

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ ТОКА

В.М. Щека

(Харьковский университет Воздушных Сил)

*Описан предложенный метод исследования переходных процессов частотно-управляемого преобразователя.*

*переходной процесс, частотно-управляемый преобразователь*

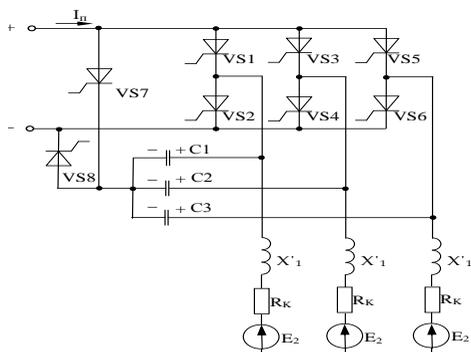
**Постановка проблемы.** Использование преобразователей частоты с автономными инверторами тока для управления асинхронным электроприводом для поворота антенн радиолокационных станций требует компенсировать реактивную мощность нагрузки. Решение этой задачи невозможно без установления зависимости изменения токов и напряжений в переходном процессе. Сложность рассматриваемой задачи определяется многообразием известных схем инверторов и неопределенностями, обусловленными отсутствием ответов на вопросы, связанные с определением условий работоспособности тех или иных схем.

**Анализ литературы.** Схемотехнические принципы создания современных автономных инверторов тока с двухступенчатой коммутацией были заложены в начале 50-х годов прошлого столетия Н.Н. Шедриным, который ввёл в мостовую схему инвертора отсекающие диоды. Схема Н.Н. Шедрина исследовалась в [1 – 2], а принципиально к задачам частотно-регулируемого электропривода в работах [3 – 4]. Одновременно с исследованиями автономного инвертора тока с двухступенчатой коммутацией продолжает развиваться теория автономных инверторов тока с коммутирующими конденсаторами, включёнными на стороне нагрузки. Исследования, проводившиеся в [5 – 6], заложили основу самостоятельного технического направления, связанного с созданием стабилизированных преобразователей частоты [7 – 8]. Из всех схем инверторов, относящихся к группе автономных инверторов тока с отсечёнными от нагрузки коммутирующими конденсаторами, схема автономного инвертора тока с отсекающими диодами отличается максимальной простотой. Существенной особенностью этой схемы является то, что в ней возможно явление дополнительного открывания отсекающих диодов. В литературе подобный анализ отсут-

ствует. В [9] описаны физические условия существования данного явления, однако количественные границы режима дополнительного открывания отсекающих диодов в схеме не определены.

**Цель статьи** заключается в разработке метода исследования электромагнитных переходных процессов частотно-управляемого асинхронного двигателя.

**Основной материал.** Рассмотрим типовую схему частотно-управляемого электропривода на базе автономного инвертора тока, показанную на рис. 1. В этой схеме инвертор тока выполнен на тиристорах VS1...VS6 с общим узлом коммутации на тиристорах VS7, VS8 и конденсаторах C1...C3. Асинхронный электродвигатель представлен эквивалентом с параметрами  $X'_1, R_K, E_2$ .



Цикличность процессов в схеме в установившемся режиме составляет  $\pi/3$ . Рассмотрим один цикл. Включены тиристоры VS1 и VS6, ток  $I_{\pi}$  протекает в фазах А и С инвертора. Конденсаторы предварительно заряжены. В табл. 1 показана последовательность работы тиристорov схемы в течение одного периода выходной частоты.

Рис. 1. Частотно-управляемый электропривод

и VS6, ток  $I_{\pi}$  протекает в фазах А и С инвертора. Конденсаторы предварительно заряжены. В табл. 1 показана последовательность работы тиристорov схемы в течение одного периода выходной частоты.

Таблица 1

Последовательность работы тиристорov схемы

Тиристоры	$\pi/3$											
	$\pi/3 - \gamma$	$\gamma$										
VS1	+										+	+
VS2					+	+	+					
VS3			+	+	+							
VS4									+	+	+	
VS5							+	+	+			
VS6	+	+	+									
VS7		+				+				+		
VS8				+				+				+

Сложность математического описания электромагнитных процессов в данной схеме обусловлена наличием общего коммутирующего узла, из-за которого на интервале коммутации  $\gamma$  в одном тиристоре трёхфазного моста необходимо рассматривать процессы во всех фазах нагрузки, а также тем,

что конденсаторы  $C_1 \dots C_3$  постоянно подключены к нагрузке и их влияние необходимо учитывать при рассмотрении процессов в межкоммутационный период. Преобразуем схему к виду, показанному на рис. 2.

При работе нечётных вентилей в соответствии с табл. 1 ток  $I_{\text{п}}$  протекает в направлении, указанном стрелками, при работе чётных – в противоположном. Используя метод суперпозиции, рассмотрим раздельно процессы обусловленные действием источника тока, связанные с работой вентильной схемы инвертора, и процессы обусловленные действием источника напряжения  $E_2$  (рис. 3).

Для схемы рис. 2 уравнения для равновесия токов и напряжений запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} i_1 + C \cdot \frac{dU_1}{dt} = i_A; & i_2 + C \cdot \frac{dU_2}{dt} = i_B; \\ i_3 + C \cdot \frac{dU_3}{dt} = i_C; & i_A + i_B + i_C = 0; \\ U_1 + i_1 R_K + L'_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = U_2 + i_2 R_K + L'_1 \cdot \frac{di_2}{dt}; \\ U_1 + i_1 R_K + L'_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = U_3 + i_3 R_K + L'_1 \cdot \frac{di_3}{dt}; \end{cases} \quad (1)$$

Решение данной системы уравнений необходимо проводить с использованием ЭВМ. Однако для получения качественной картины целесообразно предварительно выполнить упрощенное аналитическое исследование. Для этого заменим двигатель источником ЭДС  $E_2$ . При этом дифференциальные уравнения превратятся в алгебраические (рис. 4).

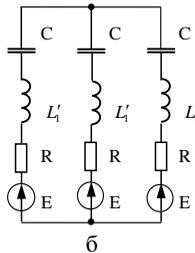
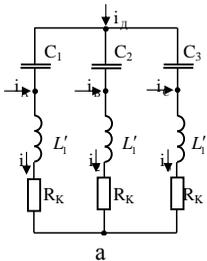


Рис. 3. Расчетные схемы 1 (а) и 2 (б)

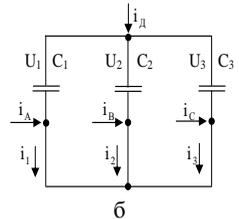
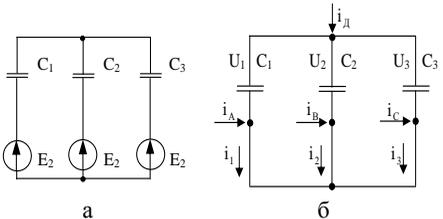


Рис. 4. Упрощенные расчетные схемы

Токи  $i_1, i_2$  и  $i_3$  и напряжения  $U_1, U_2$  и  $U_3$  определяются непосредственно по диаграмме работы вентилей. При  $i_d = 0$  токи через конденса-

торы равны нулю, следовательно:

$$i_1 = i_A; \quad i_2 = i_B; \quad i_3 = i_C. \quad (2)$$

При  $i_d \neq 0$  конденсаторы включены параллельно, токи через конденсаторы равны  $i_d/3$ . Для этого случая справедливы такие равенства:

$$i_1 = i_A + i_d/3; \quad i_2 = i_B + i_d/3; \quad i_3 = i_C + i_d/3; \quad (3)$$

Равенства (3) получены с учетом того, что  $I_n = i_d$ . Ток  $i_1$  – это выходной ток инвертора, обусловленный работой тиристорной схемы;  $U_1$  – это напряжение заряда конденсатора током  $i_d$ .

Из схемы рис. 4, б определяем выходной ток, обусловленный напряжением  $U_{дв} = E_2$ . Учитывая, что для схемы рис. 4, а  $U_{дв} = U_1$ , получаем:

$$I'_1 = a \cdot \frac{U_1}{X_C}, \quad (4)$$

где  $a$  – относительная частота,  $a = \omega/\omega_{ном}$ .

В символической форме записи

$$\dot{I}'_1 = j \cdot \frac{a \cdot \dot{U}_1}{X_C}. \quad (5)$$

Результирующий выходной ток инвертора (ток двигателя) равен:

$$\dot{I}_{1дв} = \dot{I}_1 + \dot{I}'_1. \quad (6)$$

Результирующее напряжение на конденсаторе  $U_C$  определяется суммированием напряжений  $U_1$  (напряжение заряда конденсатора, обусловленное током  $i_d$ ) и напряжения  $U_{дв}$ .

Предварительно найдём  $U_{дв}$  как падение напряжения на сопротивлении двигателя  $Z_{дв}$  при протекании результирующего тока двигателя  $\dot{I}_{1дв} = \dot{I}_1$ :

$$\dot{U}_{дв} = Z_{дв} \left( \dot{I}_1 - j \frac{\dot{U}_{дв}}{X_C} \cdot a \right), \quad (7)$$

т.е.

$$\dot{U}_{дв} = \dot{I}_1 \cdot \frac{Z_{дв}}{1 - j \frac{Z_{дв}}{X_C} \cdot a}. \quad (8)$$

Последняя формула интересна тем, что с её помощью можно найти  $U_{дв}$  по  $I_1$ , не прибегая к вычислению  $I'_1$ .

Ещё раз подчеркнем, что подобное представление может использоваться как расчётное упрощение для получения качественной картины на определённом этапе анализа, однако оно не отражает физическую сущность процессов в асинхронном двигателе, связанную с наличием индуктивности короткого замыкания двигателя  $L'_1$ .

Наличие индуктивности  $L'_1$  в сочетании с коммутирующими конденсаторами приводит к тому, что переходный процесс изменения тока во время коммутации протекает по колебательному закону. Для уточнения качественных результатов преобразуем систему дифференциальных уравнений (1) к виду, удобному для численного интегрирования на ЭВМ:

$$\begin{cases} \frac{dU_1}{dt} = \frac{-i_A + i_1}{C}; & \frac{dU_2}{dt} = \frac{-i_B + i_2}{C}; & \frac{dU_3}{dt} = \frac{-i_C - i_1 - i_2}{C}; \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{U_2 - U_1 + R_K \cdot i_2 - R_K \cdot i_1}{L'_1} + \frac{di_2}{dt}; \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{U_3 - U_1 - 2 \cdot R_K \cdot i_1 - R_K \cdot i_2}{L'_1} - 2 \cdot \frac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (9)$$

В системе (9) токи  $i_A, i_B, i_C$  принимают три значения:  $I_{\Pi}$ , если включены тиристоры VS1, VS3, VS5;  $-I_{\Pi}$ , если включены тиристоры VS2, VS4, VS6; 0, если не проводят соответственно ни один из тиристоров.

Расчёт на ЭВМ целесообразно проводить на одном периоде выходной частоты, в течение 12-ти этапов, соответствующих согласно табл. 1 различным значениям совокупности  $i_A, i_B$  и  $i_C$ .

Соответствующий расчет был выполнен с помощью математического пакета MATCAD при выходной частоте 20 Гц, длительности интервала  $\gamma = \pi/18$  и следующих параметрах инвертора:

$$K_1 = \frac{C}{L'_1} = 10; 25; 50; \quad K_2 = \frac{R_K}{L'_1} = 0,35; \quad L'_1 = 0,5.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Как видно из приведённых графиков наличие свободной составляющей тока вызывает существенное искажение кривой выходного тока, что вызывает увеличение потерь в двигателе. Искажается также кривая напряжения на конденсаторе, что существенно увеличивает потери в конденсаторе.

**Выводы.** 1. Для подавления свободных колебаний необходимо параллельно нагрузке включать так называемый «коммутационный» выпрямитель. В

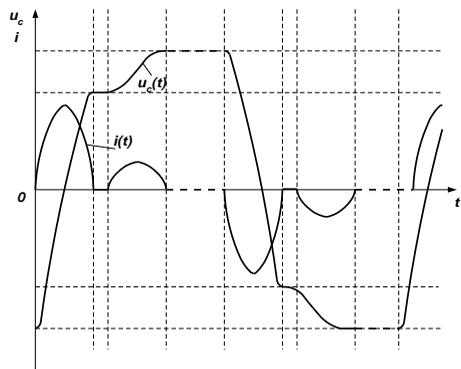


Рис. 5. Диаграммы переходных процессов

ряде случаев параллельно нагрузке целесообразно включать дополнительные фильтровые конденсаторы.

2. Подобные решения, обеспечивая подавления высокочастотных колебаний, делают схему не только сложнее исходного варианта, но и сложнее схемы с отсечёнными от нагрузки конденсаторами. Поскольку схемная простота является решающим доводом при определении базовой схемы инвертора для преобразователя частоты с улучшенными техническими показателями, использование инвертора с отсечёнными от нагрузки коммутирующими конденсаторами представляется более предпочтительным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Умаров Б. У. Расчет трехфазного инвертора с отсекающими вентилями при работе на асинхронный двигатель методом гармонических составляющих // Изв. вузов МВ ССО СССР. Энергетика. – 1976. – № 7. – С. 47 – 53.
2. Умаров Б. У. Анализ установившегося режима инвертора с отсекающими вентилями при работе на асинхронный двигатель // Электричество. – 1977. – № 8. – С. 54 – 57.
3. Хамудханов М.З., Умаров Б.У. Свойства и характеристики автономного инвертора с добавочными вентилями, питающего регулируемый асинхронный электропривод // Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук. – 1957. – № 1 – С. 3 – 11.
4. Хамудханов М.З. Частотное управление асинхронным электроприводом при помощи автономного инвертора. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1959. – 335 с.
5. Мосткова Г.П., Ковалев Ф.И. Мощный автономный инвертор с параллельно-последовательными конденсаторами // Преобразовательные устройства в электроэнергетике. – М.: Наука, 1964. – С. 61 – 74.
6. Мощные статические преобразователи электрической энергии / Ф.И.Ковалев, Г.П. Мосткова, А.Ф.Свиридов, В.Г. Толстов, В.А.Чванов // Судовая электротехника и связь. – 1964. – № 24. – С. 3 – 32.
7. Наталкин А.В. Преобразователь частоты для регулирования асинхронного двигателя на основе инвертора тока с искусственной коммутацией // Изв. вузов. Электротехника. – 1966. – № 10. – С. 1120 – 1128.
8. Толстов Ю.Г., Наталкин А.В. Тиристорные преобразователи частоты для мощного электропривода // Электротехника. – 1972. – № 12. – С. 3 – 18.
9. Семенов И.Б. Исследование автономного механического инвертора с раздельными вентилями и с асинхронным двигателем в качестве нагрузки // Известия АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. – 1961. – № 2. – С. 49 – 55.

Поступила 24.06.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор Б.Т. Кононов,  
Харьковский университет Воздушных Сил.