

УДК 681.3: 621.214

А. В. Бородин

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПЧ с ШИМ-КАБЕЛЬ-АД

Частотное регулирование, пуск и торможение относятся к наиболее экономичным методам управления короткозамкнутыми асинхронными двигателями. В настоящее время частотное управление считается целесообразным при питании двигателей

неческие резонансы в килогерцовом диапазоне, которые ведут к увеличению шума и вибрации.

Колебания момента и акустический шум могут быть уменьшены за счет увеличения частоты коммутации вентиляй. Применение в ПЧ современных

влять их надежную защиту по управляющему входу [4]. Управление IGBT осуществляется от специальных микросхем-драйверов со своими источниками питания и защиты [3], [2].

На рис. 2 показана осцил-

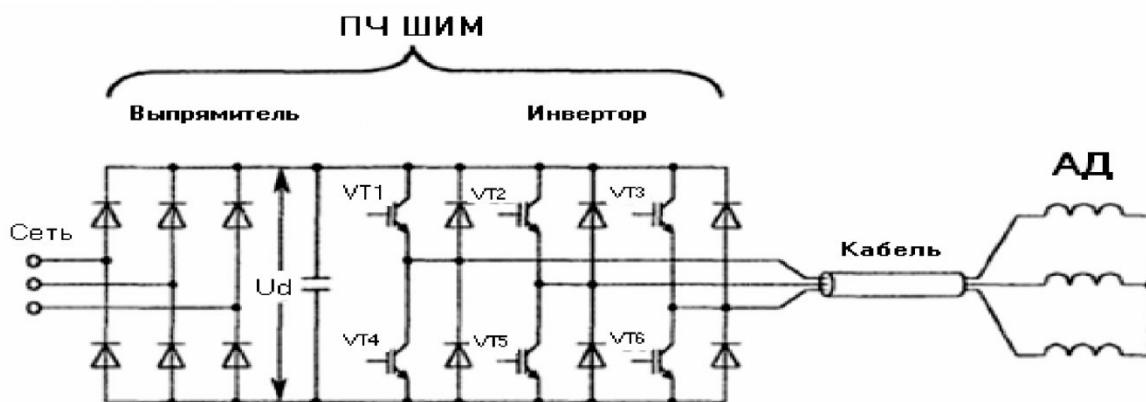


Рис. 1. Принципиальная схема включения трехфазного ПЧ с ШИМ и АД (упрощенная)

от статических преобразователей частоты [1], [2].

Для регулирования АД средней и малой мощности чаще других используется ПЧ с ШИМ [1]. Такие ПЧ (рис. 1) обеспечивают электроприводам повышенную управляемость, быстродействие благодаря возможности получения практически любых требуемых соотношений частоты и амплитуды напряжения питания.

Наряду с преимуществами ПЧ с ШИМ обладают рядом недостатков [3]: напряжение на выходе ПЧ с ШИМ существенно отличается от синусоидального, получаемого при питании АД от обычной сети переменного тока частотой 50 Гц. Это обстоятельство требует учета наличия высших гармоник в кривой напряжения, подводимого от ПЧ к АД. К последствиям несинусоидального питания следует отнести колебания электромагнитной силы АД, увеличение вихревых токов и меха-

IGBT-транзисторов [3] позволяет увеличить частоту коммутации до 20... 50 кГц.

Модули с IGBT-транзисторами имеют время включения сотни наносекунд - единицы микросекунд, допускают многократные перегрузки по току продолжительностью до 10 мкс, что позволяет осуществ-

лограмма напряжения на зажимах АД, подключенного к ПЧ ШИМ, на котором видны импульсы напряжения, сопровождающие включение и отключение транзисторов.

Импульсы или перенапряжения возникают из-за крутых фронтов изменения напряжения на выходе ПЧ ШИМ, вызываю-

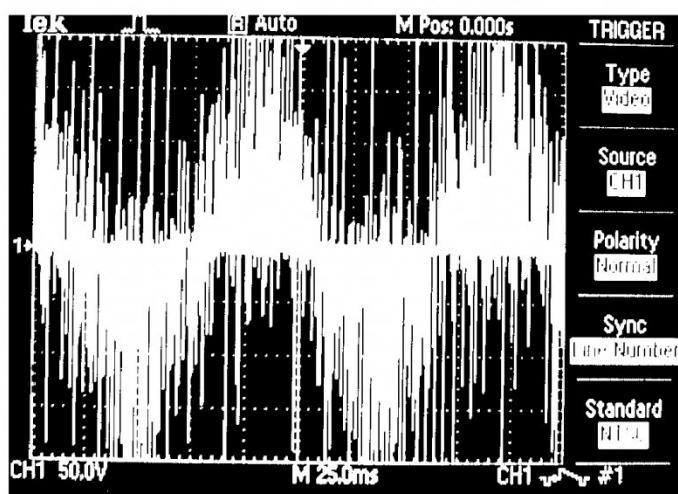


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на выходе ПЧ-ШИМ

ших процессы распространения электромагнитных волн вокруг кабеля от ПЧ до АД и около статорной обмотки АД.

Бегущие электромагнитные волны приводят к неравномерному распределению напряжения по длине обмотки АД. Наибольшая электрическая нагрузка приходится на межвитковую изоляцию первых витков, которые электрически расположены ближе всего к месту соединения кабеля и обмотки [5].

Определение параметров цепей, в которых действуют перенапряжения, производится с помощью эквивалентной частоты $f_{\text{экв}}$ импульсов, определенной через длительность фронта импульса t_ϕ :

$$f_{\text{экв}} \approx \frac{1}{2t_\phi} \quad (1)$$

В современных ПЧ ШИМ на выходе формируются трапецидальные импульсы напряжения, длительность фронта которых изменяется в пределах $t_\phi \approx (100 - 500)10^{-9}$ с. Этим значениям соответствуют $f_{\text{экв}} \approx (1 - 5) \cdot 10^6$ Гц.

При указанных значениях $f_{\text{экв}}$ в кабеле и обмотках АД происходят быстропротекающие волновые электромагнитные процессы [1, 5, 6]. Скорости движения волн электромагнитной энергии, соответствующие $f_{\text{экв}}$, значительно (в $10^4 - 10^3$ раз) превышают скорости преобразования энергии при обычных номинальных частотах (50 Гц) или частотах регулирования $10 \dots 10^3$ Гц.

Отсюда для исследования и расчета этих процессов приходится применять теорию длинных линий передачи или цепей

с распределенными параметрами [6].

Считается [5], что волна электромагнитного поля распространяется вдоль обмотки по пазовой изоляции. Это поле одновременно проникает как в медь обмотки, так и в сталь сердечника и корпуса.

Глубина проникновения поля тем меньше, чем выше скорость изменения напряжения на фронте волны или чем больше эквивалентная частота.

Известна [7], что простейшая модель кабеля, включающая два уравнения в частных производных, которая соответствует линии с последовательно включенными активным сопротивлением r_0 и индуктивностью L_0 и параллельно включенными емкостью C_0 и проводимостью G_0 (рис. 3). Обычно считается, что параметры такой линии не зависят от времени t и координаты x и одинаковы для прямого и обратного проводов.

Уравнения, описывающие процессы, происходящие в длинной линии, запишем в виде [7]:

$$\begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= r_0 i + L_0 \frac{di}{dt}; \\ -\frac{di}{dx} &= G_0 U + C_0 \frac{dU}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

Если к жилам кабеля прикладывается гармонически изменяющееся напряжение, например синусоидальное, для решения может использоваться символьический метод [8] и эквивалентная схема замещения, показанная на рис. 3.

Система уравнений (2), при сделанных допущениях приобретает вид [6], [8]:

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} = Z_o \dot{Y}_o \dot{U}(x); \quad (3)$$

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} = \dot{Z}_o \dot{Y}_o \dot{I}(x).$$

Система уравнений, описывающая обмотку АД как длинную линию передачи, имеет вид [6]:

$$\left. \begin{aligned} d(i_r + i_L + i_K) &= -C \frac{dU}{dt} - GU, \\ i_r + i_K &= -K \frac{d^2 U}{dx dt} - \frac{1}{r_{CT}} \frac{dU}{dx}, \\ \frac{dU}{dx} &= -L \frac{di_L}{dt} - r_M i_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где r_m - эквивалентное сопротивление витков катушки, учитывающее потери в меди; r_{ct} - сопротивление, учитывающее потери в стали; L эквивалентная индуктивность катушки; K - продольная (межвитковая) емкость; C - поперечная емкость и G - поперечная проводимость.

Для решения уравнения (4) надо задаться начальными и граничными условиями (схемой соединения элементов и их пространственным распределением, рассчитать значения параметров на единицу длины и их изменение по длине обмотки, знать форму, амплитуду и длительность импульса).

Получить решение уравнения (4) при учете скорости нарастания, длительности импульса и того факта, что следующий импульс подается в то время, когда колебательный процесс от предыдущего импульса еще не завершен, пока не удается.

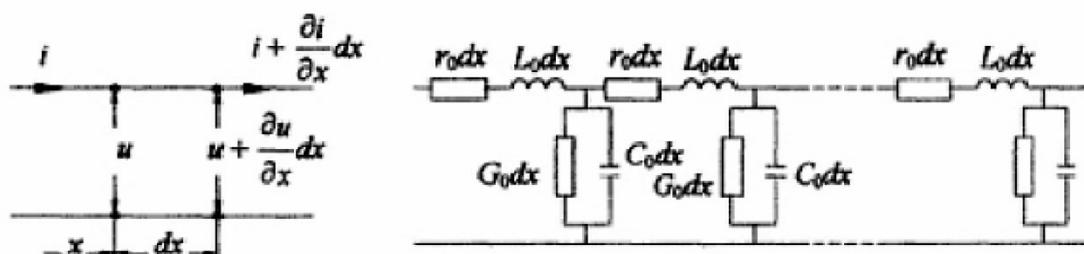


Рис. 3. Участок и схема замещения кабеля как электрической длинной линии

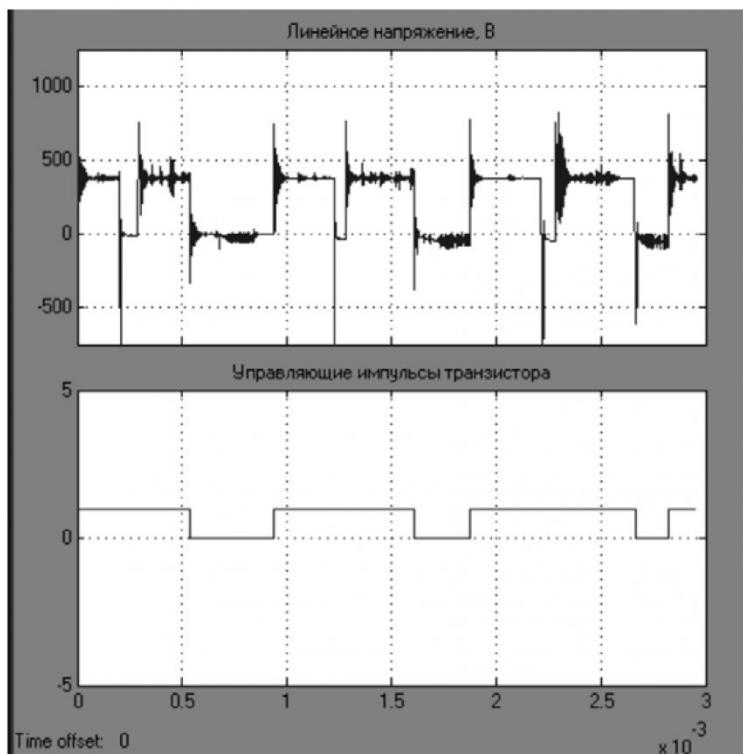


Рис. 4. Линейное напряжение на зажимах двигателя и управляющие импульсы одного из транзисторов контролируемой фазы

На рисунке 4, приведены результаты моделирования в пакете Matlab системы инвертор с ШИМ-кабель-АД.

Моделирование показывает, что максимальные перенапря-

жения возникают на зажимах двигателя, а, следовательно, и на ближайших витках обмотки АД. Значения ударного напряжения зависят от t_ϕ импульсов, частоты их следования, значе-

ний и соотношений L , C и r_{cm} и других факторов.

Используя систему Matlab, можно рассматривать различные варианты выполнения обмоток в АД, выбрать оптимальные режимы функционирования ПЧ ШИМ на основе технологий электромеханотроники [2].

Частоту следования и длительность импульсов ПЧ ШИМ, например, следует согласовать с параметрами АД: амплитуды перенапряжений значительно увеличиваются, если очередной импульс напряжения подводится к обмотке при продолжающемся волновом процессе от предыдущего импульса.

Из приведенного анализа и результатов моделирования можно сделать вывод, что способы расчета индуктивных и активных сопротивлений требуют уточнения при исследовании и расчете волновых процессов и перенапряжений, возникающих при работе системы ПЧ-кабель-АД. А также необходимо учитывать то, что кабель и двигатель следует рассматривать, как цепи с распределенными параметрами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В. Я., Зверев К. Н. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ-преобразователя // Электротехника. 1999. № 9. С. 56-59.
2. Коськин Ю. П. Введение в электромеханотронику. СПб.: Энергоатомиздат. СПб. отд-ние, 1991.
3. Зверев К. Н. Исследование волновых процессов в частотно-регулируемом асинхронном двигателе: Автореф. дис...канд. техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 2000.;
4. Компания Семикрон <http://www.semikron.com>;
5. Каганов З. Г. Волновые напряжения в электрических машинах. М.: Энергия, 1970.
6. Каганов З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. М.: Энерготомиздат, 1990.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. – М.: Гардарики, 2001.
8. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники: В 2 т. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981.

□ Автор статьи:

Бородин
Андрей Викторович
- асс.каф. электропривода и автома-
тизации