

Розглянута реалізація режиму гальмування проти включенням асинхронного двигуна з фазним ротором з модифікованою системою імпульсного регулювання. Показана доцільність введення додаткового опору в коло випрямленого струму ротора асинхронного двигуна з фазним ротором, що дозволяє забезпечити обмеження наростання фазних струмів статора та ротора, а також скачка моменту асинхронного двигуна з фазним ротором у період реверсу

Ключові слова: регулювання, двигун, імпульс, енергоефективність, гальмування, рекуперация, ковзання

Рассмотрена реализация режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования. Показана целесообразность введения добавочного сопротивления в цепь выпрямленного тока ротора асинхронного двигателя с фазным ротором, позволяющего обеспечить ограничение нарастания фазных токов статора и ротора, а также скачка момента асинхронного двигателя с фазным ротором в период реверса

Ключевые слова: регулирование, двигатель, импульс, энергоэффективность, торможение, рекуперация, скольжение

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМА ТОРМОЖЕНИЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

М. И. Коцур

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail:kotsur_m@ukr.net

И. М. Коцур

Кандидат технических наук, доцент**

А. В. Близняков

Кандидат технических наук, доцент*

*Кафедра электрических и электронных аппаратов***

Кафедра электрических машин*

***Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

1. Введение

На сегодняшний день существует большое количество электротехнических комплексов кранового оборудования на основе современных систем регулирования электроприводами на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР). Такими являются системы асинхронно-вентильного каскада (АВК) [1, 2] и системы импульсного регулирования (ИР) [3]. При этом остается часть электроприводов, не прошедших модернизацию с устаревшими контакторными, резисторными схемами регулирования на базе АДФР, которые не соответствуют современным требованиям в части энергоэффективности и не могут осуществить плавный пуск и торможение привода в процессе выполнения производственного цикла. Однако в отличие от АВК и ИР, способны быстро и эффективно производить торможение, что очень важно в аварийных режимах. Для этих целей в приводах наибольшее распространение получил режим торможения противовключением, обладающий высокой надежностью. Недостатком данного режима является то, что работа АДФР близка к аварийному, а сам АДФР в этот момент потребляют больше энергии. При этом в момент реверса электродвижущая сила (э.д.с.) ротора возрастает в два раза, а ток в этот момент может быть вдвое больше тока короткого замыкания.

Поэтому актуальной задачей является синтез контакторной схемы, реализующий режим торможения

противовключением с современной системой регулирования, который позволит повысить эффективность и энергетические показатели системы электропривода в мгновенном и аварийном режимах торможения.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Быстрое развитие бесконтактных систем регулирования АДФР привело к снижению капитальных затрат на продукцию и повышению энергоэффективности производственных механизмов [4, 5]. Однако существуют такие производственные циклы, для которых необходимо выполнение мгновенных или аварийных торможений АДФР. Здесь для всех систем АВК и ИР выполнение таких операций приводит к существенному повышению потреблению электроэнергии, а иногда и к скорейшему выходу из строя электропривода. Сравнительный анализ показал, что наиболее энергоэффективной является модифицированная система ИР [6]. Отличительной особенностью данной модифицированной системы ИР является наличие импульсного регулятора в цепи выпрямленного тока ротора, представленного в виде преобразователя повышающего типа и инвертора, который в отличие от АВК, работает с постоянным минимальным углом инвертирования [7]. За счет этого обеспечивается высокий коэффи-

циент мощности и коэффициент полезного действия в широком диапазоне скольжения АДФР [8, 9]. Поэтому именно данной системе регулирования стоит уделить внимание при ее синтезе с контактной схемой, реализующей режим торможения противовключением, так как она позволит повысить энергоэффективность всего электропривода в момент торможения за счет рекуперации энергии скольжения ротора в сеть.

3. Цель и задачи исследования

Цель данной работы заключается в повышении эффективности работы и энергетических показателей АДФР с модифицированной системой ИР в режиме торможения противовключением.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка математической модели исследования модифицированной системой ИР АДФР с реализацией торможения противовключением.
2. Исключить эффект нарастания токов статора и ротора в системе ИР АДФР до величин их короткого замыкания, что свойственно для режима торможения противовключением.
3. Повысить энергоэффективность электропривода на базе АДФР, работающего в режиме торможения противовключением.

4. Исследование режима торможения противовключением в системе импульсного регулирования АДФР

На рис. 1. приведена модифицированная система ИР АДФР с реализацией режима торможения противовключением. Пуск АДФР до заданной скорости выполняется замыканием контактов К1-К3 и К_р с последующим изменением скважности силового ключа К (IGBT транзистора) $\gamma=0...1$ [7-9].

Работа ведомого сетью инвертора с постоянным углом $\beta = \text{const} = 10^\circ$ обеспечивает рекуперацию энергии скольжения с коэффициентом мощности равным

$$\cos \phi = \cos \beta \left(-\frac{\gamma}{2} \right), \tag{1}$$

где γ – угол коммутации.

Реверс для данной системы ИР АДФР выполняется размыканием контактов К1-К3 и К_р и одновременным замыканием контактов К4, К5. Размыкание ключа К_р обеспечивает введение добавочного резистора R_р, позволяющего согласовать э.д.с. ротора АДФР и э.д.с. ведомого сетью инвертора, а следовательно ограничить нарастание выпрямленного тока ротора в момент реверса.

Для проведения исследования реализации режима торможения противовключением АДФР с модифицированной системой ИР в среде MatLAB, с помощью структурных средств Simulink разработана имитационная модель электромагнитных процессов асинхронного привода. Электромагнитная модель АДФР представлена в виде известных дифференциальных уравнений с общепринятыми допущениями [10]. Блок цепи выпрямленного тока ротора представлен в виде системы дифференциальных уравнений в зависимости от состояния силового

ключа (IGBT транзистора) согласно приведенной схеме замещения цепи выпрямленного тока ротора с ИР (рис. 2).

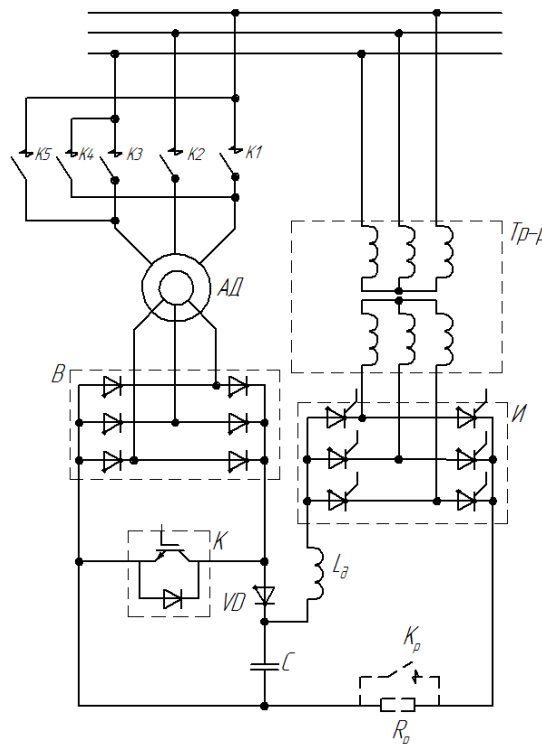


Рис. 1. Модифицированная система ИР с реализацией режима торможения противовключением

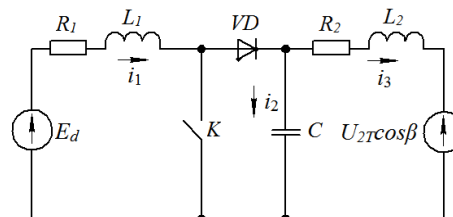


Рис. 2. Схема замещения цепи выпрямленного тока ротора для модифицированной системы ИР

$$R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} = 1,35 \cdot E_{рн} \cdot s, \tag{2}$$

где

$$R_1 = 2 \cdot (r'_s + r_m) \cdot s + 2 \cdot r_r + (3 \cdot x_d \cdot s / \pi), \tag{3}$$

$$L_1 = 2 \cdot L_d, \tag{4}$$

$$L_d = L_s + L_r, \tag{5}$$

здесь E_{рн} – номинальное значение ЭДС ротора АД; s – скольжение ротора АД; r_r – активное сопротивление фазы ротора АД; L_r – полная индуктивность фазы ротора; r'_s – активное сопротивление фазы статора, приведенное к обмотке ротора АД; L'_s – полная индуктивность фазы статора, приведенная к ротору АД; r_m – сопротивление магнитного контура АДФР; 3 · x_d · s / π – эквивалентное сопротивление, вызванное коммутацией вентилей выпрямителя.

В случае, когда силовой ключ разомкнут

$$\left. \begin{aligned} R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt &= E_{d0} \cdot s, \\ R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + R_2 \cdot i_3 &= E_{d0} \cdot s + U_{2T} \cdot \cos \beta, \\ i_1 &= i_2 + i_3, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$R_2 = r_{др} + 2 \cdot r_T + (3 \cdot x_d \cdot s / \pi), \quad (7)$$

$$L_2 = L_{др} + 2 \cdot L_T, \quad (8)$$

здесь U_{2T} – напряжение вторичной обмотки согласующего трансформатора; β – фиксированный угол инвертирования; $r_{др}$ – активное сопротивление дросселя инвертора; $L_{др}$ – индуктивность дросселя инвертора; r_T, x_T – соответственно активное и индуктивное эквивалентные сопротивления фазы согласующего трансформатора; $3 \cdot x_d \cdot s / \pi$ – эквивалентное сопротивление, вызванное коммутацией вентиля инвертора.

Величину выпрямленного тока ротора в момент реверса можно определить из выражения:

$$I_{dr} = \frac{1,35 \cdot E_{PH} \cdot (1+s) - 1,35 \cdot U_{2T} \cdot \cos \beta}{R_3 + R_p}, \quad (9)$$

Здесь

$$R_3 = 2 \cdot (R_s + R_m) \cdot s + 2 \cdot R_r + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_1 + L_2) + R_{др} + R_T + \frac{3 \cdot x_d \cdot s}{\pi} + \frac{3 \cdot x_T \cdot s}{\pi}. \quad (10)$$

Учитывая выражения (9), (10) можно определить необходимую величину добавочного сопротивления в момент реверса

$$R_p = \frac{1,35 \cdot E_{PH} \cdot (1+s) - 1,35 \cdot U_{2T} \cdot \cos \beta - I_{dr} \cdot R_3}{I_{dr}}. \quad (11)$$

В качестве объекта исследования использовался АДФР типа МТФ-111-6, номинальной мощностью $P_n=3,5$ кВт ($P_B=0,4$), $M_n=39$ Н·м и параметрами преобразователя $C=200$ мкФ, $L_1=15$ мГн, $L_2=35$ мГн.

На рис. 3 приведены осциллограммы фазных токов статора (I_s) и ротора (I_r), электромагнитного момента (M) и скорости вращения ротора (n) АДФР в момент реверса с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) добавочного резистора.

Здесь начальный момент времени реверса реализуется при $t=0,3$ с. и продолжается до полной остановки АДФР. До начала реверса АДФР работает на искусственной характеристике при скольжении $s=0,2$. Анализ зависимостей показал, что за счет согласования э.д.с. ротора АДФР и э.д.с. ведомого сетью инвертора позволит исключить нарастания токов статора и ротора АДФР до величины его короткого замыкания. При этом величины фазных токов сохраняются на уровне номинальных значений, что в свою очередь обеспечивает исключение броска момента АДФР в момент реверса.

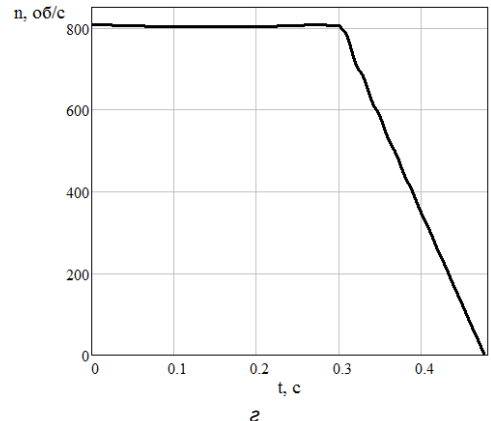
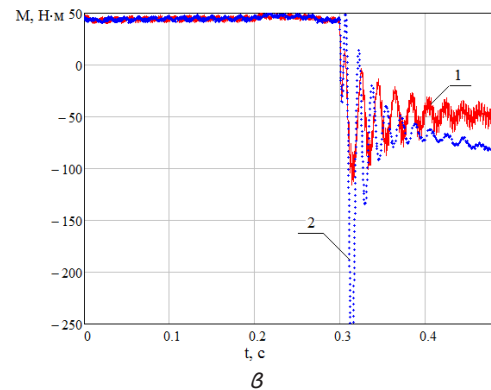
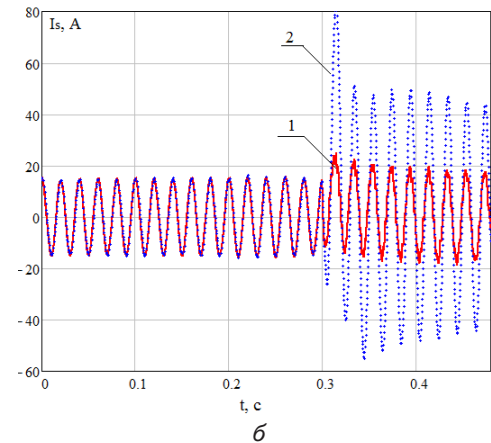
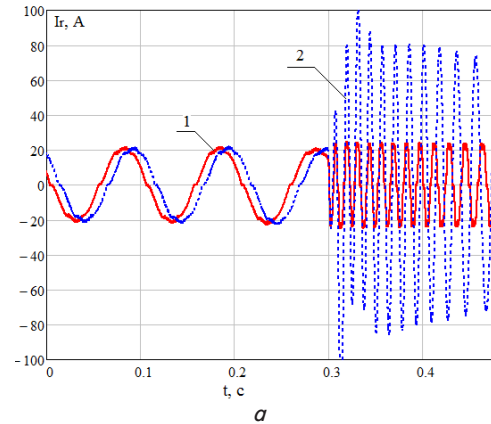


Рис. 3. Результаты моделирования процесса торможения противовключением для системы импульсного регулирования АДФР с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) добавочного резистора: а – ток ротора; б – ток статора; в – электромагнитный момент; г – скорость вращения ротора

Таким образом, за счет введения добавочного резистора в цепь выпрямленного тока ротора АДФР в момент реверса обеспечивается ограничение нарастания I_s в 3 раза, I_r – в 3,5 раза и M – в 2 раза. Кроме этого, модифицированная система ИР АДФР обеспечивает рекуперацию энергии скольжения при формировании статической и динамической характеристик при достаточно простой схеме реализации, что обеспечивает её надежность.

Ограничение токов статора и ротора во избежание броска момента во время реверса АДФР вместо добавочного сопротивления может выполнять задатчик интенсивности тока ротора АДФР [11].

5. Выводы

1. Получен синтез контакторной схемы, реализующий режим торможения противовключением

с современной системой импульсного регулирования.

2. Разработка математической модели исследования модифицированной системой ИР АДФР с реализацией торможения противовключением. Определена величина добавочного сопротивления в цепи выпрямленного тока ротора, обеспечивающего согласование э.д.с. ротора АДФР и э.д.с. инвертора. При этом обеспечивается ограничение нарастания тока статора в 3 раза, тока ротора – в 3,5 раза и электромагнитного момента – в 2 раза. Это позволит снизить ударную составляющую электромагнитного момента в период реверса, а также исключить рассеивание энергии скольжения ротора в обмотках статора и ротора АДФР. При этом энергия скольжения ротора через инвертор рекуперируется в сеть, что приводит к повышению энергоэффективности всего электропривода.

Литература

1. Terede, G. Speed, flux and torque estimation of induction motor drives with adaptive system model [Text] / G. Terede, R. Belmans // International conference on Power electronics, machines and drives, 2002. – P. 498–503. doi: 10.1049/cp:20020167.
2. Donald, W. The Analysis of Induction Mashines Controlled by Series Connected Semiconductor Switches [Text] / W. Donald, A. Novotny, P. Frederick // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1968. – Vol. PAS-87, Issue 2. – P. 597–605. doi: 10.1109/tpas.1968.292058.
3. Соколов, М. М. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. М. Соколов, П. Е. Данилов – М.: Энергия, 1972. – 72 с.
4. Amin, A. Induction Motors. Analysis and Torque Control [Text] / A. Amin, D. Bahram // Series: Power Systems. – 2001. – Vol. XV. – P. 262.
5. Aaltonen, M. Direct torque control of AC motor drives [Text] / M. Aaltonen, P. Tiitinen, J. Lalu, S. Heikkila // ABB Reviev. – 1995. – Vol. 3. – P. 19–24.
6. Коцур, М. И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 114–120.
7. Коцур, М. И. Повышение энергоэффективности схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. И. Коцур // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2011. – № 2 (14). – С. 86–89.
8. Коцур, М. И. Особенности выбора балластного сопротивления для схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. И. Коцур // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 4 (80). – С. 56–61.
9. Коцур М. И. Особенности режимов работы модифицированной системы импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2012. – № 3 (19). – С. 163–165.
10. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
11. Андриенко, П. Д. Энергоэффективное торможение противовключением электроприводов на базе асинхронных двигателей с фазным ротором [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Андриенко, М. И. Коцур, С. В. Калужный // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – № 15(91). – С. 89–91.