметрах: $U_{вых} = 220 В$, $f = 50 Гц$, $K_U = 0,05$

КПД однофазных АИТ (автономный инвертор тока) и АИН (автономный инвертор напряжения) мощностью 1–20 кВт, при частоте напряжения источника питания $f = 50 Гц$ и

значении коэффициента несинусоидальности на выходе фильтра $K_U = 0,05$ находится в пределах $0,75-0,80$, для трехфазных АИТ и АИН КПД составляет $0,70-0,78$ (с учетом КПД согласующих трансформаторов).

Таким образом, современные АИ должны иметь не только повышенные показатели эффективности, но и отвечать основным перечисленным выше требованиям [3, 6-9].

Автономный инвертор является важным функциональным узлом солнечной электростанции, поэтому при их разработке необходимо решать ряд задач, направленных на улучшение их критериев эффективности и показателей качества электроэнергии и КПД.

По характеру протекания в силовой схеме процессов широкое распространение получили два типа инверторов: АИ тока (АИТ) и АИ напряжения (АИН) [6, 7, 10].

В АИН источник постоянного тока подключается непосредственно к ключевым элементам. АИН работает в режиме генератора напряжения. При этом напряжение на нагрузке имеет прямоугольную форму, а форма кривой тока близка к синусоидальной и зависит от параметров нагрузки (рис. 3а). На входе силовой схемы АИН может быть подключен конденсатор большой емкости, который выполняет функции фильтра высших гармоник тока, так как по нему протекает разность между выходным и постоянным в пределах полупериодов входным током. АИН характеризуются относительной стабильностью выходного напряжения и имеют жесткую внешнюю характеристику (рис. 3в). Коммутационные процессы в них мало влияют на форму кривой выходного напряжения, а установленная мощность коммутирующих элементов сравнительно небольшая.

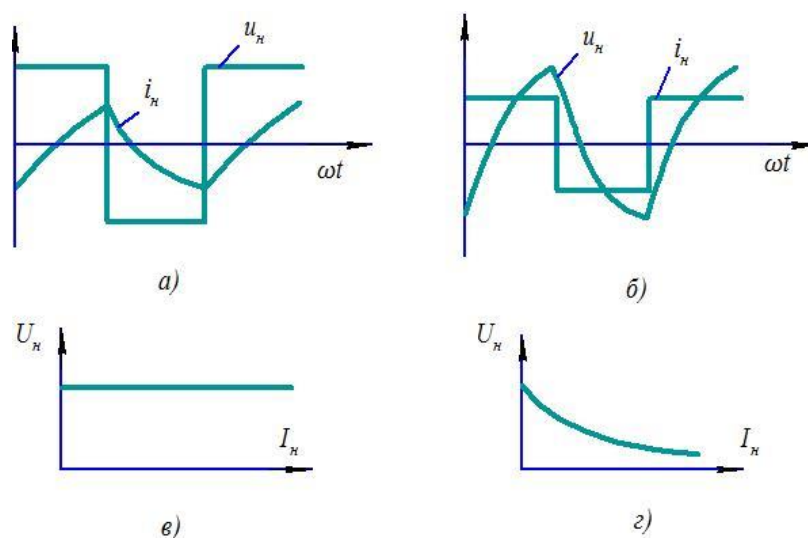


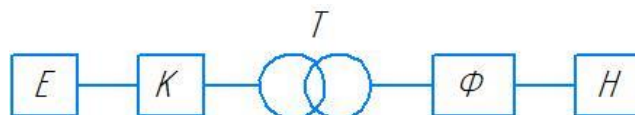
Рис. 3. Диаграммы токов и напряжений на нагрузке АИН (а), АИТ (б) и внешние характеристики инверторов напряжения (в), тока (г)

На входе АИТ включается дроссель большой индуктивности, что приводит к незначительному изменению входного тока, во время коммутаций силовых полупроводниковых приборов. В этом случае АИ работают в режиме генератора тока. При этом ток в нагрузке имеет прямоугольную форму, а напряжение близко к синусоидальной форме и зависит от параметров нагрузки (рис. 3б). Нагрузка АИТ, как правило, носит емкостной характер, так как при индуктивной нагрузке из-за скачкообразного изменения тока, возникли бы перенапряжения. Внешняя характеристика инверторов тока имеет падающий характер (рис. 3г).

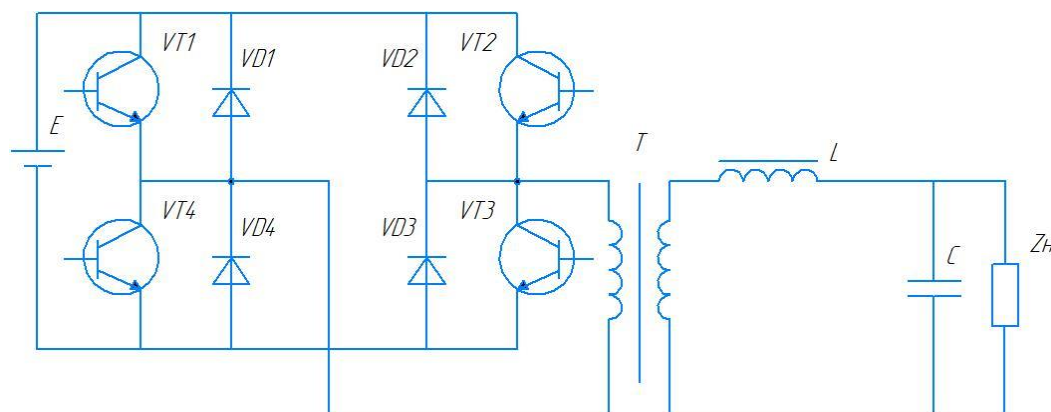
Таким образом, АИН в сравнении с АИТ имеет хорошую регулировочную характеристику, кроме того, они имеют лучшие массогабаритные показатели, показатели надежности и КПД [3, 6, 7, 11].

Разработка силовых схем (СС) АИ связана со спецификой работы статического преобразователя и его силового трансформатора, обеспечивающего согласование напряжения источника питания с нагрузкой. В настоящее время известно несколько структур АИН. Целесообразно рассмотреть их особенности работы, достоинства и недостатки [8].

Структура 1. Напряжение входного источника E преобразуется коммутатором K в модулированный по синусоидальному закону сигнал с установленной частотой выходного напряжения (рис. 4). После трансформации и фильтрации на нагрузке получается синусоидальное напряжение требуемой амплитуды. Коммутатор может быть выполнен по мостовой схеме и по схеме с выведенным нулем (рис. 4) с использованием Γ -образного LC -фильтра. Структура 1 из всех рассматриваемых самая распространенная. В ней осуществляется только одно преобразование электрической энергии. Одно из главных преимуществ структуры заключается в том, что сравнительно легко осуществляется защита транзисторов от токовых перегрузок. Недостаток схемы - наличие низкочастотного трансформатора, масса которого более 50% массы АИ.



a



б

Рис. 4. Инвертор по структуре 1

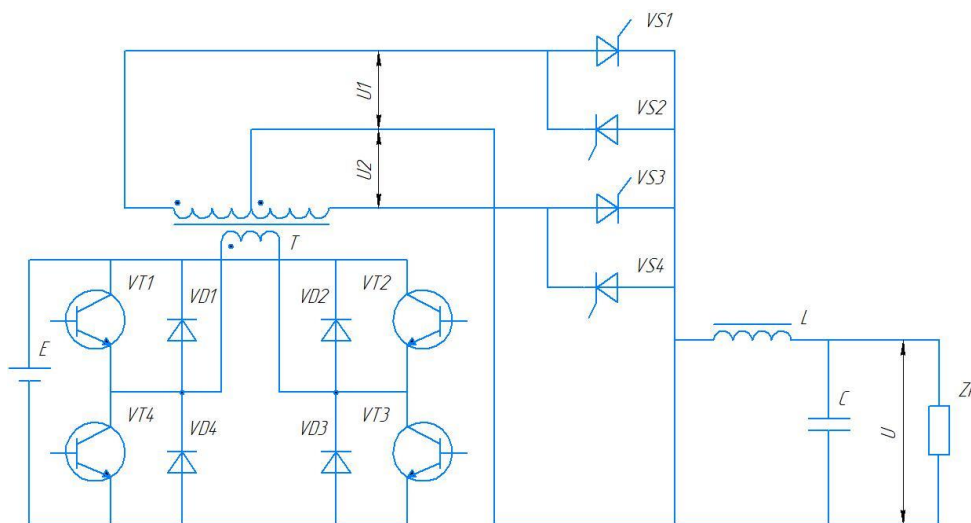
Примечание: а – структурная схема; б – принципиальная силовая электрическая схема.

Структура 2. В этой структуре производится предварительное инвертирование коммутатором $K1$ уровня E на высокой частоте (рис. 5). Трансформированный до требуемой величины сигнал в виде прямоугольных импульсов подается на реверсивный выпрямитель $K2$. Последний преобразует входной сигнал в моделированное по синусоидальному закону напряжение, которое после фильтрации поступает на нагрузку.

Здесь ценою двукратного преобразования энергии значительно (в несколько раз) уменьшается масса АИ.



а



б

Рис. 5. Инвертор по структуре 2

Примечание: а – структурная схема; б – принципиальная силовая электрическая схема.

Структура 3. Она отличается от структуры 2 тем, что вместо реверсивного выпрямителя используется узел «выпрямитель (B) – фильтр ($\Phi 1$) – коммутатор ($K2$)», преобразующий постоянный уровень на выходе модулированное по синусоидальному закону напряжение, которое после фильтрации поступает на нагрузку. На рис. 6 представлена упрощенная схема такого инвертора, где высокочастотный коммутатор $K1$, выполненный на транзисторах $VT1$ и $VT2$, и неуправляемый выпрямитель B выполнен по схеме с выведенным нулем, а низкочастотный коммутатор $K2$ (транзисторы $VT3$ – $VT6$) – по мостовой схеме.

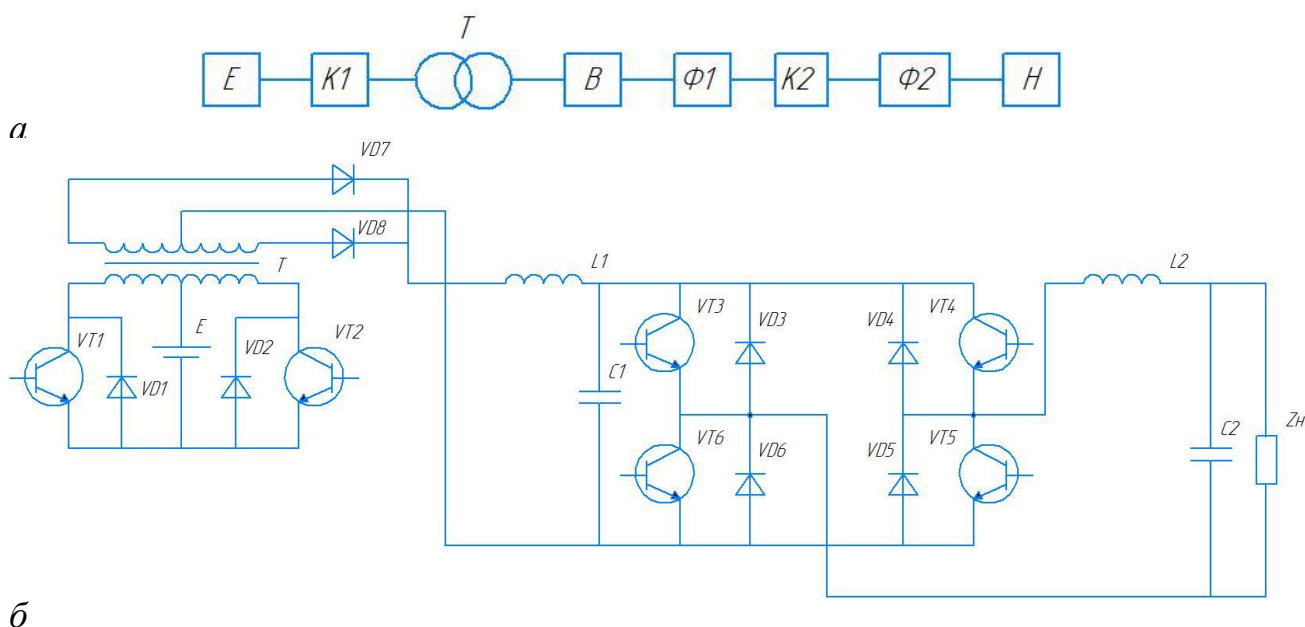


Рис. 6. Инвертор по структуре 3

Примечание: *а* – структурная схема; *б* – принципиальная силовая электрическая схема.

Если применить управляемый выпрямитель, то можно стабилизировать напряжение питания коммутатора $K2$ и тем самым осуществить регулирование выходного напряжения. Структура 3 из-за наличия выпрямителя позволяет передавать энергию только в одном направлении - в сторону нагрузки. Это вносит некоторую специфику в ее работу и в выполнение отдельных узлов. Во-первых, коммутатор $K1$ реактивной мощности почти не потребляет (работает в облегченном режиме) и его можно сделать достаточно компактным. Во-вторых, для компенсации реактивной мощности нагрузки величину емкости конденсатора $C1$ нужно взять большой. Применение данной структуры предпочтительно в том случае, если суммарные показатели блоков « $B+\Phi 1+K2$ » лучше показателей реверсивного выпрямителя $K2$ (рис. 5). При этом низковольтный источник может обеспечивать электропитание

высоковольтного приемника. Известное техническое решение миниатюрного бортового преобразователя по структуре 3 мощностью 0,7 кВА. Удельная мощность преобразователей данной структуры составляет 300 Вт/кг.

Структура 4. Преобразователи по этой структуре работают по принципу суммирования выходных напряжений двух инверторных блоков с последующим реверсивным выпрямлением суммарного напряжения, причем выходная частота равна разности рабочих частот инверторов.

В наиболее простом случае суммируются два прямоугольных напряжения разных частот, в результате чего получается ШИМ (широтно-импульсная модуляция) по треугольному закону. При этом высокочастотное преобразование можно осуществить и одним мостовым коммутатором (рис. 7), где транзисторы разных фаз переключаются с разными частотами, а переключение транзисторов реверсивного выпрямителя осуществляется в момент минимума огибающей ШИМ сигнала.

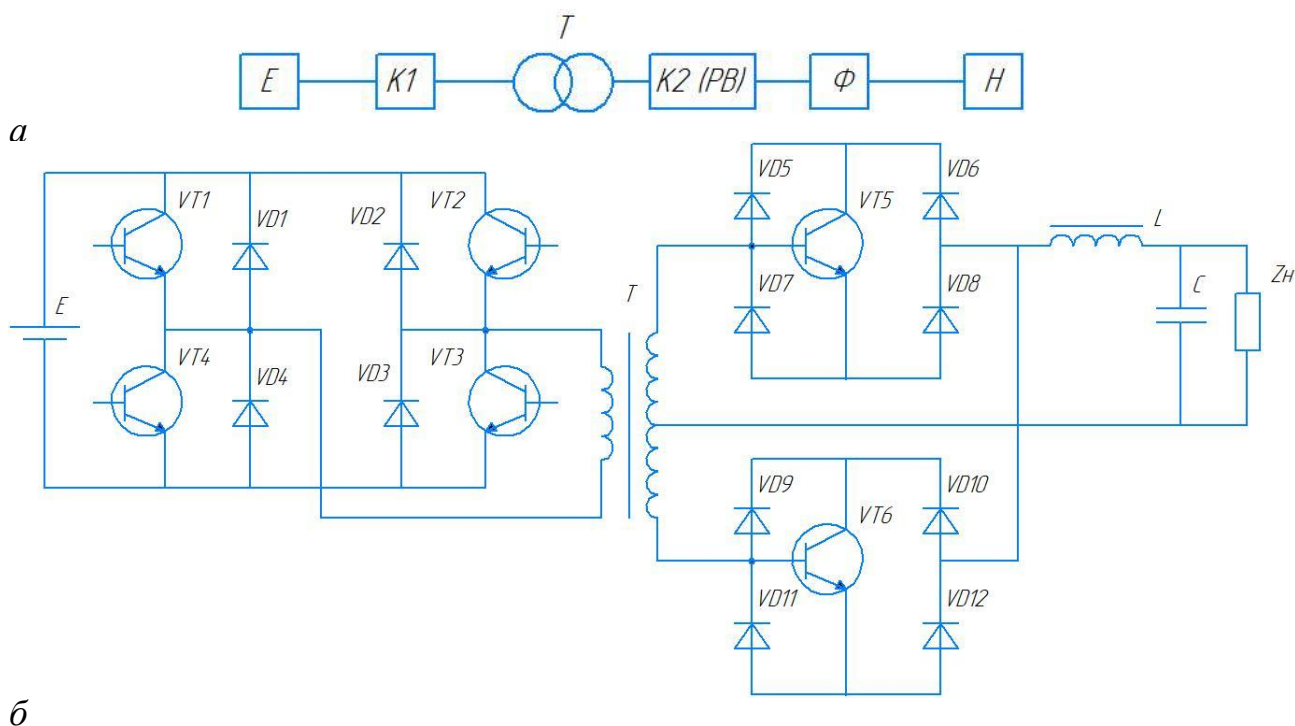


Рис. 7. Преобразователь по структуре 4

Примечание: а – структурная схема; б – принципиальная силовая электрическая схема.

Регулирование напряжения осуществляется методом ШИР (широтно-импульсного регулирования) за счет управления силовых ключей коммутаторов $K1$ (транзисторы $VT1$ – $VT4$).

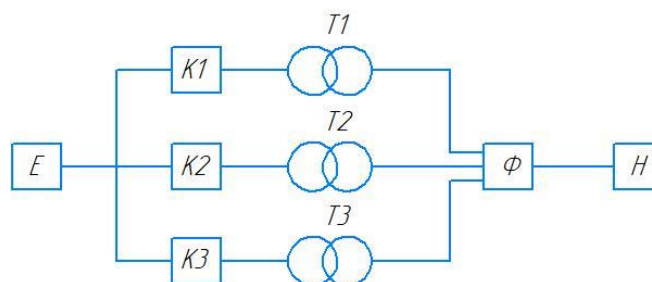
В данном случае также производится двойное преобразование энергии, как и в структуре 3. Поэтому даже при формальном сравнении схема рис. 7 явно невыгодна. Так как в реверсивных выпрямителях структуры 4 имеется в 2 раза больше силовых ключей, чем в структуре 2, то она обладает худшими массогабаритными показателями и энергетическими показателями.

Структура 5. Синусоидальную форму выходного напряжения можно получить суммированием выходных прямоугольных напряжений нескольких инверторов с одинаковыми амплитудами и частотами, но с разными фазами, или же с разными амплитудами, частотами и фазами. В обоих случаях преследуется цель исключить максимальное количество низких гармоник в выходном напряжении.

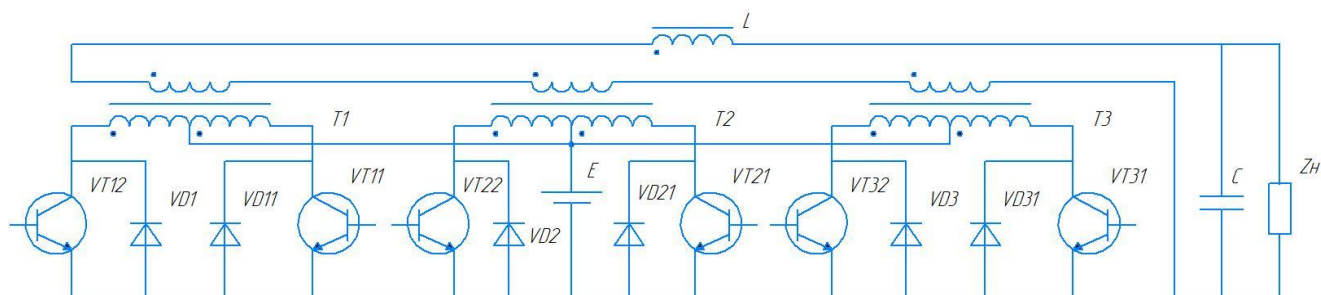
На рис. 8 представлена такая структура на примере трех инверторов (коммутаторов). Инвертор состоит из шести взаимосвязанных полумостовых автогенераторов с общим емкостным делителем напряжения и с трансформаторной обратной связью, соединенных в кольцевую пересчетную схему.

Обычно такой принцип аппроксимации квазисинусоидального напряжения применяется для нестабилизированных (разомкнутых) инверторов, работающих на мало изменяющуюся нагрузку. Регулирование можно осуществить изменением длительностей и (или) уровней напряжений. Стабилизация напряжения приводит к многоконтурной сложной системе управления. Кроме того, сама структурная схема достаточно сложна, т.е. имеет низкие показатели надежности и КПД [3, 12].

Таким образом, из приведенного анализа структур построения силовых схем транзисторных инверторов следует, что наиболее перспективны структуры 1, 2, 3. Они позволяют относительно легко регулировать выходное напряжение особенно при создании замкнутых стабилизированных систем.



а



б

Рис. 8. Инвертор по структуре 5

Примечание: а – структурная схема; б – принципиальная силовая электрическая схема.

Приближенные количественные оценки структур 1, 2, 3 инверторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количественные оценки структур 1, 2 и 3 инверторов

| Тип структуры АИ | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|--|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| | Схема с выведенным нулем | Мостовая схема | Схема с выведенным нулем | Мостовая схема | Схема с выведенным нулем | Мостовая схема |
| Кол-во преобразований электроэнергии | 1 | | 2 | | 3 | |
| Кол-во транзисторных (тиристорных) модулей (ТМ) | 2 | 4 | 6 | 8 | 6 | 8 |
| Тип используемого трансформатора (Тр) | НЧ | | ВЧ | | ВЧ | |
| Кол-во используемых фильтров (Ф) | 1 | | 1 | | 2 | |
| Система управления (СУ) | Простая | | Сложная | | Сложная | |
| Защита от перегрузок | Простая | | Сложная | | Сложная | |
| Целесообразно применить при входном напряжении | Низком | Высоком | Низком | Высоком | Низком | Высоком |
| Суммарные массогабаритные показатели по функциональным схемам | 2(ТМ) + 1(ТрНЧ) +1(Ф) + 1(СУ) | 4(ТМ) + 1(ТрНЧ) +1(Ф) +1(СУ) | 6(ТМ) +1(ТрНЧ) +1(Ф) +1(СУ) | 8(ТМ) +1(ТрНЧ)+1(Ф) +1(СУ) | 6(ТМ) +1(ТрНЧ) +2(Ф) +1(СУ) | 8(ТМ) +1(ТрНЧ)+2(Ф) +1(СУ) |

Как следует из таблицы 1, структура 1 является наиболее простой, что облегчает вопросы разработки, наладки, эксплуатации и обеспечивает высокую надежность. В ней производится только одно преобразование электрической энергии и, соответственно, меньше потери мощности. Используется минимальное количество транзисторных ключей, что дает выигрыш по прямым потерям и потерям мощности на управление транзисторами.

Основным недостатком данной структуры является наличие низкочастотного трансформатора и фильтра, а это ведет к неоправданному увеличению веса и габаритов инвертора.

Структуры 2 и 3 по сравнению со структурой 1 обладают более сложной системой управления и имеют большее количество транзисторных (тиристорных) ключей. Однако основным преимуществом данных структур по сравнению со структурой 1 является то, что в них используется высокочастотный трансформатор и фильтр, обладающий значительно меньшими массогабаритными показателями.

Структура 2 по сравнению со структурой 3 обладает лучшим КПД и меньшими потерями, так как имеет на одно количество преобразований электроэнергии меньше.

Таким образом, структура 2 является наиболее целесообразной и выгодной для применения в составе ЭСБ. Причем мостовую схему целесообразно использовать при высоких входных напряжениях, а схему с выведенным нулем – при низких напряжениях. Это связано с удвоенным значением напряжения питания на силовых ключах.

Использование данной структуры дает более широкие перспективы для улучшения технико-экономических показателей АИ, позволит расширить поиск новых направлений и методов преобразования электрической энергии.

Кроме того, это позволит варьировать увеличением промежуточной частоты преобразования. И еще немаловажным аспектом является тот момент, что использование электрической энергии повышенной частоты повышает электробезопасность применения данных преобразователей [13-15].

Список использованных источников:

1. Григораш, О. В. Малая энергетика России: состояние и перспективы / О. В. Григораш, А. В. Квитко // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 15–16 июня 2023 года. – Краснодар: ФГБУ "Российское энергетическое агентство" Минэнерго России

Краснодарский ЦНТИ- филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2023. – С. 63-67.

2. Григораш, О. В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках / О. В. Григораш, Е. А. Денисенко // Малая энергетика: проблемы, задачи и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, Краснодар, 15–16 июня 2023 года. – Краснодар: ФГБУ "Российское энергетическое агентство" Минэнерго России Краснодарский ЦНТИ- филиал ФГБУ "РЭА" Минэнерго России, 2023. – С. 67-72.

3. Григораш, О. В. Автономные инверторы солнечных фотоэлектрических станций сельскохозяйственных потребителей / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, С. М. Пятикопов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – № 1. – С. 11-12.

4. Григораш, О. В. О перспективах применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии / О. В. Григораш, Ю. П. Степура, С. М. Пятикопов // Промышленная энергетика. – 2006. – № 7. – С. 37-40.

5. К обоснованию концентраторов для автономных солнечных электростанций / С. М. Воронин, С. М. Пятикопов, Е. П. Пименов, А. В. Дутова // АгроЭкоИнфо. – 2017. – № 2(28). – С. 9.

6. Инвертор для автономных систем электроснабжения / О. В. Григораш, Ю. В. Даус, Е. А. Денисенко, А. Э. Коломейцев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 2(74). – С. 315-323. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-02-38.

7. Григораш, О. В. Автономные солнечные инверторы / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, П. М. Барышев // Интеграция мировой науки и техники: новые концепции и парадигмы: Материалы II Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 28 февраля 2023 года. – Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью "Ставропольское издательство "Параграф", 2023. – С. 225-228.

8. Пятикопов, С. М. Автономные инверторы солнечных электростанций сельскохозяйственных потребителей: специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пятикопов Сергей Михайлович. – Краснодар, 2006. – 148 с.

9. Электробезопасность в сельскохозяйственном производстве / И. Э. Липкович, М. М. Украинцев, И. В. Егорова [и др.]; Министерство сельского хозяйства РФ; Азово-Черноморский инженерный институт - филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственный аграрный университет" в г. Зернограде. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственный аграрный университет" в г. Зернограде, 2022. – 244 с.

10. Стратегия повышения безопасности электроснабжения предприятий АПК / И. Э. Липкович, М. М. Украинцев, С. М. Пятикопов [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. –

2020. – № 2(50). – С. 74-83.

11. Условия эффективного применения возобновляемых источников энергии в России / И. В. Юдаев, С. М. Воронин, Н. Г. Очиров [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 4(73). – С. 146-156.

12. Воронин, С. М. Автономные системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии для сельских объектов / С. М. Воронин, М. М. Украинцев // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15, № 4(60). – С. 82-94. – DOI 10.55618/20756704_2022_15_4_82-94.

13. Григораш, О. В. Ветро-солнечные электростанции: перспективы, особенности проектирования и выбора основных функциональных элементов / О. В. Григораш, А. В. Квитко. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2022. – 119 с.

14. Перспективы солнечной энергетики в России / О. В. Григораш, Е. В. Воробьев, О. Я. Ивановский, А. Э. Коломейцев // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 30-31.

15. Григораш, О. В. Перспективы использования новых видов источников энергии / О. В. Григораш, О. Я. Ивановский, А. С. Туаев // Сельский механизатор. – 2021. – № 1. – С. 26-27.

Цитирование:

Липкович И.Э., Пятикопов С.М., Егорова И.В., Петренко Н.В. Выбор рациональной структуры автономного инвертора для использования в энергоснабжении сельскохозяйственного производства [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 1. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/1/st_103.pdf DOI: <https://doi.org/10.51419/202151103>.