

В. Г. Макаров

## ТРЕХФАЗНЫЙ МАГНИТО-ТРАНЗИСТОРНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКОЙ ТОКА

*Ключевые слова:* трехфазный инвертор, автогенераторная, схема управления, трехфазный стержневой трансформатор.

*Проводится анализ принципа действия трехфазного магнито-транзисторного инвертора. Предложен способ формирования управляющих напряжений транзисторов с помощью третьей гармоники напряжения.*

*Keywords:* three-phase inverter, autogenerating, the control scheme, three-phase core transformer.

*Action principle is analysed of the three-phase magnetic transistor inverter. The method of formation of control voltages of transistors by means of the third harmonica of voltage is offered.*

### Введение

Транзисторные автономные инверторы с автогенераторными схемами управления получили название магнито-транзисторных инверторов [1, 2]. Транзисторы таких инверторов работают в экономичном ключевом режиме, а качестве нелинейного релейного элемента используется трансформатор с прямоугольной петлей гистерезиса, который задает частоту переключения транзисторов, формирует управляющие импульсы и выполняет функцию синхронизации фаз.

В [2] отмечены преимущества магнито-транзисторных инверторов напряжения (МТИН) и показано, что с точки зрения общепромышленного применения наибольший интерес представляют трехфазные статические преобразователи электрической энергии. Однако при построении подобных МТИН особенно сложно решаются вопросы формирования ступенчатых форм и синхронизации фаз выходных напряжений, а также формирования управляющих напряжений транзисторов.

В [2, 3] показано, что формирование двухступенчатой формы фазного напряжения в трехфазном МТИН можно осуществить, применив несколько обмоток в каждой фазе. Предложенный способ формирования двухступенчатой формы фазного напряжения использовался на кафедре электропривода и электротехники Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ) при разработке двух- и трехфазных МТИН, в которых синхронизация фаз осуществляется с помощью обмоток переключающих трансформаторов. При этом схема соединения обмоток и определенное соотношение количества витков позволяет получить устойчивую синхронизацию фаз и необходимый фазовый сдвиг.

В [2] рассматриваются устройство и принцип действия разработанного на кафедре электропривода и электротехники КНИТУ трехфазного самовозбуждающегося инвертора, магнитная система которого выполнена на базе трехфазного группового трансформатора.

Однако МТИН на трехфазном групповом трансформаторе имеет следующие недостатки:

1) применение в автогенераторной схеме управления МТИН трехфазного группового трансформатора, имеющего повышенные массу и габари-

ты, приводит к завышенному расходу активных материалов;

2) синхронизация фаз выходных напряжений осуществляется на третьей гармонике магнитного потока вследствие чего в кривых фазных напряжений МТИН содержится третья гармоника.

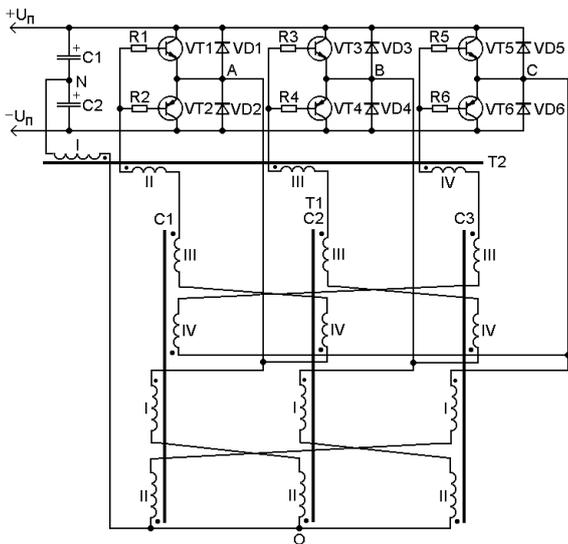
Вопросы выбора трансформатора в трехфазном МТИН рассматривались в [4], где показано, что предпочтение следует отдавать трехстержневому трансформатору. При этом в [4] отмечено, что применение трехстержневого трансформатора потребует разработки схемного решения автогенераторной схемы управления, отличающегося от предложенного в [2].

Одной из разработок кафедры электропривода и электротехники КНИТУ является трехфазный самовозбуждающийся инвертор, магнитная система которого выполнена на базе трехфазного стержневого трансформатора [5]. Показано, что одним из недостатков схемы МТИН на трехстержневом трансформаторе является двухступенчатая форма управляющих напряжений транзисторов, подобная форме фазных напряжений. Известно, что для экономичной работы транзисторов в режиме переключения необходимо формировать управляющие напряжения прямоугольной формы.

### Теоретические положения

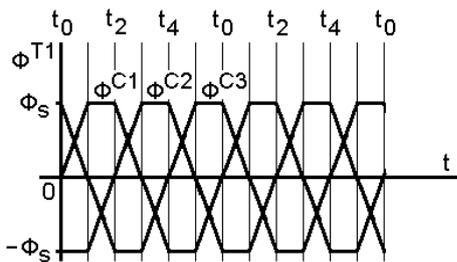
На кафедре электропривода и электротехники КНИТУ разработан трехфазный самовозбуждающийся инвертор, магнитная система которого выполнена на базе трехфазного стержневого трансформатора, а силовая часть собрана на шести комплиментарных транзисторах VT1 – VT6, соединенных по мостовой схеме (рис. 1).

Управление транзисторами – 180-градусное. На каждом стержне трансформатора T1 размещаются первичная обмотка I, синхронизирующая обмотка II и две вторичных обмотки III – VI. Коэффициент трансформации  $n$  между первичными и синхронизирующими обмотками равен единице, что обеспечивает взаимный сдвиг фаз на  $120^\circ$ . Транзисторы шунтируются обратными диодами VD1 – VD6. Трехфазная нагрузка подключается к точкам А, В, С.



**Рис. 1 – Принципиальная схема трехфазного МТИН с вольтодобавочным трансформатором**

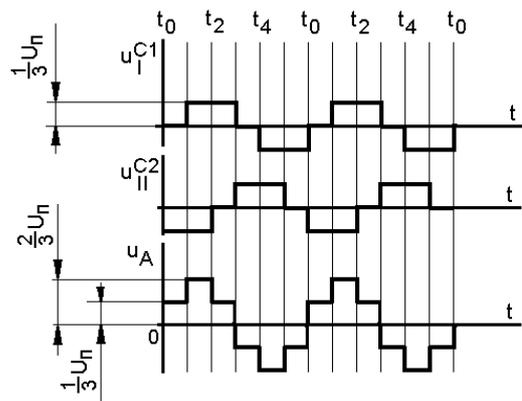
Напряжения на первичных и синхронизирующих обмотках формируются в соответствии с изменением магнитных потоков в стержнях С1, С2, С3 трансформатора Т1, временные диаграммы которых приведены на рис. 2.



**Рис. 2 – Временные диаграммы магнитных потоков стержней С1 – С3 трансформатора Т1**

Формирование фазного напряжения двухступенчатой формы осуществляется путем суммирования напряжений первичной обмотки I и синхронизирующей обмотки II, расположенных на разных стержнях. Временные диаграммы, поясняющие формирование фазного напряжения  $u_A$ , показаны на рис. 3.

Видно, что напряжения на обмотках I и II имеют одну ступень длительностью  $120^\circ$ , что обеспечивается одинаковой скоростью движения рабочих точек стержней С1 – С3 трансформатора Т1 по кривой намагничивания (рис. 2 а) на отдельных интервалах времени (рис. 2 б) и паузу длительностью  $60^\circ$  на нулевом уровне, возникающую вследствие насыщения соответствующего стержня трансформатора Т1 (рис. 2 б). Значение магнитного потока, соответствующее насыщению одного из стержней, на рис. 2 обозначено  $\Phi_s$ .



**Рис. 3 – Формирование кривой фазного напряжения  $u_A(t)$**

В соответствии с рис. 3 фазные напряжения будут иметь двухступенчатую форму с амплитудой первой ступени  $\frac{1}{3}U_{\text{п}}$ , второй ступени –  $\frac{2}{3}U_{\text{п}}$  и не будут содержать в своем составе третьих гармоник.

Линейные напряжения будут иметь амплитуду, равную напряжению питания  $U_{\text{п}}$  и паузу  $60^\circ$  на нулевом уровне.

Для формирования прямоугольных управляющих напряжений транзисторов в схему инвертора введен маломощный вольтодобавочный трансформатор Т2 (рис. 1), первичная обмотка которого подключается между точками О и N. Трансформатор Т2 имеет также три вторичных обмотки II – IV. Средняя точка N источника питания образована с помощью конденсаторов С1 и С2 одинаковой емкости. Установлено, что между точками О и N возникает напряжение  $u_0$ . Это напряжение имеет прямоугольную форму, амплитуду  $\frac{1}{6}U_{\text{п}}$  и изменяется с

тройной частотой по отношению к частоте фазных и линейных напряжений инвертора. При этом по цепи первичной обмотки трансформатора Т2 замыкается третья гармоника тока.

Формирование управляющих напряжений транзисторов  $U_{\text{БЭ}}$  прямоугольной формы с помощью вторичных обмоток II – IV вольтодобавочного трансформатора (ВТ) поясняет рис. 4.

Управляющее напряжение транзистора VT1 формируется в соответствии с формулой

$$u_{\text{БЭ}}^{\text{VT1}} = u_{\text{III}}^{\text{C1}} - u_{\text{IV}}^{\text{C2}} + u_{\text{II}}^{\text{T2}}$$

где  $u_{\text{III}}^{\text{C1}}$  – напряжение на обмотке III стержня С1 трансформатора Т1;  $u_{\text{IV}}^{\text{C2}}$  – напряжение на обмотке IV стержня С2 трансформатора Т1,  $u_{\text{II}}^{\text{T2}}$  – напряжение на обмотке II трансформатора Т2.

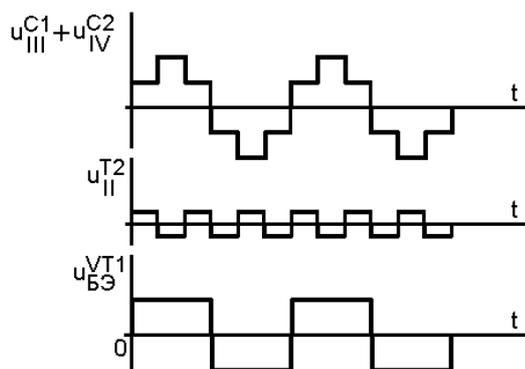


Рис. 4 – Формирование напряжения  $U_{БЭ}$  транзистора  $VT1$  в МТИН с вольтодобавочным трансформатором

Таким образом, введение третьей гармоники напряжения в цепи управления транзисторов позволяет формировать в МТИН на трехстержневом трансформаторе управляющие напряжения прямоугольной формы. При этом обеспечивается экономичная работа транзисторов в режиме переключения.

#### Обсуждение результатов

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предлагаемой схемы МТИН на трехстержневом трансформаторе, корректность разработанной методики проектирования и справедливость исходных положений. Следует отметить, что применение вольтодобавочного трансформатора не оказывает существенного влияния на массу, габариты и энергетические показатели МТИН.

#### Выводы

1. Использование в автогенераторной схеме управления МТИН трехфазного стержневого трансформатора позволяет избавиться от третьих гармоник в кривых магнитных потоков и фазных напряжений инвертора.

2. Применение трехфазного стержневого трансформатора в совокупности с вольтодобавочным трансформатором вместо группового позволяет экономить 27 % стали и 11 % меди, обеспечив тем самым снижение массы, габаритов и стоимости инвертора.

3. Управляющие напряжения транзисторов МТИН с вольтодобавочным трансформатором имеют прямоугольную форму, обеспечивающую экономичную работу транзисторов в режиме переключения.

#### Литература

1. Н. Ф. Ильинский, В. В. Михайлов, *Транзисторно-магнитные преобразователи непрерывного сигнала в последовательность импульсов*. Энергия, Москва, 1966. 168 с.
2. В. Г. Макаров, Г. Ф. Кропачев, *Трехфазный магнито-транзисторный инвертор напряжения на групповом трансформаторе*, Вестник Казанского технологического университета, **14**, 16, 91 – 96 (2011).
3. В. С. Моин, В. С. Лаптев, *Стабилизированные транзисторные преобразователи*. Энергия, Москва, 1972. 512 с.
4. В. Г. Макаров, *Выбор трансформатора в трехфазном магнито-транзисторном инверторе*, Вестник Казанского технологического университета. **14**, 17, 50 – 53 (2011).
5. В. Г. Макаров, *Трехфазный магнито-транзисторный инвертор напряжения на трехстержневом трансформаторе*, Вестник Казанского технологического университета. **14**, 20, 155 – 159 (2011).