

УДК 621.316.722.3

**Н.С. Варламов**, аспирант, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
**В.Г. Сугаков**, д.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГУВТ»  
603951, г Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

## ЦИФРОВОЕ ФАЗОСМЕЩАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С ПОВЫШЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ВРЕМЕНИ

*Ключевые слова: фазосмещающее устройство, нестабильность частоты напряжения, полупроводниковый преобразователь, системы управления.*

*В статье приведен обзор различных вариантов систем управления полупроводниковым преобразователем. Рассматривается проблема влияния нестабильности частоты напряжения на работу фазосмещающих устройств. Предлагается цифровое фазосмещающее устройство с коррекцией угла управления в зависимости от частоты напряжения, имеющее повышенное разрешение по времени.*

Полупроводниковые выпрямители нашли широкое применение в системах питания судовых потребителей постоянного тока. Основными областями применения выпрямителей на судах являются системы возбуждения генераторных агрегатов, регулирование скорости вращения электродвигателей постоянного тока, источники бесперебойного питания, системы катодной защиты корпуса судна, навигационные системы.

Основным элементом системы управления (СУ) полупроводникового выпрямителя является фазосмещающее устройство (ФСУ). ФСУ преобразует управляющий сигнал в угол управления, отсчитываемый от момента естественной коммутации. В зависимости от используемого типа фазосмещающего устройства СУ различают (рис. 1): по способу регулирования фаз управляющих импульсов; по характеру изменения фазы управляющего импульса; по форме опорного напряжения; по элементной базе, которая использована для компаратора. [1-4]

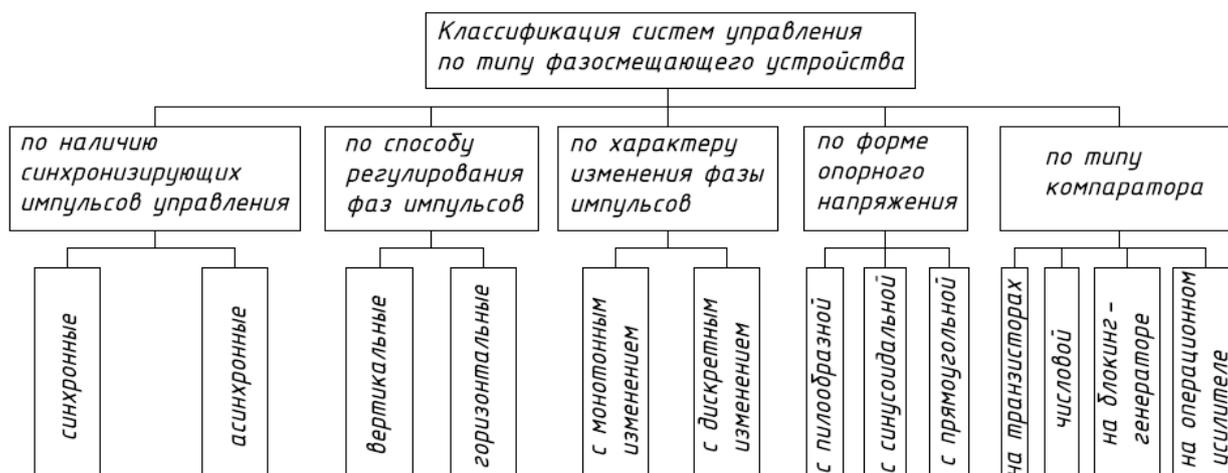


Рис. 1. Классификация систем управления по типу фазосмещающего устройства

В асинхронных ФСУ (рис. 2, а) отсутствует непосредственная синхронизация с питающей сетью. Момент  $t_i$  подачи управляющих импульсов в асинхронных СУ отсчитывается от момента  $t_{i-1}$  подачи предыдущего импульса, поэтому синхронизирующие импульсы не требуется [3].

Отсутствие синхронизации с одной стороны исключает трудности, возникающие при формировании опорных напряжений в условиях наличия искажений кривой питающего напряжения. С другой стороны, работа асинхронных ФСУ возможна лишь при наличии сигнала обратной связи или замкнутого контура управления, который обеспечивает постоянство выходных параметров (напряжения или тока) при изменении режима работы преобразователя и наличии искажений. Наличие обратной связи приводит к возможному возникновению колебаний вырабатываемых углов управления относительно некоторого значения. При незатухающем характере этих колебаний работа ФСУ неустойчива, использование такой ФСУ невозможно. Также ФСУ неустойчива в инверторном режиме.

Широкое применение в СУ нашли ФСУ, в которых вводится информация о текущем значении фазы напряжений сети. Такие ФСУ называются синхронными (рис. 2, б), так как их работа непосредственно синхронизируется с питающей сетью [3]. Синхронные ФСУ могут применяться как в преобразователях с разомкнутой СУ, так и в преобразователях с замкнутым контуром управления.

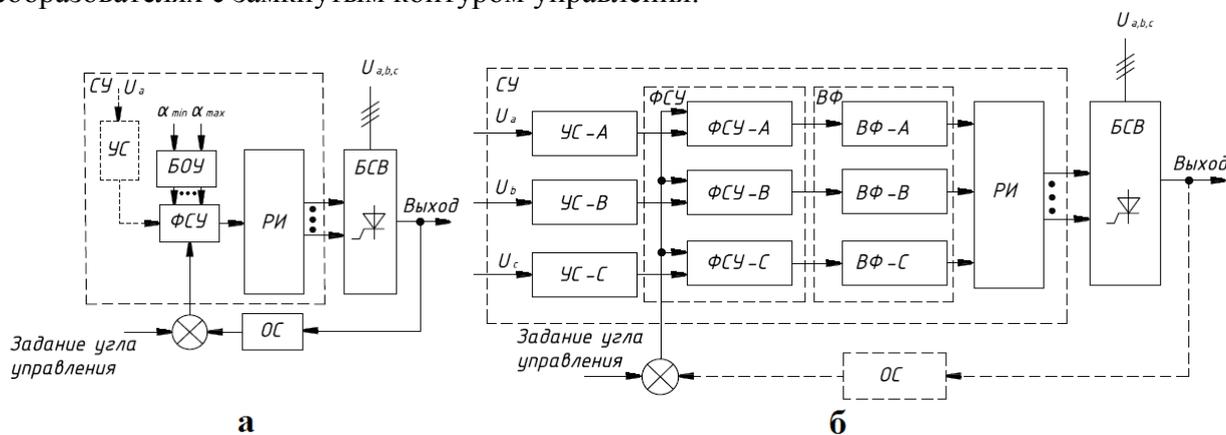


Рис. 2. Блок-схема асинхронной (а) и синхронной (б) системы управления: УС – узел синхронизации; ФСУ – фазосмещающее устройство; ВФ – выходной формирователь; ПИ – распределитель импульсов; БСВ – блок силовых вентилялей; ОС – обратная связь;

В связи с широким распространением микроэлектроники в настоящее время всё больший интерес представляют цифровые устройства управления и регулирования, в том числе цифровые системы управления (ЦСУ) полупроводниковым преобразователем.

К числу основных преимуществ ЦСУ можно отнести высокую надежность цифровых и логических устройств, которые выполняются на основе ИМС широкого применения. ЦСУ не требуют наладки и в них отсутствуют погрешности, вызванные дрейфом и нестабильностью элементов. В отличие от аналоговых СУ, в которых обработка сигналов производится в виде токов и напряжений, в ЦСУ сигналы задаются и обрабатываются в виде числовых кодов (в большинстве случаев двоичных кодов).

Не смотря на структурную схожесть аналоговых и цифровых ФСУ последние имеют существенные особенности. Изменение угла управления  $\alpha$  происходит дискретно, и он может принимать ограниченное число  $2^n$  значений, зависящее от разрядности  $n$  применяемых ИМС. Для уменьшения ступени изменения угла  $\alpha$  увеличивают  $n$ , что сопряжено с ростом аппаратных затрат. Цифровая элементная база не вносит нестабильности при формировании углов управления  $\alpha$ . На точность задания угла управления может оказать влияние нестабильности импульсов генератора, что определяет высокие требования к стабильности частоты следования его импульсов. При изменении

частоты сети в ФСУ происходит ограничение возможности плавного изменения и погрешность задания угла управления.

Данные недостатки были устранены цифровым ФСУ с коррекцией кода управляющего напряжения в зависимости частоты питающего напряжения и заданного угла управления [5]. Однако разработанное устройство имеет низкое разрешение по времени, которая равна периоду питающих напряжений, что приводит к усложнению схемной реализации в многоканальной системе управления.

Данную проблему можно устранить разработкой цифровой ФСУ с повышенным разрешением по времени (рис. 3, а). Фазосмещающее устройство работает следующим образом. Генератор 1 тактовых импульсов формирует на счетных входах блоков 3, 6, 7 импульсы. В момент появления положительной полуволны напряжения  $u_c(t_1, \text{рис. 3, б})$  на адресные входы блока памяти 5 поступает код  $X3$  половины периода отрицательной полуволны напряжения  $u_c$  с выхода измерителя 3.

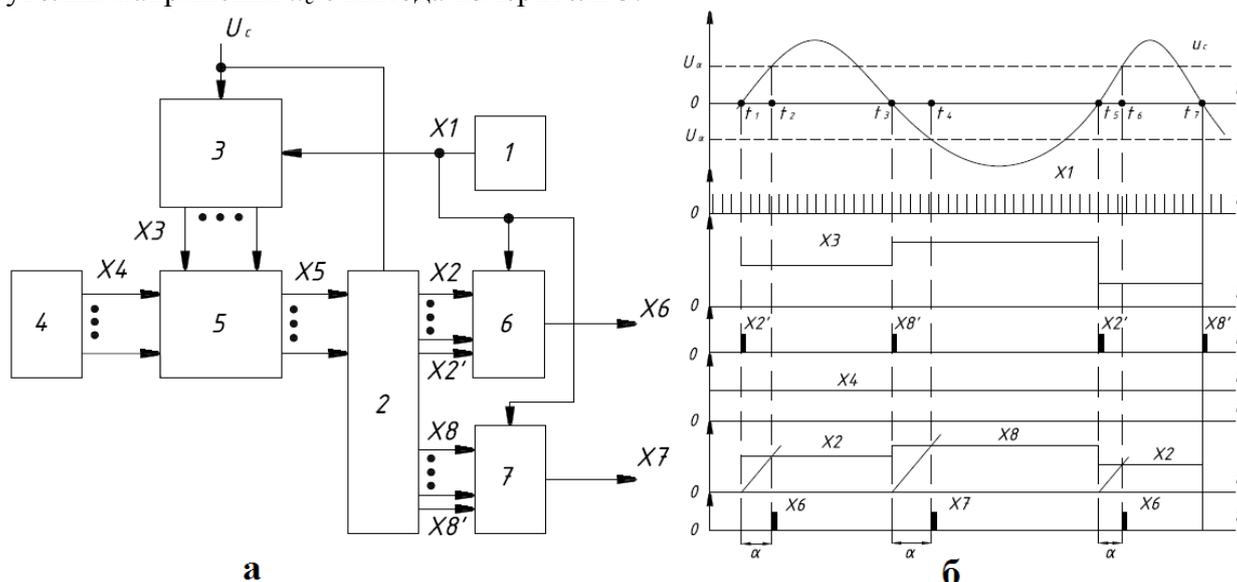


Рис. 3. Цифровое фазосмещающее устройство (а) с повышенным разрешением по времени и эпюры сигналов на элементах устройства (б):

- 1 – генератор импульсов стабильной частоты; 2 – блок управления;
- 3 – цифровой измеритель половины периода; 4 – задающий регистр;
- 5 – блок памяти; 6, 7 – первый и второй формирователь временных интервалов

Код  $X3$  соответствует числу  $X3=f_1/f_c/2$ , где  $f_1$  – частота импульсов генератора 1;  $f_c$  – частота питающего напряжения. На входе второго адреса блока 5 памяти присутствует код  $X4$  угла управления, который подается с выхода задающего регистра 4. На выходе блока памяти 5 формируется код  $X5$  интервала времени, соответствующий заданному углу управления и частоте питающей сети, и соответствует числу  $X5=K_f f_1/f_c/2$ .

Код  $X5$  поступает на адресный вход блока управления 2. В моменты естественной коммутации ( $t_1, t_3, t_5, t_7$ , рис 3, б), когда мгновенное значение питающего напряжения  $u_c$  достигает нуля, блок 2 в зависимости от положительного (отрицательного) полупериода напряжения формирует соответствующий код  $X2(X8)$  и сигналы управления  $X2'(X8')$ .

С приходом сигнала  $X2'$  формирователь 6 начинает отсчет интервала времени  $t_\alpha=t_2-t_1$ , соответствующий необходимому углу управления  $\alpha$ . При достижении кода  $X2$  формирователь 6 выдает импульс  $X6$  в момент времени  $t_2$ , который поступает на выходной формирователь (рис. 2, б).

В момент времени  $t_3$  (рис. 3, б) появляется отрицательная полуволна питающего напряжения  $u_c$ . Очередной код  $X3$  половины периода питающего напряжения поступает на вход первого адреса блока памяти 5. При этом на выходе блока памяти 5 появляется код  $X5$  интервала времени  $t_\alpha=t_4-t_3$ , который через блок управления 2 поступает на формирователь 7. Отсчет интервала  $t_4-t_3$  начнется в момент времени  $t_3$  одновременно с

появлением импульса  $X8'$  с выхода блока 2. В момент времени  $t_4$  (рис. 3, б) соответствующий углу управления  $\alpha$  формирователь 7 выдает импульс  $X7$  на выходной формирователь. При этом значение напряжения  $U_\alpha$  остается неизменным. Далее работа устройства происходит аналогично, описанному выше.

Таким образом предложенное цифровое фазосмещающее устройство обеспечивает повышенное разрешение по времени по сравнению с прототипом и может использоваться в системах управления судовыми полупроводниковыми преобразователями в условиях нестабильности частоты напряжения.

#### **Список литературы:**

- [1]. Иванов А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователями / А.Г. Иванов, Г.А. Белов, А.Г. Сергеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 56-68.
- [2]. Лихошерст В.И. Системы управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии: Учебное пособие / В.И. Лихошерст. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 25-33.
- [3]. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 279-295.
- [4]. Штрумпф Э.П. Судовая электроника и силовая преобразовательная техника: Учебник / Э.П. Штрумпф. – СПб: Судостроение, 1993. – С. 319-335.
- [5]. Пат. 2612055 RU, МПК G01R 25/00 Цифровое фа-зосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов. 2015155112; заявл. 22.12.2015; опубл. 02.03.2017, Бюл. № 7. – 6 с.

#### **DIGITAL PHASE-SHIFTING DEVICE WITH INCREASED TIME RESOLUTION**

Varlamov N.S., Sugakov V. G.

*Keywords: phase-shifting device, instability of voltage frequency, semiconductor converter, control systems.*

*The article gives an overview of variants of semiconductor converter control systems. The problem of influence of voltage frequency instability on operation of phase-shifting devices is considered. A digital phase-shifting device with correction of control angle is proposed depending on the frequency of the voltage having a increased resolution in time.*