

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-83-52:62-573

В.Г. Каширских, С.С. Переверзев

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ»

В последнее время для управляемого пуска асинхронных электродвигателей короткозамкнутым ротором (АД), во многих отраслях промышленности начинают широко внедряться устройства плавного пуска (УПП), представляющие, в своей основе, тиристорный преобразователь напряжения (ТПН) с фазовым или квазичастотным управлением.

Для исследования качества переходных процессов при управляемом пуске асинхронного электропривода с применением УПП для конкретной промышленной установки необходимо иметь математическую модель системы «ТПН-АД», с достаточной степенью точности описывающую электромагнитные переходные процессы в АД, вызванные переключением тиристорных коммутационных элементов (ТКЭ). Это обусловлено тем, что управляемый пуск во многом определяет эффективность электропривода в целом и влияет на надежность и срок службы машин и установок.

Основной особенностью при математическом описании работы ТПН является скачкообразное изменение проводящего состояния ТКЭ в течение положительного полупериода приложенного напряжения, из-за чего трёхфазная цепь статора становится несимметричной, а режим работы цепи при этом характеризуется нестационарностью.

Анализ режима статорной цепи возможен поочерёдным решением дифференциальных уравнений, описывающих её мгновенные состояния, которые, в свою очередь, зависят от сочетания проводящих состояний ТКЭ в фазах электродвигателя. В этом случае математическую модель системы «ТПН-АД» удобно представить в виде системы дифференциальных уравнений обобщенной электрической машины [1], записанных в неподвижной относительно статора системе координат α, β в виде:

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sA} - R_s i_A - e_{rA});$$

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sB} - R_s i_B - e_{rB});$$

$$\begin{aligned} \frac{di_C}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sC} - R_s i_C - e_{rC}); \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= R_r \frac{L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p\omega \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= R_r \frac{L_m}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p\omega \psi_{r\alpha}; \\ M_{\vartheta_M} &= \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \\ i_{s\alpha} &= i_A; \quad i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_B - i_C); \\ \frac{d\psi_{rA}}{dt} &= \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt}; \\ \frac{d\psi_{rB}}{dt} &= -\frac{1}{2} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\psi_{r\beta}}{dt}; \\ \frac{d\psi_{rC}}{dt} &= -\frac{1}{2} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\psi_{r\beta}}{dt}; \\ e_{rA} &= \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rA}}{dt}; \quad e_{rB} = \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rB}}{dt}; \\ e_{rC} &= \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rC}}{dt}, \end{aligned}$$

где $i_A, i_B, i_C, u_{sA}, u_{sB}, u_{sC}$ - фазные токи и

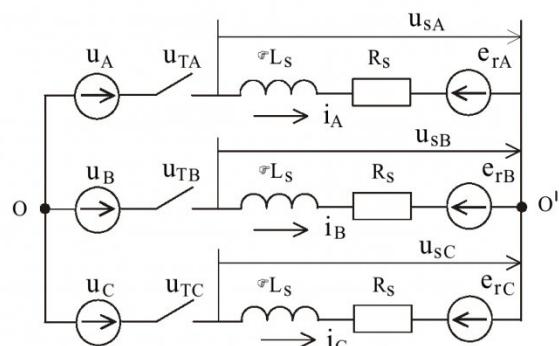


Рис. 1. Схема замещения статорных цепей системы «ТПН-АД»

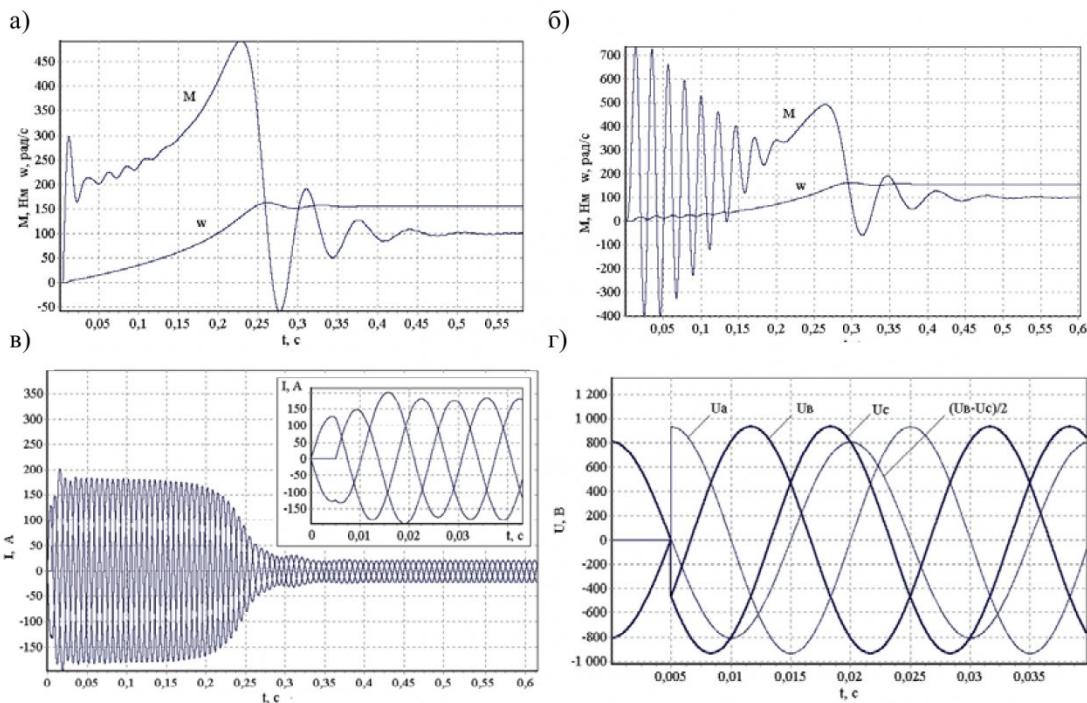


Рис. 2. Результаты моделирования пуска электродвигателя: а – электромагнитный момент и частота вращения электродвигателя при управляемом пуске; б – электромагнитный момент и частота вращения электродвигателя при прямом пуске; в – фазные токи; г – фазные напряжения

напряжения статора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; L_s , L_r – индуктивности статора и ротора; R_s , R_r – активные сопротивления статора и ротора; σ – коэффициент рассеяния; ψ_{ra} , ψ_{rb} – составляющие потокосцепления об-

мотки ротора по осям α , β ; i_{sa} , i_{sb} – составляющие токов обмоток статора по осям α , β ; p – число пар полюсов; ω , $M_{\text{эм}}$ – частота вращения ротора и электромагнитный момент.

На основании представленной математической модели АД и схемы замещения (рис. 1) опи-

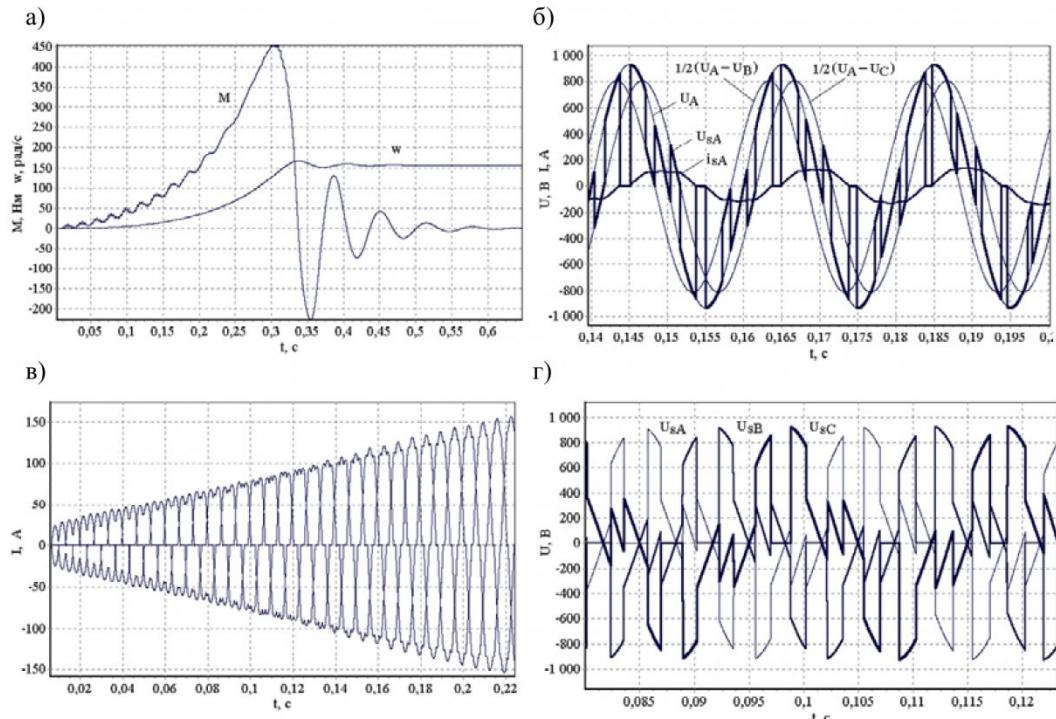


Рис. 3. Моделирование процесса пуска АД ограничением приложенного напряжения: а – электромагнитный момент и частота вращения электродвигателя при управляемом пуске; б – формирование напряжения и тока фазы A; в – фазные токи; г – фазные напряжения

Таблица 1

Состояние ТКЭ	Уравнения электрического равновесия статорной цепи	Фазные напряжения (U_{sA} , U_{sB} , U_{sC})
TKЭ открыты во всех фазах	$\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_A - R_s i_A - e_{rA});$ $\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_B - R_s i_B - e_{rB});$ $\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_C - R_s i_C - e_{rC});$ $i_A + i_B + i_C = 0.$	Фазные напряжения на зажимах АД равны фазным напряжениям источника питания: $u_{sA} = u_A;$ $u_{sB} = u_B;$ $u_{sC} = u_C.$
TKЭ закрыты во всех фазах	При закрытых тиристорах во всех фазах, токи в них равны нулю: $i_A = i_B = i_C = 0.$	Фазные напряжения на зажимах электродвигателя равны фазным ЭДС, наводимым потокосцеплением ротора: $u_{sA} = e_{rA};$ $u_{sB} = e_{rB};$ $u_{sC} = e_{rC}.$
TKЭ открыты в фазах А и В	$\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{1}{2} (u_A - e_{rA} + e_{rB} - u_B) - R_s i_A \right];$ $\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{1}{2} (u_B - e_{rB} + e_{rA} - u_A) - R_s i_B \right];$ $\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sC} - e_{rC});$ $i_A = -i_B, i_C = 0;$	Напряжение фазы С равно ЭДС, наводимой потокосцеплением ротора: $u_{sC} = e_{rC}.$ Напряжения фаз А и В : $u_{sA} = \frac{1}{2} (u_A - u_B - e_{rC});$ $u_{sB} = \frac{1}{2} (u_B - u_A - e_{rC}).$
TKЭ открыты в фазах А и С	$\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{1}{2} (u_A - e_{rA} + e_{rC} - u_C) - R_s i_A \right];$ $\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{1}{2} (u_C - e_{rC} + e_{rA} - u_A) - R_s i_C \right];$ $\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sB} - e_{rB});$ $i_A = -i_C, i_B = 0;$	Напряжение фазы В равно ЭДС, наводимой потокосцеплением ротора: $u_{sB} = e_{rB}.$ Напряжения фаз А и С определяются выражениями: $u_{sA} = \frac{1}{2} (u_A - u_C - e_{rB});$ $u_{sC} = \frac{1}{2} (u_C - u_A - e_{rB}).$
TKЭ открыты в фазах С и В	$\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{1}{2} (u_C - e_{rC} + e_{rB} - u_B) - R_s i_C \right];$ $\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[\frac{1}{2} (u_B - e_{rB} + e_{rA} - u_A) - R_s i_B \right];$ $\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sA} - e_{rA});$ $i_C = -i_B, i_A = 0;$	Напряжение фазы А равно ЭДС, наводимой потокосцеплением ротора: $u_{sA} = e_{rA}.$ Напряжения фаз В и С определяются выражениями: $u_{sB} = \frac{1}{2} (u_B - u_C - e_{rA});$ $u_{sC} = \frac{1}{2} (u_C - u_B - e_{rA}).$

шем возможные состояния статорной цепи с использованием правил Кирхгофа.

В произвольный момент времени система может находиться в одном из пяти состояний: 1) открыты ТКЭ во всех фазах; 2) ТКЭ во всех фазах закрыты; 3) открыты ТКЭ в фазах А и В; 4) от-

крыты ТКЭ в фазах А и С; 5) открыты ТКЭ в фазах В и С. При этом на каждом этапе цепь статора описывается своей системой дифференциальных уравнений (табл. 1).

При переключении тиристоров цепь статора описывается одной из приведенных систем диф-

ференциальных уравнений. Для применения этой математической модели в целях исследования переходных процессов при управляемом пуске или получении регулировочных характеристик системы «ТРН-АД», модель должна быть дополнена условиями переключения ТКЭ (условиями существования тока в цепи с ТКЭ).

При фазовом управлении тиристор открыт, если текущий электрический угол θ , отсчитываемый от начала положительной полуволны фазного напряжения, больше угла управления α , или же выполняется условие $i \cdot u < 0$ при угле $\theta < \alpha$, когда ток поддерживается за счет накопленной энергии в индуктивностях цепи.

При квазичастотном управлении питание статорной цепи осуществляется системой выпрямленных токов переменной полярности, частота изменения которых определяется количеством положительных и отрицательных полупериодов напряжения, пропускаемых ТКЭ. Открытое состояние тиристора определяется условиями:

$$(\theta \geq \alpha) \text{ and } (u \cdot F > 0);$$

$$(i \cdot u < 0) \text{ and } (u \cdot F < 0),$$

где *and* – оператор логического «И»; *F* - дополнительная функция переключения:

$$F = \begin{cases} 1 \cdot \text{sign}(u_v) \text{ and } (i = 0); \\ 1 \cdot \text{sign}(i) \text{ and } (i \neq 0). \end{cases}$$

В приведенном выражении переменная u_v определяет эквивалентное напряжение требуемой частоты.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования пуска электродвигателя ДКВ45 мощностью 45 кВт созданием ненулевых начальных электромагнитных условий [2] на основе описанной выше модели.

Из результатов моделирования с использова-

нием разработанной модели, можно сделать вывод, что пуск АД с созданием ненулевых начальных электромагнитных условий приводит практически к полному подавлению знакопеременной составляющей переходного момента, обусловленной подключением статорной обмотки АД к сети, не вызывая снижения быстродействия привода.

На рис. 3 представлены результаты моделирования управляемого пуска электродвигателя ДКВ45 ограничением скорости нарастания приложенного напряжения путем изменения в процессе пуска угла управления по линейному закону, с синхронизацией по напряжению.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что этот вид управляемого пуска приводит к снижению как знакопеременной, так и вынужденной составляющей электромагнитного момента, что приводит к снижению быстродействия привода. Однако, при этом достигается плавное нарастание момента, что благоприятно оказывается на ресурсе активных механических частей промышленной установки.

Таким образом, разработанная математическая модель системы «ТРН-АД» позволяет исследовать переходные процессы в асинхронном электроприводе при различных законах управления пуском АД с учетом влияния коммутации ТКЭ на электромагнитные процессы в АД, а также проводить анализ эффективности пуска асинхронного электропривода конкретной промышленной установки.

Результаты моделирования с использованием представленной модели подтверждены экспериментальными испытаниями тиристорного устройства для управляемого пуска АД, разработанного на кафедре электропривода и автоматизации КузГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. -М.: Высш. шк., 2001. -327 с.
2. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. - М.: Энергоиздат, 1981. - 184 с.

□ Авторы статьи:

Каширских

Вениамин Георгиевич

- канд. техн. наук, зав. каф. электропривода и автоматизации

Переверзев

Сергей Сергеевич

- аспирант каф. электропривода и автоматизации

УДК 622.012:621.316.9

А.Г. Захарова, Г.А. Казунина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

В последние годы на шахтах Кузбасса существенно возросла производительность забойных машин и увеличилась мощность их электродвига-

телей. Это обстоятельство выдвинуло новые задачи перед системами электроснабжения очистных забоев (СЭС ОЗ) по обеспечению их экономично-