

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

*Е.П. Сенькив, А.Д. Брагин, Г.И. Однокопылов*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

Асинхронный электропривод с повышенной живучестью, содержащий трехфазный асинхронный электропривод, каждая фаза которого через датчик тока подключена к соответствующему преобразователю частоты, микроконтроллер, подключенный к датчику частоты вращения, к датчику скорости, к трем датчикам тока и к преобразователям частоты, на валу асинхронного двигателя установлен датчик скорости, отличающийся тем, что электропривод выполнен на основе  $n$ -секционного электрического двигателя, каждая секция которого установлена на одном валу и включает в себя  $n$ -трехфазных асинхронных электрических двигателей, фазы которых через соответствующие датчики тока подключены к соответствующим преобразовательным ячейкам трехфазных преобразователей частоты, выходы всех датчиков тока и входы всех преобразовательных ячеек подключены к микроконтроллеру, к которому подключён датчик скорости, установленный на валу всех асинхронных двигателей.

При рассмотрении аварийного двухфазного режима работы двигателя с эллиптическим полем в воздушном зазоре его можно разложить на поля прямой и обратной последовательности, используя метод симметричных составляющих. Обобщенная модель электрической машины учитывает лишь поле прямой последовательности. Существует два варианта представления модели асинхронного двигателя, работающего с эллиптическим полем – модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и двумя роторами, модель обобщенной электрической машины с двумя статорами и одним ротором [2]. Первая модель – более проста в описании, однако дает не точные результаты моделирования переходных процессов, вторая же модель имеет более сложные выражения для результирующего электромагнитного момента, но дает более точные результаты расчетов в динамических режимах работы.

В связи с вышеперечисленными особенностями математического описания обобщенной электрической машины с эллиптическим полем для формирования математической модели выбрана модель с двумя статорами и двумя роторами.

При исследовании несимметричных машин с учетом пространственных гармоник или при наличии несинусоидальных питающих напряжений приводить машину к двухфазной машине неправомерно, так как поля в зазоре двухфазной и многофазной машин в этих условиях отличаются друг от друга [2]. Так как асинхронный двигатель при обрыве одной из фаз питающей сети является несимметричным – в качестве математической модели может

быть принята обобщенная электрическая машина в трехфазной системе координат.

При составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов асинхронных машин использованы общепринятые допущения и ограничения, связанные с понятием «идеализированная машина»: машина не насыщена, потерями в стали пренебрегаем; фазные обмотки симметричны и сдвинуты на угол 120 электрических градусов; намагничивающие силы обмоток и магнитные поля распределены синусоидально, вдоль окружности воздушного зазора; воздушный зазор равномерен; ротор симметричен. Реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной, оси фаз которой сдвинуты на фазный угол, а намагничивающая сила ее равна намагничивающей силе реальной обмотки.

В качестве основы были взяты уравнения модели асинхронного двигателя в заторможенной системе координат [3].

При определении напряжений, подаваемых на обмотки машин, отвечающих за поля прямой и обратной последовательности, учитывалось, что при постоянном питающем напряжении  $U_1=U_A=U_B=U_C=\text{const}$  напряжения прямой и обратной последовательности зависят от скольжения [2].

Для случая развязанных фаз, уравнения полей прямой последовательности:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_{1A}}{dt} &= U_{1A} - R_s \cdot i_{1A}; \\ \frac{d\Psi_{1B}}{dt} &= U_{1B} - R_s \cdot i_{1B}; \\ \frac{d\Psi_{1C}}{dt} &= U_{1C} - R_s \cdot i_{1C}; \\ \frac{d\Psi_{1a}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1a} - \frac{(\Psi_{1b} - \Psi_{1c}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}}; \\ \frac{d\Psi_{1b}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1b} - \frac{(\Psi_{1c} - \Psi_{1a}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}}; \\ \frac{d\Psi_{1c}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1c} - \frac{(\Psi_{1a} - \Psi_{1b}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};\end{aligned}$$

Для случая связанных фаз:

$$\begin{aligned}\frac{d\Psi_{1AB}}{dt} &= U_{1AB} - R_s \cdot i_{1AB}; \\ \frac{d\Psi_{1BC}}{dt} &= U_{1BC} - R_s \cdot i_{1BC}; \\ \frac{d\Psi_{1CA}}{dt} &= U_{1CA} - R_s \cdot i_{1CA}; \\ \frac{d\Psi_{1ab}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1ab} - \frac{(\Psi_{1bc} - \Psi_{1ca}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}}; \\ \frac{d\Psi_{1bc}}{dt} &= -R_s \cdot i_{1bc} - \frac{(\Psi_{1ca} - \Psi_{1ab}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};\end{aligned}$$

$$\frac{d\Psi_{1ca}}{dt} = -R_s \cdot i_{1ca} - \frac{(\Psi_{1ab} - \Psi_{1bc}) \cdot p \cdot \omega}{\sqrt{3}};$$

Выражения для полей обратной последовательности будут иметь аналогичный вид. Электромагнитные моменты  $M_1$  и  $M_2$ , создаваемые полями прямой и обратной последовательности, определяются по следующим выражениям:

$$M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1} i_{c1} + i_{B1} i_{a1} + i_{C1} i_{b1}) - (i_{A1} i_{b1} + i_{B1} i_{c1} + i_{C1} i_{a1})]$$

$$M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2} i_{c2} + i_{B2} i_{a2} + i_{C2} i_{b2}) - (i_{A2} i_{b2} + i_{B2} i_{c2} + i_{C2} i_{a2})]$$

Уравнение движения электропривода, учитывающее моменты прямой и обратной последовательности:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_1 - M_2 - M_c);$$

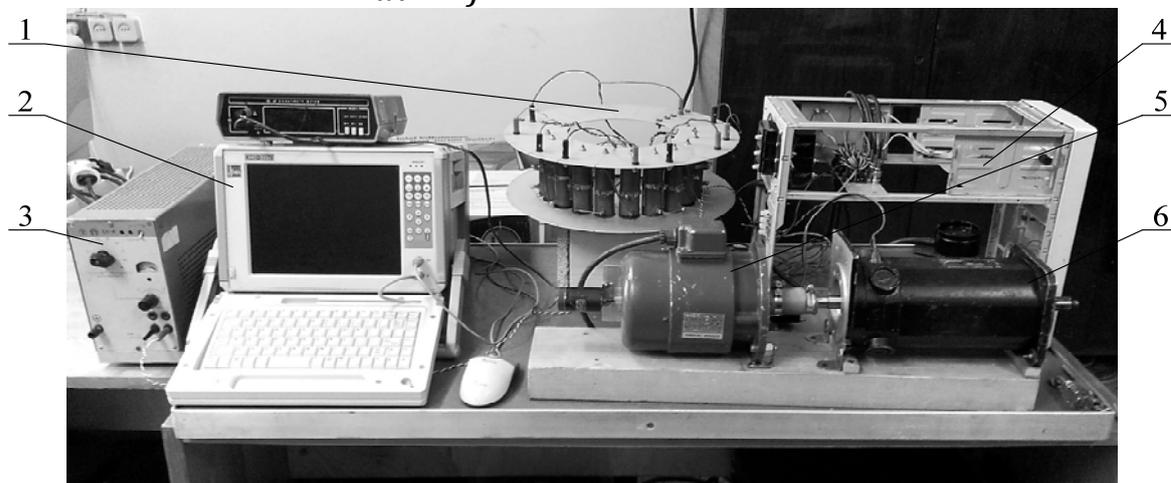


Рис. 1. Автоматизированный испытательный стенд для исследования аварийных и неполнофазных режимов работы асинхронного двигателя:  
 1 – резистивная нагрузка; 2 – компьютерная измерительная система МПС-300;  
 3 – источник питания; 4 – блок формирования аварийных режимов работы;  
 5 – асинхронный двигатель АИР63А2;  
 6 – машина постоянного тока серии 1ПИ 12.11

Расчет модели проводился в среде *Simulink MatLab*. Адекватность предложенной математической модели была проверена путем сравнения расчетных и экспериментальных данных полученных при помощи автоматизированного испытательного стенда рис. 1[4]. Результаты сравнения переходных процессов, рассчитанных на модели и полученных экспериментально, приведены на рис. 2–3.

Разработанные математическая и имитационная модели позволяют исследовать асинхронный электродвигатель и управляемый электропривод на его основе в аварийных и неполнофазных режимах работы с учетом влияния полей прямой и обратной последовательности, а также в аварийном

двухфазном режиме работы с алгоритмическим поддержанием кругового вращающегося поля, когда поле обратной последовательности в воздушном зазоре отсутствует.

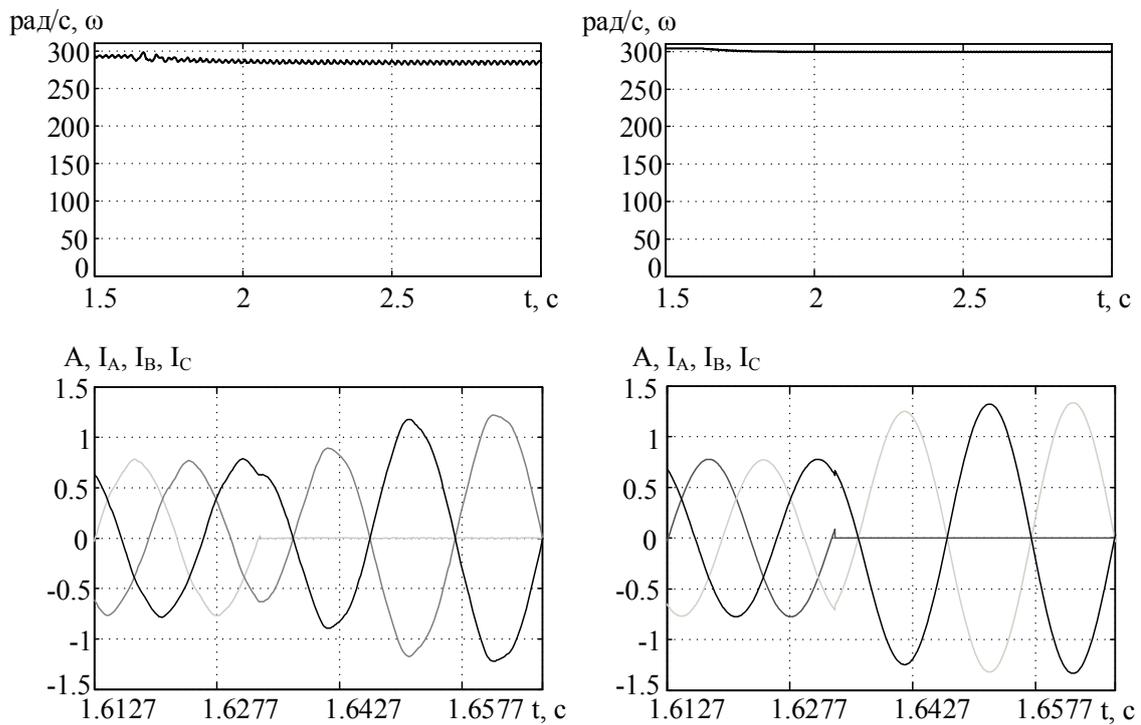


Рис. 2. Переходные процессы в аварийном двухфазном режиме работы для связанных фаз

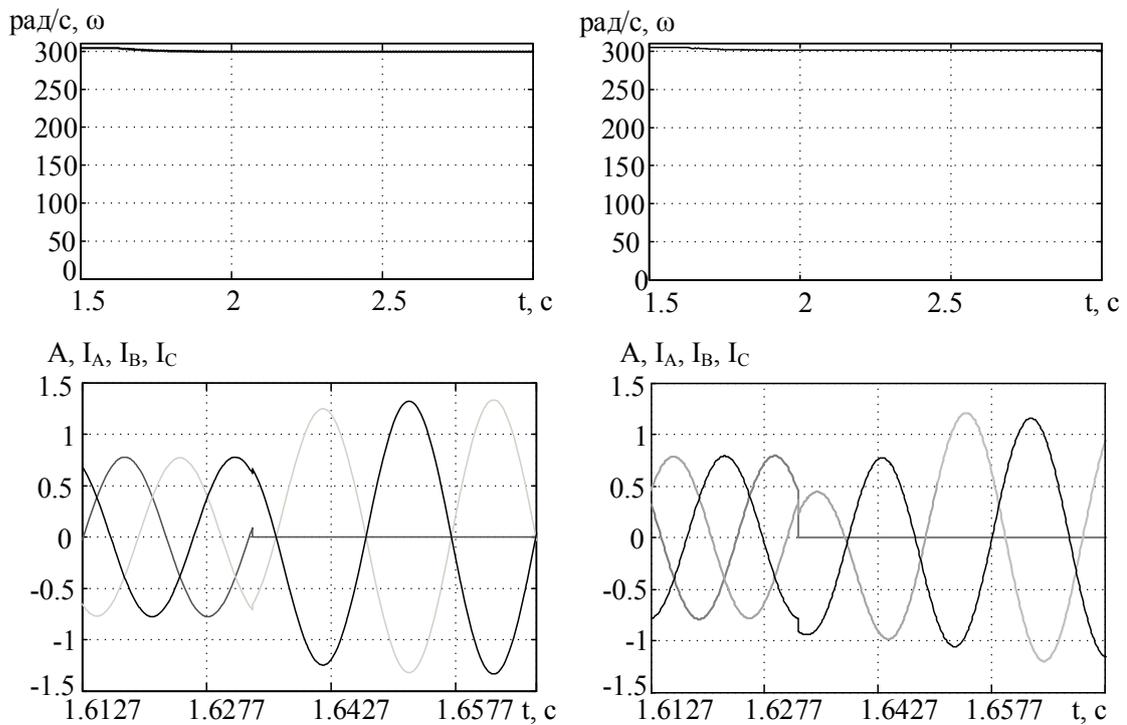


Рис. 3. Переходные процессы в аварийном двухфазном режиме работы для развязанных фаз

## **Выводы**

1. Разработана математическая модель асинхронного двигателя для исследования неполнофазного, аварийного режима работы с учетом воздействия полей прямой и обратной последовательности для схем подключения двигателя со связанными и развязанными фазами.

2. Амплитуда тока статора двигателя в эксперименте для подключения по схеме со связанными фазами при переходе из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим больше в 1.1 раза по сравнению со случаем подключения по схеме с развязанными фазами. Падение частоты вращения относительно трехфазного режима составило 1,5% для двигателя с подключением по схеме со связанными фазами и 0.8% для двигателя с подключением по схеме с развязанными фазами.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.

2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 652 с.

4. Патент РФ на ПМ № 136184(RU), G01R 31/02. Установка для исследований аварийных режимов работы вентильного двигателя/ Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев, А.Д. Брагин. – №2013138092; Заявл.14.08.2013; Оpubл.27.12.2013 Бюл. № 36.

## **АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ «90°/180°» ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА**

*М. М. Едгулов*

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полус», Томский политехнический университет, Россия, Томск

Существует ряд алгоритмов управления бесконтактными двигателями переменного тока – «120°/240°», «180°/180°», с широтно-импульсной модуляцией «нижних» ключей и без нее.[1] В данной статье рассматривается метод управления «90°/180°», как более энергоэффективный по сравнению с другими, но требующий дополнительной системы датчиков положения ротора. Для вентильного электродвигателя с числом фаз  $m=3$  и числом полюсов на фазу  $2p=2$ , электрический угол сдвига между соседними фазами равен механическому и численно равен 120°. На рис. 1 приведена условная схема