

**УДК 621.313.333**

*Канд. техн. наук, доцент Галиновский А.М.  
канд. техн. наук, доцент Анпилогов Н.Г.  
(НТУУ «КПИ»)  
научный сотрудник Ленская Е.А.  
(НПО «ТЭМП», г. Киев, Украина)*

## **ПУСК БЕСКОНТАКТНОГО АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО МЕТОДУ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ ОБМОТОК РОТОРА**

*Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень параметрів асинхронного двигуна з противключенням обмоток ротора, отримані залежності, які описують пускові характеристики асинхронного двигуна з різними додатковими коефіцієнтами трансформації та різними коефіцієнтами зв'язку складових частин обмоток ротора по потокам розсіювання.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

В настоящее время электромеханики ведущих стран мира уделяют огромное внимание проблеме энергосбережения, что связано с значительным ростом цен на энергоносители. Важнейшим направлением в решении этой проблемы является широкое внедрение регулируемого электропривода.

Несмотря на большую потребность в регулируемом электроприводе его внедрение на Украине проводится низкими темпами. В основном разработка регулируемого электропривода ведется в направлении сочетания преобразователя частоты (ПЧ) и асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором. Это направление имеет существенный недостаток: ПЧ должны иметь по меньшей мере такую же мощность, как и АД. В то же время удельная стоимость ПЧ в несколько раз выше удельной стоимости АД, подобные агрегаты дорогие. Особо дорогие агрегаты с высоковольтными двигателями. Поэтому перспективно широкое внедрение асинхронизированных двигателей (АСД) с ПЧ в роторной цепи. При ограничении диапазона регулирования необходимая мощность ПЧ существенно снижается, что снижает стоимость агрегата в целом. Особенно перспективным является внедрение бесконтактных асинхронизированных двигателей (БАСД) для механизмов с вентиляторной характеристикой.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ отечественных и зарубежных исследований и разработок показывает, что большое внимание уделяется вопросам совершенствования регулируемого электропривода на базе асинхронизированных машин (машин двойного питания) с контактными кольцами [1-3]. Требуемый диапазон регулирования частоты вращения в рабочем диапазоне электроприводов насосных и вентиляторных установок составляет около 15 – 25 % от номинальной скорости [1, 3, 4]. Проводятся разработки вращающихся электромашинно-вентильных преобразователей (ЭМВП) бесконтактных асинхронизированных генераторов [5]. Применение подобных ЭМВП в БАСД практически возможно только при разработке бесконтактных устройств пуска.

Одним из известных методов пуска АД с фазным ротором является пуск с противовключением обмоток ротора [6]. Каждая фаза обмотки ротора делится на две (или больше) части, которые при пуске двигателя соединяются одна с другой таким образом, что электродвижущие силы (ЭДС), индуцированные в этих частях обмотки, вычитаются. Вычитаются также намагничивающие силы, благодаря чему величина пускового тока статора снижается вплоть до номинального. При этом возрастает пусковой момент АД.

Метод противовключения предложен в 1894 г. профессором Гергесом (Германия). Предложены две пусковые схемы. В одной из них (рис. 1,а) две неравные части обмотки (1 и 2) одной фазы лежат в общих пазах. Наводимые в этих частях обмоток ЭДС вычитаются друг из друга арифметически. В другой схеме (рис. 1,б) две части обмоток имеют одинаковые числа витков, но при этом части обмотки расположены в разных пазах. Поэтому ЭДС двух частей обмоток вычитаются геометрически. При достижении ротором АД определенной частоты вращения две части обмоток замыкаются контактами 3 (рис. 1,а,б). На рис. 1,с приведена схема академика Шенфера (Россия). В этой схеме фазная обмотка разделяется на несколько частей.

Рассмотренные схемы противовключения обмоток роторов АД находили сравнительно большое применение для двигателей средней мощности (до 100 кВт) с волновыми обмотками ротора.

В настоящее время разработаны новые схемы противовключения обмоток АД. Одна из них [7] показана на рис. 1,д, где 4 – вращающийся преобразователь частоты. Две трехфазные обмотки сдвинуты по поверхности ротора.

Принципиальное отличие новых схем противовключения обмоток ротора АД состоит в том, что в известных схемах (рис. 1, а – с) шунтирующие ключи разомкнуты при пуске и замкнуты при работе. Они должны быть рассчитаны на длительный режим работы с учетом воз-

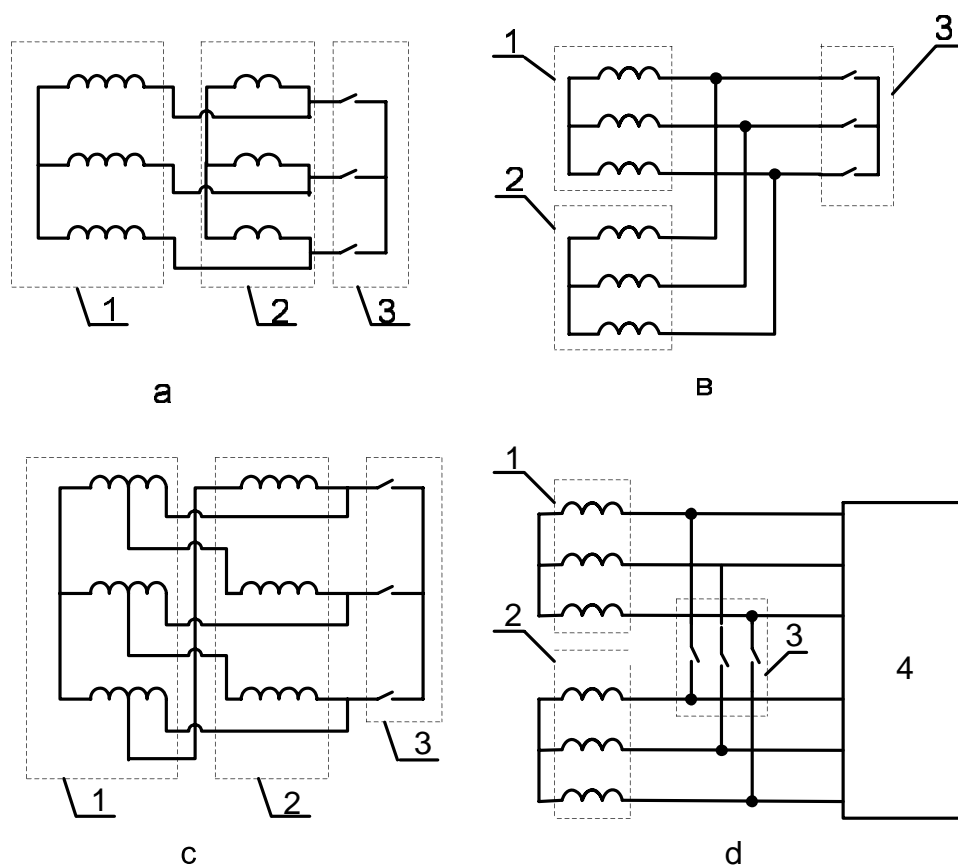


Рисунок 1– Схемы противоключения обмоток ротора АД

можных перегрузок по току. Эти схемы применимы только для пуска АД и не могут быть применены в регулируемом по частоте вращения приводе введением в обмотку ротора ЭДС частоты скольжения. В таких схемах пусковой ток ротора в несколько раз превышает номинальную величину и не регулируется в процессе пуска. В новых схемах противоключения ключи замкнуты кратковременно только на время пуска и разомкнуты во время рабочего режима. Поэтому пусковое устройство рассчитывается на кратковременный режим.

В литературе отсутствует информация о методике расчета параметров и пусковых характеристик АД с противоключением обмоток ротора.

**Постановка задачи.** Выполнить теоретические и экспериментальные исследования изменения параметров АД с противоключением частей обмоток ротора в зависимости от коэффициента связи частей обмоток ротора по потокам рассеяния. Исследовать пусковые характеристики АД с разной степенью противоключения обмоток ротора.

**Изложение материала и его результаты.** Блок-схема БАСД показана на рис. 2, где: 1 – АД с фазным ротором; 2 – синхронный возбудитель; 3 – управляющая машина; 4 – вращающийся ПЧ; 5 – блок сиг-

налов управления; 6 – датчики тока ротора; 7 – регулятор возбуждения; 8, 9 – выключатели; 10 – вращающаяся часть. Обмотка статора двигателя 1 подключена к сети через выключатель 8. Многофазная обмотка ротора двигателя через преобразователь 4 подсоединена к роторным обмоткам возбудителя 2. Сигналы управления на тиристоры преобразователя 4 подаются с выхода блока 5, входы которого подключены к роторным обмоткам управляющей машины 3 и к датчикам тока ротора двигателя 6. Регулятор возбуждения 7 подсоединен к сети через выключатель 9. К регулятору подключены обмотка возбуждения возбудителя 2, статорные обмотки управляющей машины 3 и выходы датчиков частоты вращения, тока статора двигателя, напряжения сети и др. На обмотку статора управляющей машины подается напряжение частоты сети.

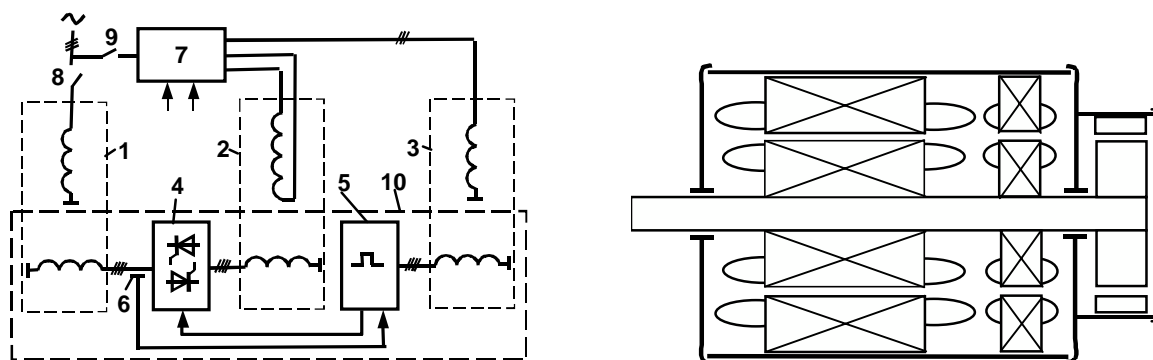


Рисунок 2 – Блок-схема БАСД Рисунок 3 – Конструкция БАСД

Пуск без нагрузки АД осуществляется пусковым устройством. При достижении определенной частоты вращения АД обмотка ротора двигателя отключается от пускового устройства и подключается к ПЧ.

Регулирование частоты вращения БАСД проводится изменением тока возбуждения возбудителя и фазы напряжения на статорной обмотке управляющей машины.

АД и синхронный возбудитель расположены в одном корпусе (рис. 3). Устройство пуска, ПЧ, управляющая машина и блок питания расположены в торцевой части агрегата.

На рис. 4 показана схема замещения АД с противовключением обмоток ротора, общая для рабочего и пускового режимов. На схеме:  $r_1$  и  $x_1$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния первичного контура;  $r_2$  и  $x_2$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния вторичного контура, приведенные к первичной обмотке;  $r_m$  и  $x_m$  – активное и индуктивное сопротивления намагни-

чивающего контура;  $s$  – скольжение. В пусковом режиме ключ  $K$  разомкнут, в рабочем режиме – замкнут.

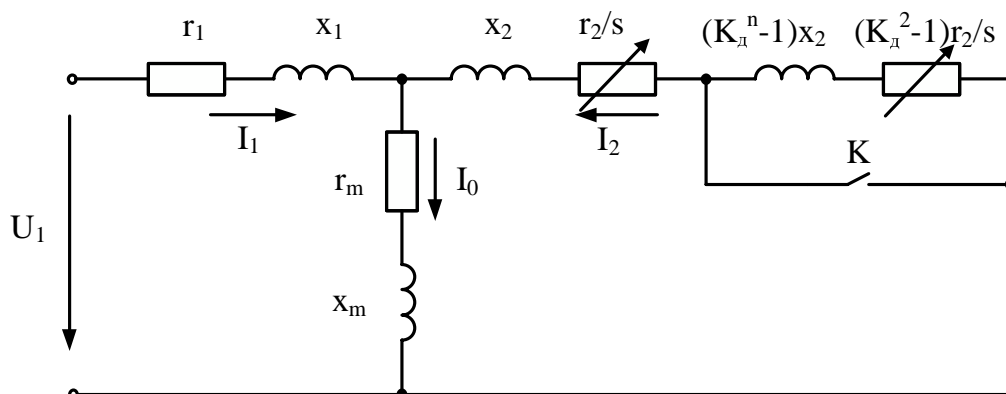


Рисунок 4 – Схема замещения АД

Коэффициент трансформации в пусковом режиме  $K_{\text{пн}} = K_{\text{т}} \cdot K_{\text{д}}$ , где  $K_{\text{т}}$  - коэффициент трансформации рабочего режима,  $K_{\text{д}}$  – дополнительная составляющая коэффициента трансформации, учитывающая противовключение обмоток ротора. При изменении  $K_{\text{д}}$  изменяются параметры схемы замещения в режиме пуска.

Величина приведенного активного сопротивления вторичного контура при противовключении увеличивается пропорционально  $K_{\text{д}}^2$ . Величина приведенного индуктивного сопротивления рассеяния вторичного контура при противовключении зависит от степени взаимосвязи составных частей обмоток по потокам рассеяния. Если индуктивное сопротивление рассеяния вторичного контура при противовключении уменьшается в  $K_{\text{д}}^2$  раз (первый предельный случай), то величина индуктивного сопротивления рассеяния, приведенная к первичной обмотке, остается без изменения. Если индуктивное сопротивление рассеяния вторичного контура при противовключении уменьшается в  $K_{\text{д}}$  раз (второй предельный случай), то величина этого сопротивления, приведенная к первичной обмотке, увеличивается в  $K_{\text{д}}$  раз. В общем случае приведенная величина индуктивного сопротивления рассеяния вторичного контура при противовключении (рис. 4) изменяется пропорционально величине  $K_{\text{д}}^n$ , где показатель степени  $n = 0 - 1$ .

Первый предельный случай изменения индуктивного сопротивления рассеяния вторичного контура возможен при схеме противовключения по рис. 1,а. Для подтверждения этого положения проведены исследования макета АД, изготовленного на базе двигателя АК52-4 мощностью 4,5 кВт. В макете первичная обмотка расположена на роторе, вторичная – на статоре. На статоре три однослойные трехфазные обмот-

ки с диаметральным шагом расположены в одних и тех же пазах. Сторона катушки каждой обмотки расположена по всей высоте паза и занимает 1/3 его ширины. Одинаково расположение трех обмоток и в лобовых частях. Проведены испытания АД без противовключения и с противовключением обмоток ротора. При испытании без противовключения три обмотки соединялись последовательно. Величины активных сопротивлений и сопротивлений рассеяния первичной и вторичной обмоток, Ом:  $r_1 = 0,81$ ;  $r_2 = 1,155$ ;  $x_1 = 0,6$ ;  $x_2 = 1,22$ . Сопротивление намагничивающего контура с первичной стороны  $x_{m1} = 20,01$  Ом, со вторичной стороны  $x_{m2} = 52,71$  Ом. Коэффициент трансформации  $K_T = 0,623$ .

При противовключении одна обмотка вторичного контура включалась встречно. Коэффициент трансформации увеличивался в 3 раза,  $K_d = 3$ . В таблице 1 приведены параметры короткого замыкания (КЗ) макета АД, рассчитанные по экспериментальным данным (опыт) и по схеме замещения АД (расчет). Параметры приведены при питании АД со стороны ротора и статора для разных схем обмоток ротора: а – схема без противовключения, б - схема с противовключением. При расчете по схеме замещения принято  $n = 0$ ,  $K_d^n = 1$ .

Таблица 1 – Сопоставление параметров КЗ макета АД

Схема обмотки	Сторона питания	Ротор		Статор	
		параметры	$r_{к1}$ , Ом	$x_{к1}$ , Ом	$r_{к2}$ , Ом
а	опыт	1,235	1,077	3,103	2,754
	расчет	1,238	1,072	3,121	2,797
б	опыт	4,074	1,969	1,396	0,309
	расчет	4,449	1,946	1,373	0,309

Практическое совпадение величин  $x_{к1}$  и  $x_{к2}$ , полученных экспериментальным и расчетным путями, показывают реальную возможность построения АД с противовключением обмоток роторов при изменении индуктивного сопротивления рассеяния пропорционально квадрату изменения обмоточного коэффициента.

Второй предельный случай изменения индуктивного сопротивления рассеяния вторичного контура близок к случаю расположения трех

катушек одной катушечной группы в трех рядом лежащих пазах. При противовключении одна катушка включается встречно.

Исследуем пусковые характеристики АД при изменении величины  $K_d$  для двух предельных случаев изменения индуктивного сопротивления рассеяния вторичного контура. Используем каталожные данные АД типа 4АНК-160 мощностью 14 кВт [8]. Параметры Т-образной схемы замещения АД в рабочем режиме, о.е.:  $r_1 = 0,046$ ;  $r_2 = 0,058$ ;  $x_1 = 0,079$ ;  $x_2 = 0,094$ ;  $x_m = 3,1$ . Максимальный момент  $M_m = 3,0$ , критическое скольжение  $s_k = 0,33$ .

Расчет характеристик проводим по общеизвестным формулам [9] с учетом изменения обмоточного коэффициента и параметров вторичного контура при противовключении обмоток. Добавочным нижним индексом «1» обозначим величины для первого предельного случая, а индексом «2» - для второго предельного случая.

Для первого предельного случая при  $K_d = \text{var}$  максимальный момент  $M_{m1}(K_d) = M_m = 3,0 = \text{const}$ . Для второго предельного случая

$$M_{m2}(K_d) = \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c \cdot x_2)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c \cdot x_2 \cdot K_d)^2}} \cdot M_m, \quad (1)$$

где  $c = 1 + x_1 / x_m$ . Критические скольжения:

$$s_{m1}(K_d) = \frac{c \cdot r_2 \cdot K_d^2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c \cdot x_2)^2}}; \quad s_{m2}(K_d) = \frac{c \cdot r_2 \cdot K_d^2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c \cdot x_2 \cdot K_d)^2}}. \quad (2)$$

Пусковые моменты:

$$M_{n1}(K_d) = \frac{((2 + s_{m1}(K_d)) \cdot a(K_d)) \cdot M_{m1}(K_d)}{s_{m1}(K_d) + s_{m1}(K_d) \cdot a(K_d) + 1/s_{m1}(K_d)};$$

$$M_{n2}(K_d) = \frac{((2 + s_{m2}(K_d)) \cdot a(K_d)) \cdot M_{m2}(K_d)}{s_{m2}(K_d) + s_{m2}(K_d) \cdot a(K_d) + 1/s_{m2}(K_d)}, \quad (3)$$

где  $a(K_d) = 2 \cdot r_1 / (c \cdot r_2 \cdot K_d^2)$ .

На рис. 5 показаны зависимости расчетных величин АД от коэффициента  $K_d$ , о.е.:  $a$  - максимальные  $M_{m1}$ ,  $M_{m2}$  и пусковые  $M_{n1}$ ,  $M_{n2}$  моменты;  $b$  - токи ротора  $I_{21}$ ,  $I_{22}$  и токи ротора  $\dot{I}_{21}$ ,  $\dot{I}_{22}$ , приведенные к обмотке статора;  $c$  - токи статора  $I_{11}$  и  $I_{12}$ ;  $d$  - результирующая ЭДС воздушного зазора  $E_\delta$ , результирующая ЭДС обмотки ротора при проти-

вовключения и скольжении  $s = 1$ , приведенная к обмотке статора,  $E'_{\delta\Pi}$ , расчетная мощность пускового устройства  $S_{2\Pi}$ .

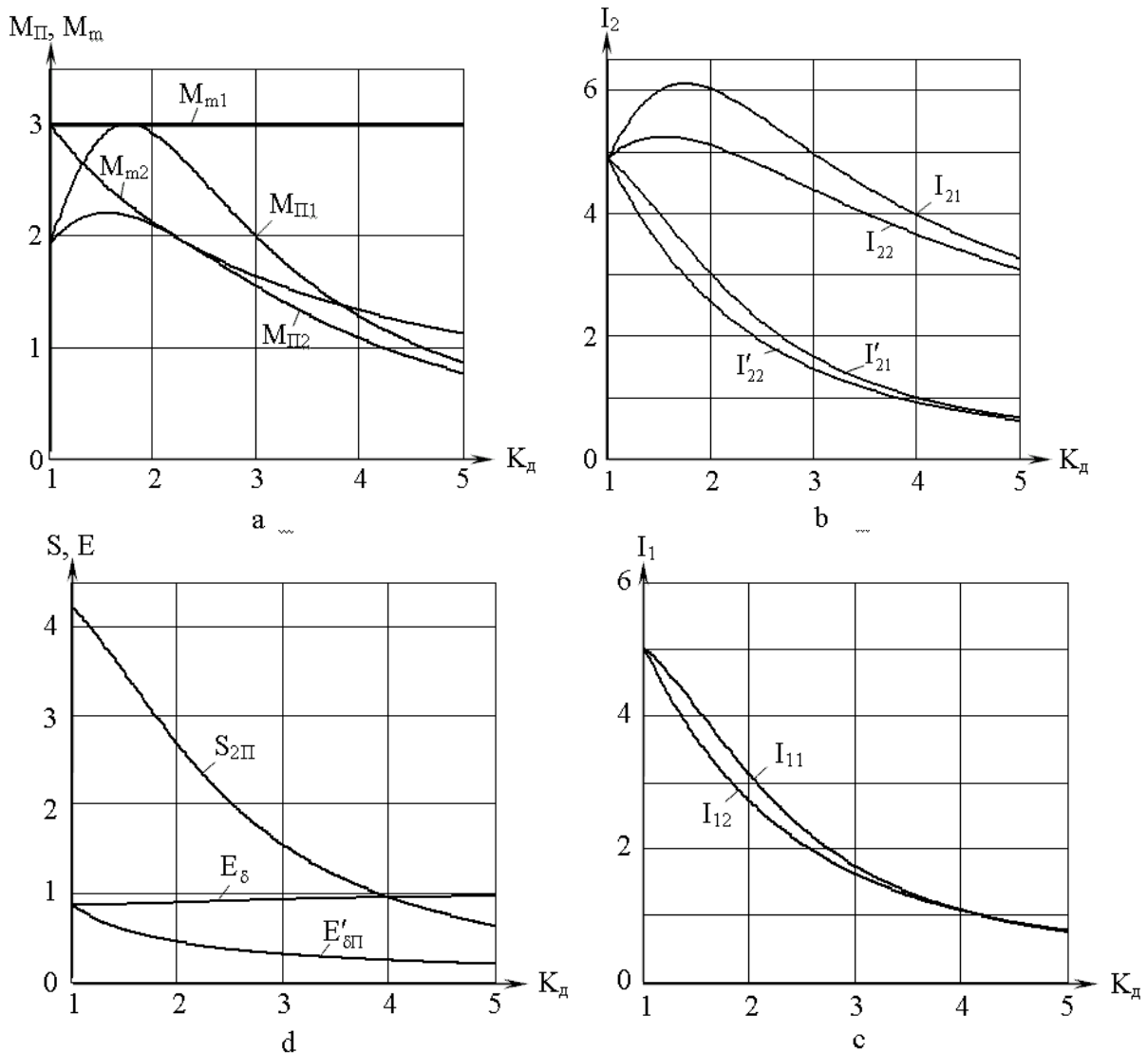


Рисунок 5 – Расчетные величины АД в зависимости от величины  $K_d$

На рис. 6 показаны механические характеристики (а) и изменение токов ротора от скольжения (б) при разных величинах  $K_d$  для первого предельного случая. Дополнительные нижние индексы соответствуют величинам коэффициента  $K_d$ .



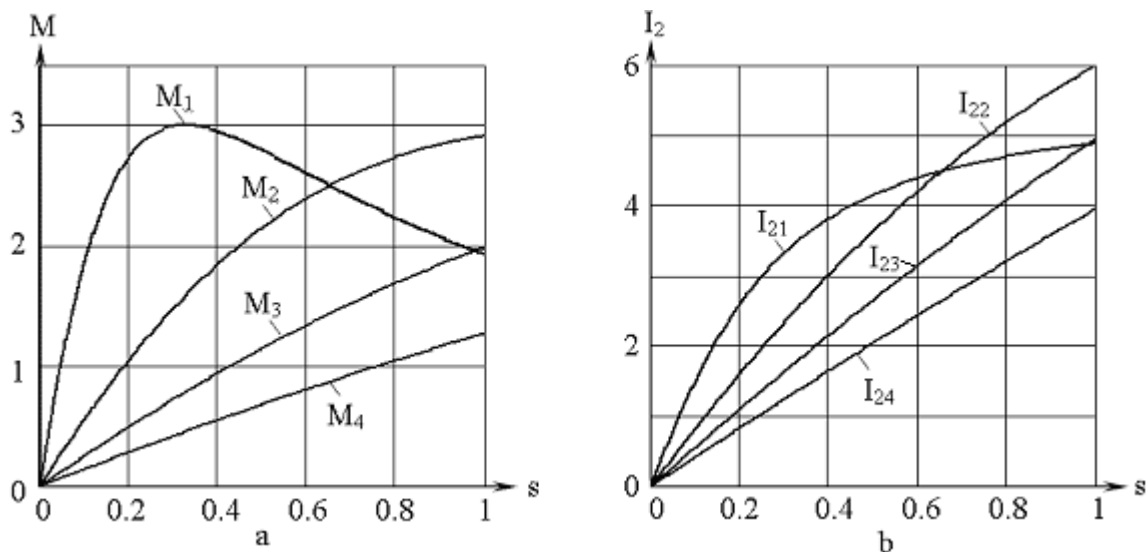


Рисунок 6 – Электромагнитный момент и токи АД при разном  $K_d$

Анализ результатов исследований показывает, что при небольшом увеличении коэффициента  $K_d$  ток ротора АД может быть больше тока при пуске без противовключения. Наибольшая величина пускового тока ротора наблюдается в первом предельном случае изменения сопротивления рассеяния обмотки ротора. С увеличением  $K_d$  пусковой ток ротора, приведенный к обмотке статора, существенно уменьшается, что приводит к уменьшению пускового тока статора. При пуске ненагруженного АД пусковой ток статора может быть меньше номинальной величины. Меньше номинальной может быть и расчетная величина пускового устройства, что обусловлено уменьшением тока и результирующей ЭДС обмоток ротора при противовключении.

С увеличением  $K_d$  механическая характеристика АД становится устойчивой на диапазоне скольжения  $s = 0 - 1$ . В пусковом устройстве могут быть применены тиристорные коммутаторы с регулированием угла управления тиристорами [10], что позволяет плавно изменять частоту вращения АД, ограничивая ток ротора величиной, близкой к номинальной. Согласно рис. 6 при  $K_d = 3$  и  $s = 1$  ток ротора  $I_{23} \approx 5$ , пусковой момент  $M_3 \approx 2$ . Возможно уменьшение тока ротора до величины близкой номинальной. При этом пусковой момент  $M_{\Pi} \approx 0.4$ , возможен запуск ненагруженного АД, существенно уменьшается мощность пускового устройства и величина тока статора.

Испытания АД типа АК-60-4 с противовключением обмоток ротора подтвердили теоретические положения.

#### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

Теоретические и экспериментальные исследования АД с противовключением обмоток ротора показывают высокие технико-экономические показатели новых пусковых устройств. Пусковые уст-

ройства отличаются простотой технического решения, технологичностью, малой стоимостью, адаптацией к конструкции БАСД с вращающимися преобразователями, работающими в ограниченном диапазоне изменения частоты вращения. Новые схемы пуска АД могут быть применены в стартер - генераторных и других установках.

Актуальным является ускорение работ по разработке опытно-промышленных образцов БАСД, их серийное внедрение.

Значительная часть вентиляционных установок Донбасса работает с выходной мощностью порядка 40 – 60 %. Большая часть мощности теряется на «задвижках». При замене высоковольтных синхронных двигателей на БАСД экономический эффект может быть достигнут за счет уменьшения расхода электроэнергии, улучшения технологического режима, уменьшения пусковых токов двигателей и увеличения срока службы агрегатов.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований параметров асинхронных двигателей с противовключением обмоток ротора, получены зависимости, описывающие пусковые характеристики асинхронного двигателя с разными добавочными коэффициентами трансформации и разными коэффициентами связи составных частей обмоток ротора по потокам рассеяния.

*The results of theoretical and experimental researches of parameters of induction motor with the opposition plugging windings of rotor are presented the dependences, which describe starting descriptions of induction motor with different additional coefficients of transformation and different coefficients of communication of component parts of rotor windings to the streams of dispersion are getting.*

#### **Библиографический список.**

1. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентиляционные каскады и двигатели двойного питания. М.: «Энергия», 1979. – 200 с.

2. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: «Энергоатомиздат», 1984. – 192 с.

3. Патент України: 75192 С2, Н02Р 27/04. Комбінований спосіб пуску електричної машини змінного струму / О.М.Галиновський, О.О.Ленська.

№ 2004031885; Заявл. 15.03.2004; Опубл. 15.03.2006. Бюл. № 3. – 8 с.

4. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

5. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Новые разработки по бесконтактным синхронным и асинхронизированным машинам. Новини енергетики, №5, 2003. – С. 285 – 286.

6. Шенфер К.П. Асинхронные машины. М.-Л. Гос. Издат., 1929. – 457 с.
7. Клюк Б.А., Подлесный А.М., Галиновский А.М., Новиков А.В. Асинхронизированный стартер-генератор газокompрессорных станций. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: вестник ХППУ. Спец. выпуск, Харьков, ХППУ, 1998. – С.285–286.
8. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ - М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. 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.
10. Герасимьяк Р.П. Тиристорный электропривод для кранов. М.: Энергия, 1978. – 112 с.