

УДК 681.5.01

**Коробко Григорий Иванович**, доцент, к.т.н., доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

**Шилов Максим Петрович**, аспирант, аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

*Аннотация.* Предложена модель системы управления для "классической" трехфазной широтно-импульсной модуляции - ШИМ. На основании классической ШИМ выполнено математическое описание системы управления для автономного инвертора напряжения - АИН. В работе представлено численное исследование системы управления и ее временные диаграммы.

*Ключевые слова:* автономный инвертор напряжения, система управления АИН, широтно-импульсная модуляция, преобразователь частоты.

Форма напряжения на выходе преобразователя частоты- ПЧ зависит от системы управления, обеспечивающая управление силовыми ключами. В связи с этим, для исследования качества работы преобразовательной техники требуется разрабатывать математические модели систем управления. С развитием систем управления современных преобразователей частоты, реализованных по схеме с промежуточным звеном постоянного тока «неуправляемый выпрямитель – сглаживающий LC-фильтр – автономный инвертор напряжения», появляется возможность использовать разные законы широтно-импульсной модуляции.

#### Математическая модель системы управления АИН.

На рисунке (рис.1) представлена модель системы управления АИН, разработанная в программе Matlab [1].

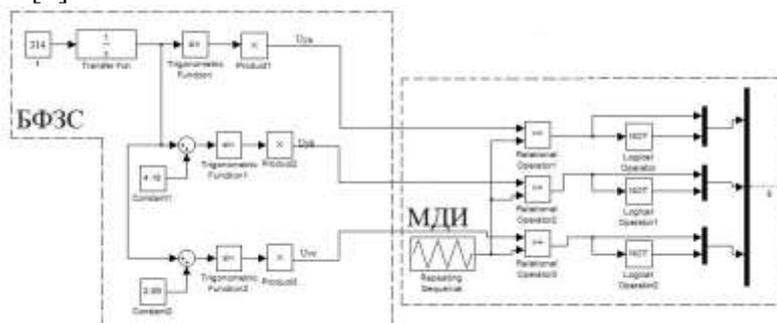


Рис.1 Модель системы управления для "классической" трехфазной ШИМ.

Блок БФЗС - блок формирования задающего сигнала, генерирует трехфазную систему синусоидальных сигналов управления  $U_{YA}$ ,  $U_{YB}$ ,  $U_{YC}$ , которые идут на вход модулятора длительности импульсов - МДИ. Блок МДИ формирует сигналы управления силовыми ключами АИН с частотой заданной блоком Repeating Sequence.

Математическая модель системы управления ПЧ это система уравнений, при решении которой образуются коммутационные функции управления силовыми ключами на основании их алгоритма работы. Сигналы управления каждой фазы для классической ШИМ имеют следующий вид [2]:

$$\begin{cases} U_{ya} = K_m \cdot U_m \cdot \sin(\theta) \\ U_{yb} = K_m \cdot U_m \cdot \sin(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ U_{yc} = K_m \cdot U_m \cdot \sin(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}) \end{cases}$$

где:  $\theta = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{вых}} \cdot t$ ;  $U_m$  - максимально допустимая амплитуда управляющего сигнала, не вызывающая перемодуляцию;  $K_m$  - коэффициент модуляции.

Принцип действия модулятора длительности импульсов описывается условным выражением:

$$\begin{cases} ma(\theta) := if[U_{ya}(\theta) > r(\theta), 1, 0] \\ mb(\theta) := if[U_{yb}(\theta) > r(\theta), 1, 0] \\ mc(\theta) := if[U_{yc}(\theta) > r(\theta), 1, 0] \end{cases}$$

где  $m(t)$  - сигнал на выходе модулятора,  $r(\theta)$  - опорный сигнал, представляющий собой линейно-изменяющуюся функцию.

$$r(\theta) = \frac{2}{\pi} \arctan[\tan(\theta \cdot \frac{A}{2} - \frac{\pi}{2})]$$

где  $A$  - отношение частоты коммутации к выходной частоте.

Алгоритм переключения ключей формируется на основании выражения:

$$\begin{cases} F1 + F4 = 1 \\ F3 + F6 = 1 \\ F5 + F2 = 1 \end{cases}$$

где:  $F$  - ключевая переключающая функция, при  $F=1$  ключ проводит ток, если  $F=0$  ключ запер.

Функции переключения ключей имеют вид:

$$\begin{cases} F1(\theta) = ma(\theta) \\ F4(\theta) = 1 - F1(\theta) \\ F3(\theta) = mb(\theta) \\ F6(\theta) = 1 - F3(\theta) \\ F5(\theta) = mc(\theta) \\ F2(\theta) = 1 - F5(\theta) \end{cases}$$

## Тест программы для численного исследования системы управления и ее временные диаграммы в MathCAD.

Исходные данные:

$$f_{\text{вых}} := 50 \quad \Delta t := 0.01 \quad K_m := 1 \quad U_m := 1 \quad f_{\text{ком}} := 500$$

$$t := 0,0 + \Delta t..10 \quad \frac{A}{\omega} := \frac{f_{\text{ком}}}{f_{\text{вых}}}$$

$$\theta(t) := 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{вых}} \cdot t$$

Сигналы управления каждой фазы:

$$U_{ya}(\theta) := K_m \cdot U_m \cdot \sin(\theta)$$

$$U_{yb}(\theta) := K_m \cdot U_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$$

$$U_{yc}(\theta) := K_m \cdot U_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)$$

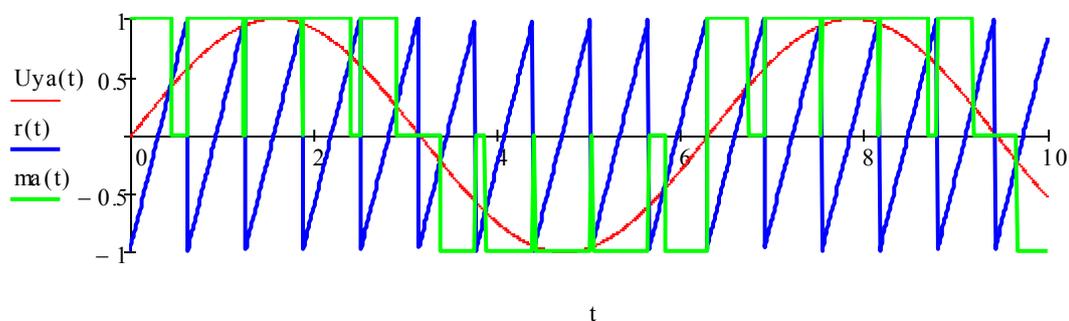
Форма сигнала опорного напряжения описывается выражением:

$$r(\theta) := \frac{2}{\pi} \cdot \text{atan}\left(\tan\left(\theta \cdot \frac{A}{2} - \frac{\pi}{2}\right)\right)$$

Сигналы на выходе модулятора длительности импульсов для двухполярной ШИМ:

$$ma(\theta) := \begin{cases} \text{if } (U_{ya}(\theta) < 0) \\ \quad \begin{cases} -1 \text{ if } U_{ya}(\theta) < r(\theta) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} 1 \text{ if } U_{ya}(\theta) > r(\theta) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad mb(\theta) := \begin{cases} \text{if } (U_{yb}(\theta) < 0) \\ \quad \begin{cases} -1 \text{ if } U_{yb}(\theta) < r(\theta) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} 1 \text{ if } U_{yb}(\theta) > r(\theta) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \end{cases}$$

$$mc(\theta) := \begin{cases} \text{if } (U_{yc}(\theta) < 0) \\ \quad \begin{cases} -1 \text{ if } U_{yc}(\theta) < r(\theta) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \begin{cases} 1 \text{ if } U_{yc}(\theta) > r(\theta) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \end{cases}$$



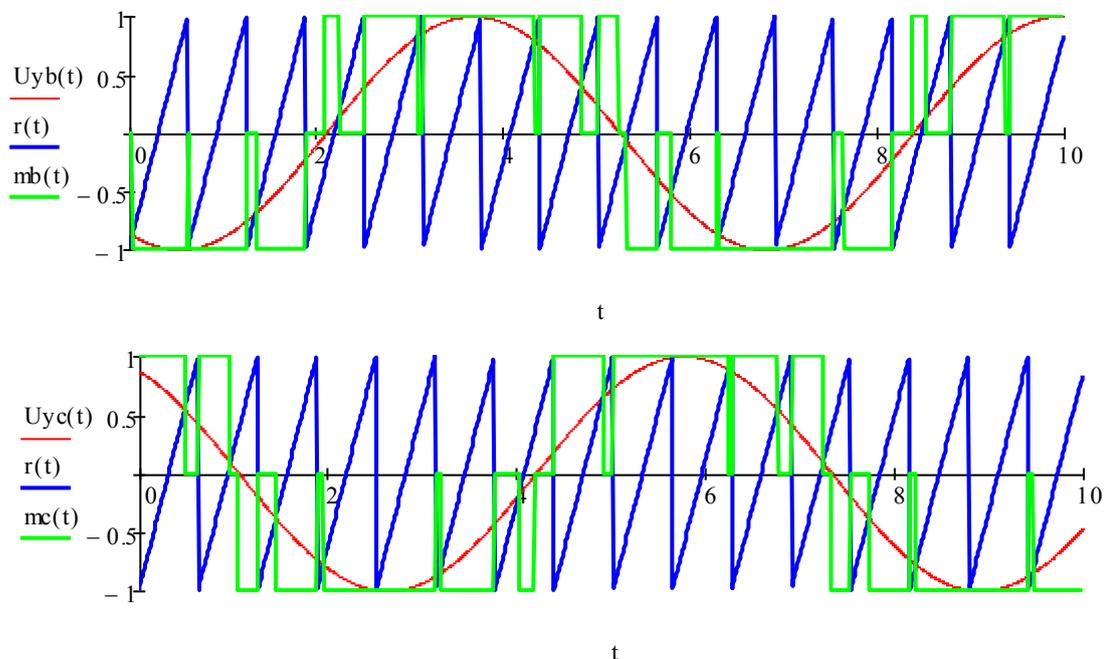


Рис.2. Временные диаграммы: сигналов управления  $U_{ya}(t)$ ,  $U_{yb}(t)$ ,  $U_{yc}(t)$ ; опорного сигнала треугольной формы  $r(t)$ ; сигналов на выходе МДИ  $ma(t)$ ,  $mb(t)$ ,  $mc(t)$ .

#### Выводы:

На основании разработанной в Matlab модели дано математическое описание системы управления АИН с использованием классического закона ШИМ. Выполнено численное исследование управляющих сигналов АИН и получены их временные диаграммы.

#### Список литературы:

- [1] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink. - М.: ДМК Пресс, 2007. - 288с.
- [2] Чаплыгин Е.Е. Спектральное моделирование с широтно-импульсной модуляцией. – издательство МЭИ, 2009.

### MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE DIESEL GENERATOR WITH VARIABLE FREQUENCY OF ROTATION

Gregory I. Korobko, Maksim P. Shilov

*Keywords: autonomous voltage inverter, AIN control system, pulse-width modulation, frequency converter.*

*Annotation. A control system model for the “classical” three-phase pulse-width modulation - PWM is proposed. Based on the classical PWM, a mathematical description of the control system of an autonomous voltage inverter - AIN is performed. The paper presents a numerical study of the control system and its timing diagrams.*