

УДК 621.314

UDC 621.314

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С  
УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ****FREQUENCY CONVERTERS WITH  
IMPROVED PERFORMANCE**

Григораш Олег Владимирович  
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
grigorash61@mail.ru,  
РИНЦ SPIN-код: 4729-2767

Grigorash Oleg Vladimirovich  
Doctor of engineering sciences, professor, head of the  
chair, grigorash61@mail.ru,  
SPIN-code: 4729-2767

Денисенко Евгений Александрович  
к.т.н., старший преподаватель  
denisenko\_88@mail.ru  
РИНЦ SPIN-код: 4263-0056

Denisenko Evgeniy Alexandrovich  
Candidate of engineering sciences, senior lecturer  
denisenko\_88@mail.ru  
SPIN-code: 4263-0056

Корзенков Павел Геннадьевич  
магистр  
denisenko\_88@mail.ru

Korzenkov Pavel Gennadevich  
master degree  
denisenko\_88@mail.ru

Бондарчук Андрей Викторович  
студент  
denisenko\_88@mail.ru  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Bondarchuk Andrey Viktorovich  
student  
denisenko\_88@mail.ru  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В автономных системах электроснабжения широкое применение находят преобразователей частоты, которые способны одновременно повышать или понижать частоту тока, так и стабилизировать напряжение источника электроэнергии. Эти положительные свойства преобразователей частоты, позволяют улучшить эксплуатационно-технические характеристики автономной системы электроснабжения в комплексе. В статье предложена функциональная схема преобразователя частоты, выполненного на реверсивном выпрямителе. Представлены временные диаграммы, поясняющие принцип её работы. В статье рассматриваются также две функциональные схемы непосредственных преобразователей частоты, выполненных на однофазно-трёхфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем. Принцип действия этих схем также рассмотрен на временных диаграммах. Предложенные технические решения преобразователей частоты содержат меньшее количество силовых электронных приборов, что позволяют, тем самым уменьшить уровень электромагнитных помех, повысить КПД и показатели надёжности преобразователей частоты. Рассмотренные схемы преобразователей частоты, позволяют улучшить технические характеристики автономных систем электроснабжения в комплексе. Значительно можно улучшить характеристики систем электроснабжения за счёт применения принципа модульного агрегатирования основных

In the autonomous power supply systems there are widely used frequency converters that are able to simultaneously increase or decrease the frequency of the current and voltage stabilizing power supply. These positive properties of frequency converters can improve the operational and technical characteristics of the autonomous power supply system in the complex. The article suggests a functional diagram of a frequency converter performed on reversible rectifiers. We have presented timing diagrams illustrating the principle of its operation. The article also deals with two functional scheme of direct frequency converters executed on single-phase, three-phase transformer with a rotating magnetic field. The principle of operation of these schemes has been also discussed in the timing diagrams. The proposed technical solutions for frequency converters contain a smaller amount of power electronic devices that make it possible, thereby reducing the level of electromagnetic interference, increase the efficiency and reliability of performance inverters. The considered scheme of frequency converters, can improve the technical characteristics of the autonomous power supply systems in the complex. We can significantly improve the performance of power systems through the use of modular aggregating principle of the basic functional units of an autonomous system

функциональных узлов автономной системы

Ключевые слова: АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, РЕВЕРСИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ, НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Keywords: AUTONOMOUS SYSTEM, FREQUENCY CONVERTER, REVERSE RECTIFIER, DIRECT FREQUENCY CONVERTER

В автономных системах электроснабжения (АСЭ) все шире находят применение преобразователей частоты (ПЧ), которые применяются, как для повышения, так и для понижения частоты напряжения источника электроэнергии, при этом они способны выполнять две функции: стабилизировать напряжение и частоту генерируемой электроэнергии [1, 2]. Эти два положительных свойства ПЧ, позволяют улучшить эксплуатационно-технические характеристики АСЭ в комплексе [3].

Перспективным является направление применения в составе ПЧ реверсивных выпрямителей (РВ), выполненные на двух парах встречно-параллельно включенных полупроводниковых приборов, а их система управления обеспечивает независимую стабилизацию частоты и выходного напряжения преобразователя [4]. Такие ПЧ имеют уменьшенное число силовых полупроводниковых приборов и не сложные технические решения систем управления. РВ могут быть выполнены на полупроводниковых приборах с прямой и обратной проводимостью, что, кроме того, позволит значительно улучшить их эксплуатационно-технические характеристики.

На рисунке 1 приведена функциональная схема ПЧ, а на рисунке 2 – диаграммы напряжений, поясняющие принцип его работы [5].

Преобразователь частоты содержит трансформатор Т первичная обмотка W11 имеет выводы 1 и 2 которые подключены к источнику напряжения повышенной частоты, реверсивный выпрямитель РВ, выполненный на тиристорах VS1 - VS4, фильтр Ф и систему управления СУ. К выводам 3 и 4 преобразователя подключается нагрузка.

ПЧ работает следующим образом. К вводу преобразователя частоты подключается источник напряжения повышенной частоты тока, которое по величине понижается до требуемого уровня необходимого для нагрузки трансформатором Т. Реверсивный выпрямитель РВ повышенную частоту тока в частоту необходимую для нагрузки, следующим образом.

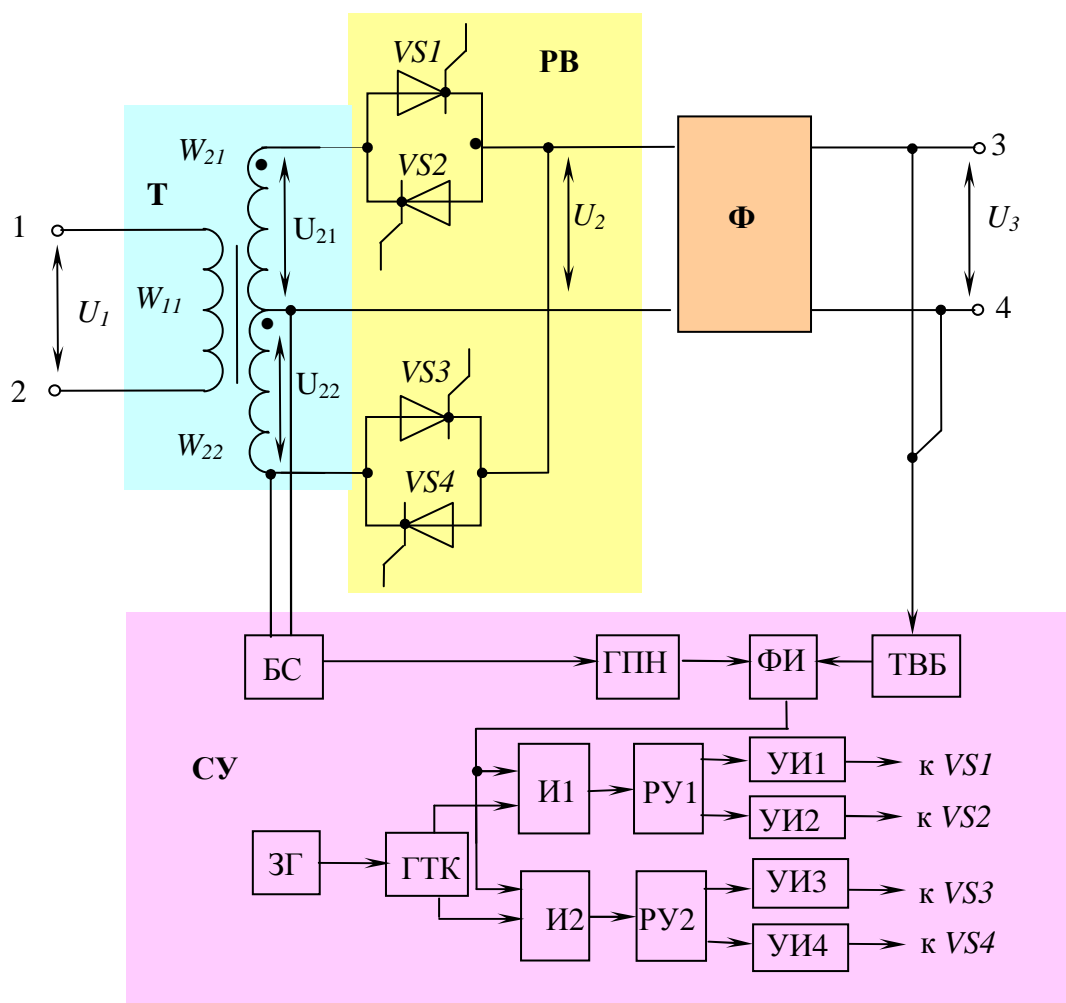


Рисунок 1 – Функциональная схема преобразователя частоты

Задающий генератор ЗГ системы управления СУ преобразователем формирует низкочастотный сигнал синусоидальной формы соответствующий частоте нагрузки (рисунок 2, а), который поступает на вход генератора типа кривой ГТК, на выходе генератора формируются импульсы соответствующие положительной и отрицательной полуволнам задающего генератора (рисунок 2, б). Сигналы с выхода генератора типа кривой ГТК

подаются на первые входы логических элементов И (И1 и И2 соответственно).

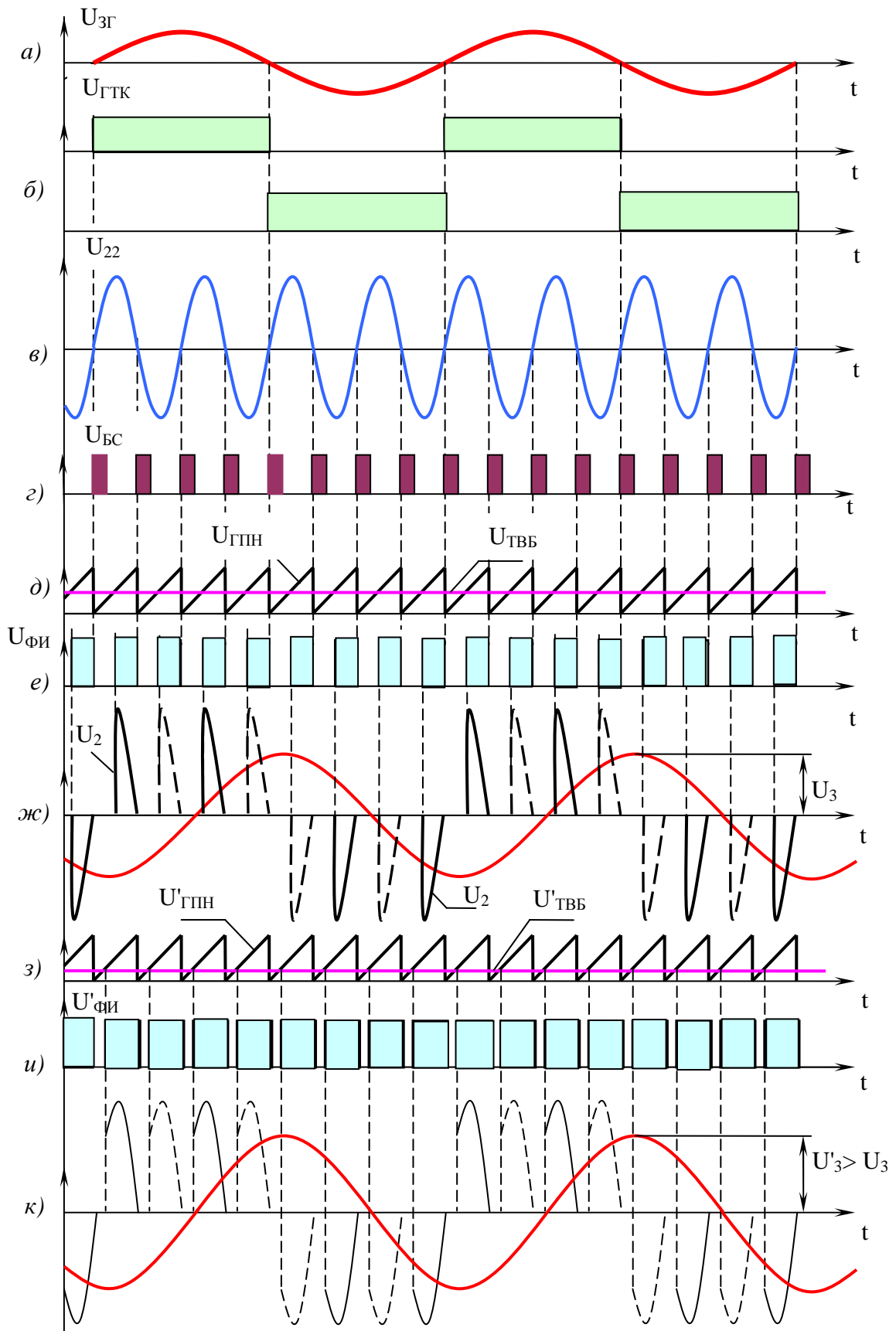


Рисунок 2 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы  
<http://ej.kubagro.ru/2016/01/pdf/84.pdf>

На вторые входы логических элементов И поступает импульсный сигнал, синхронизированный с напряжением источника питания от блока синхронизации БС (рисунок 2, в, г) через генератор пилообразного напряжения ГПН и формирователь импульсов ФИ.

Длительность этого сигнала пропорциональна величине выходного напряжения преобразователя частоты, поскольку длительность формирующего импульса управления зависит от величины выходного напряжения трансформаторно-выпрямительного блока ТВБ (рисунок 2, д, е).

При положительной полярности низкочастотного выходного напряжения срабатывает логический элемент И1 и импульсы управления через первое распределительное устройство РУ1 и усилители импульсов УИ1 и УИ2 поступают на управляющие электроды тиристоров VS1 и VS3 силовой схемы реверсивного выпрямителя РВ и на выходе преобразователя формируются положительные полуволны с напряжением  $U_2$  (рисунок 2, ж). При отрицательной полярности выходного напряжения срабатывает логический элемент И2 импульсы управления через второе распределительное устройство РУ2 и усилители импульсов УИ3 и УИ4 поступают на управляющие электроды тиристоров VS2 и VS4 силовой схемы реверсивного выпрямителя РВ и на выходе преобразователя формируется положительная полуволна  $U_2$  (рисунок 2, ж). Выходной фильтр Ф подавляет высшие гармоники и на выводах формируется низкочастотный синусоидальный сигнал  $U_3$  (рисунок 2, ж).

К примеру, при понижении уровня выходного напряжения снижается и значение  $U_{ТВБ}$  (рисунок 2, з,  $U'_{ТВБ}$ ), при этом, увеличивая длительность импульсов (рисунок 2, и,  $U'_{ФИ}$ ), что приводит к увеличению времени открытого состояния тиристоров реверсивного выпрямителя и, как следствие, увеличение уровня выходного напряжения (рисунок 2, к,  $U'3$ ).

Ещё одним из перспективных направлений решения задачи уменьшения уровня электромагнитных помех [6], а также улучшения технических характеристик ПЧ может быть решено за счет применения в их составе трансформаторов с вращающимся магнитным полем (ТВМП) [7, 8].

На рисунке 3 представлена принципиальная электрическая схема трехфазного преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, где трехфазная система напряжений получается за счет применения однофазно-трехфазного ТВМП. Преобразователь содержит трехфазную мостовую схему неуправляемого выпрямителя В, резонансный инвертор И, выполненный на транзисторах VT1 и VT2, конденсатор инвертора С1, систему управления инвертором СУ, однофазно-трехфазный трансформатор с вращающимся магнитным полем ТВМП, содержит две первичные обмотки W11 и W12, фазосдвигающий конденсатор С2, и три вторичные обмотки W21 – W23. На рис.1 показаны выводы А1, В1 и С1 для подключения источника напряжения с частотой  $f_1$  и выводы А2, В2 и С2 для подключения нагрузки с частотой напряжения  $f_2$ .

Преобразователь частоты работает следующим образом.

Трехфазное напряжение источника электроэнергии повышенной частоты  $f_1$  выпрямителем В преобразуется в напряжение постоянного тока, которое затем поступает на вход резонансного инвертора И. Инвертор И преобразует постоянный ток в переменный следующим образом. К примеру, в исходном состоянии конденсатор инвертора С1 разряжен. Для формирования положительной полуволны напряжения в первичных обмотках W11 и W12 трансформатора с вращающимся магнитным полем ТВМП система управления инвертором СУ подает управляющие импульсы на транзистор VT1, он открывается, и конденсатор инвертора С1 начинает заряжаться таким образом, что его выводы будут иметь потенциалы, указанные знаками на рисунке 3.

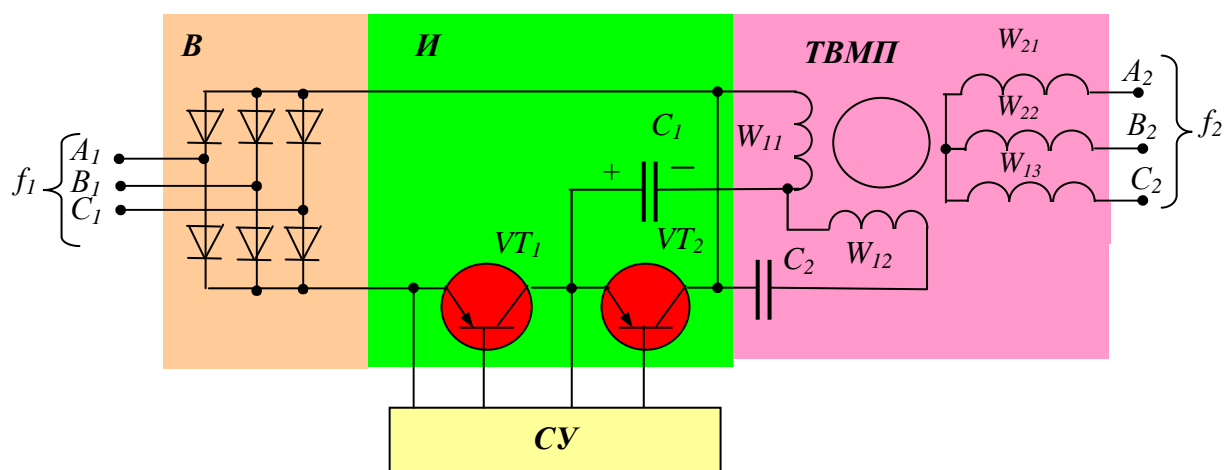


Рисунок 3 – Функциональная схема преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока, выполненного на резонансном инверторе и однофазно-трехфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем

Ток заряда конденсатора инвертора  $C_1$  будет протекать через первичные обмотки  $W_{11}$  и  $W_{12}$  трансформатор с вращающимся магнитным полем ТВМП и фазосдвигающий конденсатор  $C_2$ . Для формирования отрицательной полуволны напряжения в первичных обмотках трансформатора система управления инвертором СУ закрывает транзистор  $VT_1$  и открывает транзистор  $VT_2$ . В этом случае конденсатор резонансного инвертора И является источником питания для нагрузки, и его ток разряда будет протекать по первичным обмоткам трансформатора ТВМП и фазосдвигающий конденсатор  $C_2$  в обратном направлении. Таким образом, по первичным обмоткам  $W_{11}$  и  $W_{22}$  трансформатора протекает переменный ток, что приводит к появлению переменного магнитного потока в тороидальной части магнитопровода трансформатора. Поскольку первая  $W_{11}$  и вторая  $W_{12}$  первичные обмотки трансформатора смещены в пространстве одна относительно другой на угол  $90^\circ$  и подключены между собой через фазосдвигающий конденсатор  $C_2$ , то в магнитопроводе трансформатора образуется вращающееся магнитное поле, вызывающее действие ЭДС во вторичных обмотках. Вторичные обмотки  $W_{21}$  –  $W_{23}$

трансформатора сдвинуты одна относительно другой на угол  $120^\circ$ , поэтому на выводах А2, В2 и С2 преобразователя формируется симметричная трехфазная система напряжений переменного тока [9].

Частота выходного напряжения ПЧ определяется частотой коммутации транзисторов VT1 и VT2, а стабилизация напряжения осуществляется за счет изменения времени их открытого состояния.

Применение в конструкции ПЧ резонансного инвертора экономически целесообразно при мощностях преобразователя не превышающих 1 кВт. При больших значениях мощности ПЧ необходимо применять классические однофазные схемы инверторов, в том числе мостовую.

Таким образом, использование в составе ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока трехфазной мостовой схемы неуправляемого выпрямителя, однофазного инвертора и однофазно-трехфазного ТВМП позволяет уменьшить число полупроводниковых приборов силовой схемы преобразователя, что в свою очередь упрощает схему системы управления и повышает надежность работы ПЧ [10].

Ещё один вариант применения ТВМП в составе непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) представленный на рисунке 4. На рисунке 5 приведены диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы системы стабилизации напряжения.

Силовая схема НПЧ содержит два комплекта тиристоров VS1 и VS2, каждый из комплектов имеет три пары тиристоров включенных встречно-параллельно, и систему управления СУ. Преобразователь фаз в своем составе имеет управляющий дроссель Д с рабочей обмоткой WP и обмоткой управления WУ, ТВМП, систему стабилизации напряжения ССН, содержащую трансформаторно-выпрямительный блок ТВБ, формирователь импульсов ФИ, генератор пилообразного напряжения ГПН, усилитель импульсов У и транзистор VT (рисунок 4).





управления НПЧ формирует управляющие сигналы для комплектов тиристоров VS1 и VS2 и обеспечивает их естественную коммутацию таким образом, что на выходе преобразователя формируется однофазное напряжение стабилизированное по частоте, которое прикладывается к рабочей обмотке WP управляющего дросселя Д и к на первичным обмоткам W11 и W12 ТВМП.

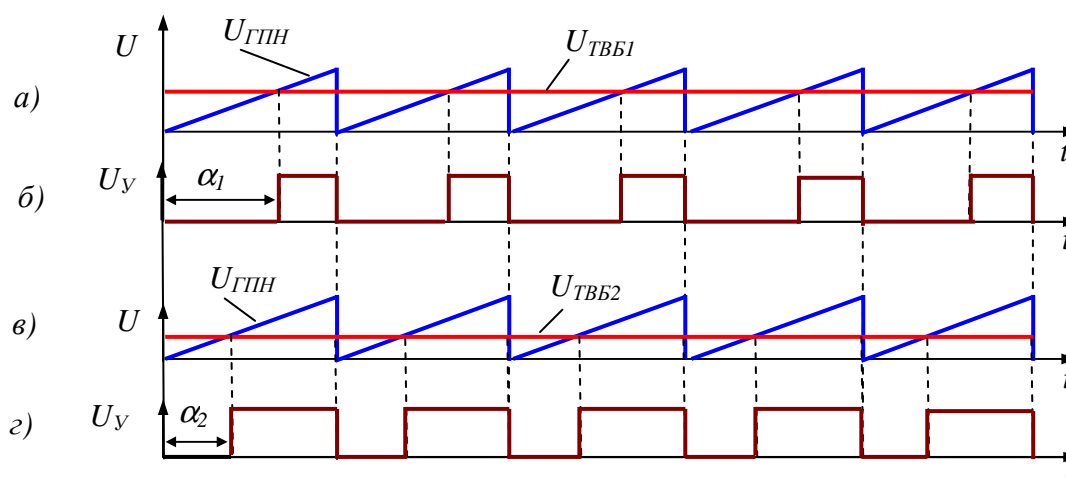


Рисунок 5 – Диаграммы напряжений, поясняющие принцип работы системы стабилизации напряжения НПЧ

При протекании тока в первичных обмотках ТВМП W11, W12 и фазосдвигающем конденсаторе С в его магнитопроводе создается вращающееся магнитное поле, вызывающее действие переменной ЭДС во вторичных обмотках W21, W22, W23 и на выходных выводах которых А2, В2 и С2 соответственно формируется симметричная трехфазная система напряжений с частотой  $f_2$ .

С выхода трансформаторно-выпрямительного блока ТВБ системы стабилизации напряжения ССН преобразователя фаз, сигнал напряжения постоянного тока  $U_{ТВБ}$  пропорциональный величине выходного напряжения ПЧ, поступает на первый и второй входы формирователя импульсов ФИ. На третий вход формирователя импульсов ФИ поступает сигнал  $U_{ГПН}$  от генератора пилообразного напряжения

ГПН, работа которого синхронизирована с входным напряжением источника преобразователя фаз UBХ. Когда сигнал  $U_{ГПН} > U_{ТВБ1}$  (рисунок 5, а) формирователь импульсов ФИ формирует импульсы управления УУ (рисунок 5, б), которые через усилитель импульсов У поступают на управляющие электроды транзистора VT. Транзистор VT открывается на время длительности управляющих импульсов. Угол управления транзистором  $\alpha_1$  (рисунок 5, б), соответствует номинальному режиму работы системы стабилизации напряжения.

При возникновении дестабилизирующих факторов в нагрузке преобразователя фаз система стабилизации напряжения ССН изменяет время открытого состояния транзистора VT таким образом, что выходное напряжение ПЧ остается неизменным. К примеру, если напряжение на выходе ПЧ уменьшится, то и уменьшится напряжение на выходе трансформаторно-выпрямительного блока ТВБ ( $U_{ТВБ2} < U_{ТВБ1}$ , рисунок 5, в), уменьшится угол управления транзистором до величины равной  $\alpha_2$  (рисунок 5, г). Тогда увеличится время открытого состояния транзистора VT, что приведет к увеличению тока в обмотке управления WУ управляющего дросселя Д (рисунок 4) и уменьшению сопротивления рабочей обмотки WP и, соответственно, уменьшению падения напряжения на этой обмотке. Поскольку рабочая обмотка WP управляющего дросселя Д включена последовательно с первичными обмотками ТВМП, то это приведет к увеличению напряжения на первичных обмотках трансформатора, а значит, увеличится напряжение на выходе ПЧ.

Возможен также вариант исключения из состава рассматриваемого ПЧ управляющего дросселя Д и системы стабилизации напряжения ССН (рисунок 4). Однако в этом случае усложняется система управления трехфазно-однофазным НПЧ, и, кроме того, для обеспечения широкого диапазона регулирования напряжения, необходимо дополнительно

вводить в состав силовой схемы цепь искусственной коммутации. Все это приведет к понижению показателей надежности НПЧ.

Рассмотренные схемы ПЧ, выполненные на реверсивном выпрямителе и однофазно-трёхфазном ТВМП, позволяют улучшить технические характеристики АСЭ в комплексе. Значительно можно улучшить характеристики АСЭ применения принцип модульного агрегатирования основных функциональных узлов [11].

### Список литературы

1. Григораш О.В., Божко С.В., Нефедовский В.А., Столбчатый Д.А. Непосредственные преобразователи частоты. Краснодар. 2008. С.148.
2. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии. Краснодар. 2006. С.264.
3. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Столбчатый Д.А. К вопросу улучшения технических характеристик преобразователей частоты автономных систем электроснабжения. Труды Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар. 2009. № 6. С.186 – 190.
4. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения. Краснодар. 2011. С.188.
5. Григораш О.В., Винников А.В., Алмазов В.В. и др. Преобразователь частоты. Патент на изобретение RUS 2417509 16.02.2010.
6. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости узлов САЭ. Промышленная энергетика. 2001. № 2. С.44-47.
7. Григораш О.В. Преобразователи электрической энергии на базе трансформаторов с вращающимся магнитным полем для систем автономного электроснабжения. Промышленная энергетика. 1997. № 7. С.21-25.
8. Григораш О.В., Кабанков Ю.А. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии. Электротехника. 2002. № 3.
9. Григораш О.В., Божко С.В., Шхалахов Р.С. Трансформаторы статических преобразователей электроэнергии: Монография. КубГАУ. – Краснодар, 2008, 134 с.
10. Атрощенко В.А., Григораш О.В. Непосредственные преобразователи частоты с улучшенными техническими характеристиками для систем автономного электроснабжения // Электротехника. 1997. № 11.
11. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. Краснодар. 2005. С. 306.

### References

1. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Nefedovskij V.A., Stolbchatyj D.A. Neposredstvennyye preobrazovateli chastoty. Krasnodar. 2008. S.148.
2. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. Statische skie preobrazovateli jelektrojennergii. Krasnodar. 2006. S.264.

3. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Stolbchatyj D.A. K voprosu uluchshenija tehnikeskikh harakteristik preobrazovatelej chastoty avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Krasnodar. 2009. № 6. S.186 – 190.
4. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E. Sticheskie preobrazovateli i stabilizatory avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2011. S.188.
5. Grigorash O.V., Vinnikov A.V., Almazov V.V. i dr. Preobrazovatel' chastoty. Patent na izobrenenie RUS 2417509 16.02.2010.
6. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovместимости uzlov SAJe. Promyshlennaja jenergetika. 2001. № 2. S.44-47.
7. Grigorash O.V. Preobrazovateli jelektricheskoy jenerгии na baze transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Promyshlennaja jenergetika. 1997. № 7. S.21-25.
8. Grigorash O.V., Kabankov Ju.A. K voprosu primenenija transformatorov s vrashhajushhimsja magnitnym polem v sostave preobrazovatelej jelektrojenerгии. Jelektrotehnika. 2002. № 3.
9. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Shhalahov R.S. Transformatory sticheskih preobrazovatelej jelektrojenerгии: Monografija. KubGAU. – Krasnodar, 2008, 134 s.
10. Atroshhenko V.A., Grigorash O.V. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty s uluchshennymi tehnikeskimi harakteristikami dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Jelektrotehnika. 1997. № 11.
11. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2005. S. 306.