

# Многоуровневый

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

**В статье рассматривается новое решение в области многоуровневого высоковольтного частотно-регулируемого электропривода на базе ячейкового варианта. Силовой трансформатор в данном электроприводе выполнен малогабаритным, что достигается за счет введения промежуточного высокочастотного преобразователя.**

**Александр Иванов,  
д. т. н.**

**Владислав Арзамасов,  
к. т. н.**

В настоящее время в многоуровневом высоковольтном частотно-регулируемом электроприводе (ВЧРП) широкое распространение получила трансформаторная схема ячейкового типа [1]. Данная схема, часто внедряемая в разработках ОАО «ВНИИР», имеет существенный недостаток, а именно большие габариты силового трансформатора.

В патенте на изобретение [2] для уменьшения габаритов силового трансформатора использована известная в преобразовательной технике идея применения высокочастотного трансформатора с промежуточным высокочастотным преобразователем. Принципиальная схема такого электропривода приведена на рис. 1.

Схема выполнена по принципу преобразования напряжения сети 50 Гц в высокочастотное с частотой  $f_1$  и его дальнейшего преобразования с помощью трансформатора (2) и инвертора напряжения (4) в выходное регулируемое напряжение с частотой  $f_2 = (0-50)$  Гц, поступающее на электродвигатель (6), определяя его скорость вращения. Для обеспечения высоких показателей по потребляемой мощности сетевой выпрямитель (8) содержит корректор коэффициента мощности (ККМ).

В случае выполнения инвертора напряжения (4) по схеме одиннадцатипольного ячейкового автономного инвертора напряжения (ЯАИН) обмотки (3) трансформатора (2) выполняются однофазными, и принципиальная схема электропривода имеет вид, показанный на рис. 2.

В схему входят 15 идентичных выпрямительно-инверторных блоков с условным обозначением 0. Данная схема имеет высокий коэффициент мощности и обладает хорошими регулировочными свойствами. Габариты трансформатора (2) определяются произведением числа витков  $w$  на поперечное сечение магнитопровода  $Q$ :

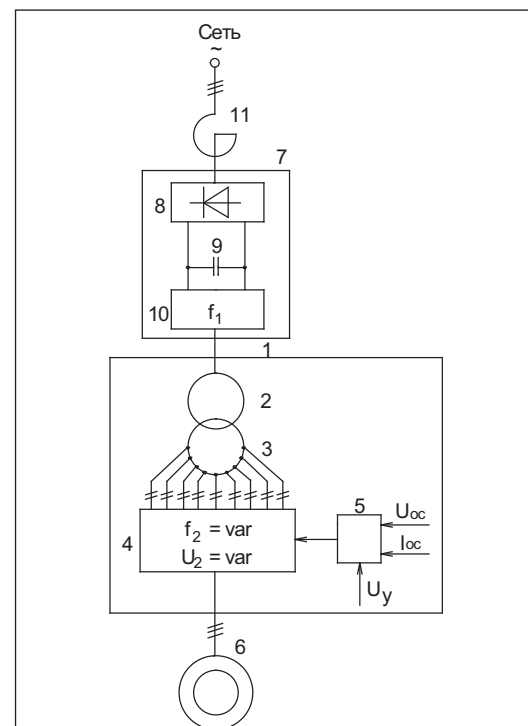
$$wQ = U / (4,44B_m f_1), \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение обмотки,  $f_1$  — высокая частота питания (например,  $f_1 \approx 1$  кГц),  $B_m$  — максимальная индукция магнитопровода.

В этом случае упрощается схема выпрямительно-инверторного блока (рис. 3).

Блок содержит однофазный выпрямитель на диодах (12–15), конденсатор (16) и однофазный инвертор на транзисторах (17–20) с защитными дио-

дами. Инвертор работает в трех режимах: при появлении отпирающих сигналов на входах управления (21 и 23) на выходе блока получаем  $U_0 > 0$ , при появлении отпирающих сигналов на входах управления (22 и 24) на выходе имеем  $U_0 < 0$ , при включении транзисторов (17 и 18 либо 19 и 20)  $U_0 = 0$ . Последовательное включение таких блоков дает возможность в режиме ШИМ-регулирования алгебраически суммировать напряжения в фазах электродвигателя А, В, С



**Рис. 1.** ВЧРП с высокочастотным трансформатором:

1 — энергетический модуль; 2 — высоковольтный трансформатор; 3 — вторичные однофазные обмотки; 4 — ячейковый автономный инвертор напряжения (ЯАИН); 5 — система управления; 6 — электродвигатель; 7 — высоковольтный преобразователь; 8 — сетевой выпрямитель с корректором коэффициента мощности (ККМ); 9 — конденсаторный фильтр; 10 — преобразователь постоянного напряжения в переменное; 11 — трехфазный реактор

(рис. 2). Основным недостатком этой схемы электропривода — наличие высокочастотного преобразователя (7) той же мощности, что и энергетический модуль (1).

В преобразователе (7) целесообразно использовать простую однофазную мостовую

схему на транзисторах IGBT или одно- либо двухоперационных тиристорах с питанием выпрямителя (8) от сетей с линейными напряжениями от 380 В до 6 кВ. Особенный интерес представляет вариант с питанием выпрямителя (8) от сети 380 В.

Рассмотрим расчет элементов приведенных схем, исходя из заданного значения количества уровней  $n$  в кривой линейного напряжения (рис. 4). Число  $n$  определяется максимальным количеством источников питания в контуре линейного напряжения плюс один нулевой уровень.

Например, в ВЧРП с одиннадцатиуровневым ЯАИН имеем  $n = 2 \times 5 + 1 = 11$ , чему соответствует наибольшее значение напряжения, равное:

$$U_{лм} = 2U_d = (n - 1)U_0 = 10U_0,$$

где  $U_0$  — напряжение на конденсаторе (9) одной ячейки (выпрямительно-инверторного блока по рис. 3).

Для амплитудного значения первой гармоники линейного напряжения  $U_{лм}$ , выделяемого из ступенчатой кривой напряжения инвертора, при синусоидальной ШИМ в соответствии с [1] имеем:

$$U_{лм} = \sqrt{2}U_d = 0,866U_{лм}, \quad (2)$$

где  $U_d$  — линейное напряжение электродвигателя.

Тогда для ЯАИН количество ячеек, а также вторичных обмоток в одной фазе трансформатора 2 (рис. 2):

$$Я = 0,5(n - 1), \quad (3)$$

количество ключей в одной фазе инвертора:

$$K = 5Я = 2(n - 1),$$

общее количество ключей в инверторе:

$$K_0 = 3K = 6(n - 1).$$

Напряжение  $U_0$  на входе ячейки с учетом (2) и (3):

$$U_0 = \frac{U_{лм}}{2Я} = \frac{\sqrt{2}U_d}{2 \times 0,866 \times 0,5(n - 1)} = 1,63 \frac{U_d}{n - 1}. \quad (4)$$

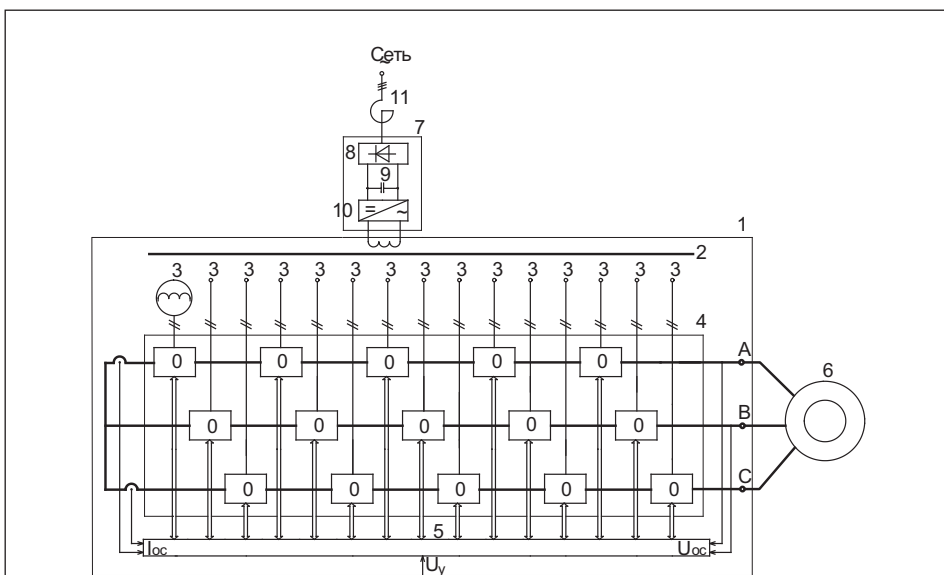
Выражение (4) справедливо для наибольшего значения напряжения на ключе ячейки  $U_{кл} = U_0$ . Значение  $U_{кл}$  следует определять с коэффициентом запаса 1,5.

Таким образом, для ЯАИН с  $n = 11$  и  $U_d = 6$  кВ требуются ключи IGBT с напряжением:

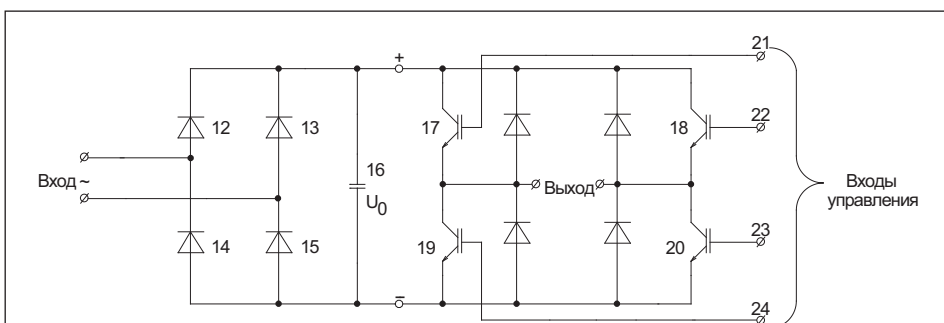
$$U_{кл} = 1,5 \times 1,63 \times 6000 / 10 = 1467 \text{ В.}$$

### Литература

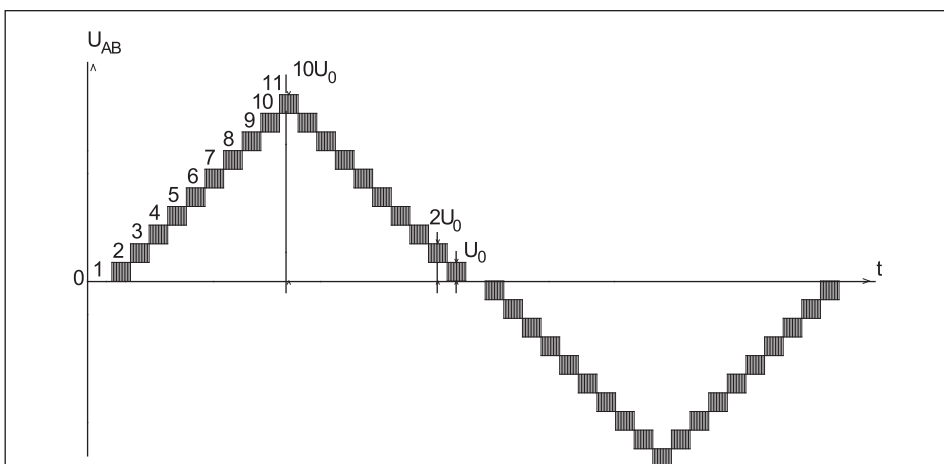
1. Донской Н. В., Иванов А. Г., Матисон В. А., Ушаков И. И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и энергетики // Силовая электроника. 2008. № 1.
2. Патент на изобретение (19)RU (11)2505918 (13)С2. Высоковольтный частотно-регулируемый электропривод / Иванов А. Г. Опубл. 27.01.2014.



**Рис. 2.** ВЧРП с одиннадцатиуровневым ячейковым автономным инвертором напряжения: 0 — выпрямительно-инверторный блок; 1 — энергетический модуль; 2 — высокочастотный трансформатор; 3 — вторичные однофазные обмотки; 4 — ячейковый автономный инвертор напряжения (ЯАИН); 5 — система управления; 6 — электродвигатель; 7 — высокочастотный преобразователь; 8 — сетевой выпрямитель с корректором коэффициента мощности (ККМ); 9 — конденсаторный фильтр; 10 — преобразователь постоянного напряжения в переменное; 11 — трехфазный реактор



**Рис. 3.** Выпрямительно-инверторный блок: 12–15 — диоды; 16 — конденсатор; 17–20 — транзисторно-диодные модули; 21–24 — входы управления



**Рис. 4.** Диаграмма линейного напряжения электродвигателя  $U_{AB} = f(t)$