

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.333:622

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54)

Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б., Танич В.О., Петушков М.Ю.

Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова

СНИЖЕНИЕ ПУСКОВЫХ ТОКОВ И МОМЕНТОВ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Прямой пуск от сети асинхронных короткозамкнутых двигателей характеризуется возникновением пиковых бросков пусковых токов и слабозатухающих колебательных составляющих электромагнитного момента, что в комплексе приводит к просадке напряжения, ускоренному износу изоляции обмоток асинхронных двигателей, ударам, резонансным колебаниям и деформации в механическом оборудовании. Поэтому снижение электрических и механических нагрузок в механическом оборудовании металлургической и горной промышленности за счет разработки рациональных схемных решений при прямом пуске асинхронного двигателя является актуальной научно-технической задачей. Целью статьи является оценка возможностей ограничения пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности подачи на его статорные обмотки фазного напряжения. Для ее оценки разработана динамическая компьютерная модель трехфазного асинхронного двигателя с учетом особенностей подключения статорной обмотки к питающей сети при прямом пуске, проведены необходимые исследования и определены требования к рациональным схемным решениям для асинхронных электроприводов, приводящих к снижению электрических и механических нагрузок. Теоретические исследования выполнены с привлечением методов теоретических основ электротехники, теории электрических машин, теории автоматического управления и автоматизированного электропривода. При расчете переходных процессов использовался программный пакет Matlab Simulink. Разработаны достоверные математическая и компьютерная модели трехфазных асинхронных двигателей мощностью 75, 200, 315 и 350 кВт, позволяющие исследовать в динамике варианты прямого пуска с учетом потерь в стали статора, вытеснения тока ротора, кривой намагничивания главного потока, механической нагрузки и инерционности ротора. Задержки подачи напряжения на фазы В и С позволяет снизить максимум момента по отношению к моменту номинальному с 8,22 до 3,16 и время колебаний с 0,29 с до 0,035 с. Получены зависимости максимумов модуля тока статора и электромагнитного момента в зависимости от угла сдвига трех фаз питающего напряжения по отношению к нулевым начальным условиям асинхронного двигателя. Сформулированы выводы и требования к схемным решениям для рационального прямого пуска, позволяющие регулировать максимальные нагрузки и колебательность в начале прямого пуска.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель, компьютерная модель, прямой пуск, свободные колебания момента, начальные значения напряжения, схемные решения.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы механического оборудования определяется надежностью работы их электроприводов. Асинхронный электропривод конвейеров, дробилок, грохотов, проходческих комбайнов, водоотливных установок и др. является нерегулируемым и характеризуется прямым пуском от сети асинхронных короткозамкнутых двигателей (АД) [1-4] при существенной механической нагрузке и инерционности [5]. Дополнительно возникают пиковые броски пусковых токов и слабозатухающие колебательные составляющие электромагнитного момента, что в комплексе приводит к просадке напряжения, ускоренному износу изоляции обмоток АД, ударам, резонансным колебаниям и деформации в механическом оборудовании [6]. Поэтому снижение электрических и механических нагрузок в механическом оборудовании металлургической и горной промышленности за счет разработки рациональных схемных решений при прямом пуске АД является актуальной научно-технической задачей.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПО ПРЯМОМУ ПУСКУ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В монографии [1] приведена теория электромагнитных переходных процессов АД, проведены экспериментальные исследования прямого пуска трехфазного асинхронного двигателя, разработана математическая модель

эквивалентного двухфазного двигателя, на аналоговой вычислительной машине (АВМ) рассчитаны переходные процессы угловой скорости и электромагнитного момента при разных моментах сопротивления и инерционности. В работе [2] на основе математической модели эквивалентного двухфазного двигателя с использованием АВМ проведены расчеты переходных процессов при ограничении скорости нарастания питающего напряжения, при ограничении питающего напряжения, пуски при ненулевых начальных условиях и применении устройств плавного пуска (УПП). В статье [3] представлена динамическая двухфазная компьютерная модель двигателя АД 4А250S4Y3 с учетом потерь в стали, вытеснения тока ротора и насыщения магнитной системы основным потоком [7], с помощью которой с высокой достоверностью рассчитаны переходные процессы скорости и электромагнитного момента. В статье [5] приведены переходные процессы скорости, ускорения и момента АД мощностью 250 кВт, рассчитанные на компьютерной модели при прямом пуске, при пофазной подаче напряжения и при квазиоптимальном пуске.

В перечисленных работах проведены исследования различных способов прямого пуска на двухфазных динамических моделях, разработанных на основе обобщенной электрической машины. При этом не учтены особенности трехфазного АД [1-3, 5, 8-11]. Поэтому целью статьи является разработка динамической компьютерной модели трехфазного асинхронного двигателя с учетом особенностей подключения статорной обмотки к питающей сети при прямом пуске, проведе-

ние необходимых исследований и разработка требований к рациональным схемным решениям для асинхронных электроприводов, приводящих к снижению электрических и механических нагрузок.

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

На основании концепции работы асинхронного двигателя [8, 12] при разработке математической модели сформулированы исходные допущения:

1. Обмотки статора и ротора распределены по пазам идеально, состоят из нескольких катушечных групп и создают синусоидальные пространственные намагничивающие силы. Сумма токов обмоток равна нулю. Фазные активные и индуктивные сопротивления обмоток статора равны между собой, считаются постоянными и не зависящими от насыщения основной магнитной цепи. Фазные сопротивления обмоток ротора равны между собой, но с учетом процесса вытеснения тока роторной обмотки при большом скольжении изменяются (коэффициенты вытеснения тока ротора по активному сопротивлению K_r и реактивному сопротивлению K_x) [13].

2. Не учитываются зубцовые пульсации потока при вращении ротора. Считается, что эта проблема решена конструктивно за счет скоса пазов на одно зубцовое деление и подбора числа пазов статора и ротора.

3. Учет насыщения магнитной системы проводится по цепи «магнитопровод статора - зазор - магнитопровод ротора - зазор» [7].

4. Контуры вихревых токов представлены фазными сопротивлениями потерь в стали. За основу взята Т-образная схема замещения АДК с параллельным подключением сопротивления потерь в стали [3].

Дополнительные условия реализации модели:

1. Расчет основных переменных ведется в абсолютных величинах.

2. В качестве входных воздействий, приложенных к трем фазам статора, могут использоваться напряжения любой амплитуды, формы, частоты, фазы.

3. Выходные переменные для контроля: трехфазные токи статора и ротора (I_s , I_r); электромагнитный момент ротора (M_r); угловая скорость вращения и угол поворота ротора (ω , Θ_m), коэффициент мощности $\cos\varphi$, КПД двигателя η и скольжение s .

4. Возмущающее воздействие – реактивный момент сопротивления (M_C).

Структурная схема математической модели АД [14] приведена на **рис. 1**. Жирными линиями в структурной схеме выделены трехмерные или двухмерные векторы переменных. В блоке (1) выполняется расчет трехмерного тока статора при постоянных значениях активного сопротивления и индуктивности потока рассеивания [15] и с учетом потерь в стали статора. В блоке (2) рассчитывается трехмерный ток ротора при изменяющихся в функции скольжения активном сопротивлении и индуктивности потока рассеивания [16, 17]. В блоке (3) последовательно выполняется пересчет токов статора и ротора из трехфазной неподвижной системы координат ABC в двухфазную неподвижную систему координат $\alpha\beta$ и далее в двухфазную вращающуюся систему координат xy . Далее для расчета вектора тока намагничивания из вектора тока статора вычитается вектор тока ротора. С учетом кривой намагничивания рассчитываются проекции потоков намагничивания на оси xy . В блоке (4) выполняет-

ся обратный пересчет двухмерного вектора главного потока в трехмерные векторы потоков статора и ротора в осях ABC и abc . Блоки (5) и (6) необходимы для расчета трехмерных векторов ЭДС статорной E_s и роторной E_r обмоток. С помощью блока (7) на основе тока ротора и ортогональных потокоцеплений рассчитывается электромагнитный момент, развиваемый ротором АД [7]. Используя момент двигателя, момент сопротивления механизма и суммарный момент инерции (блок (8)) рассчитывается угловая скорость ротора АД.

В соответствии со структурной схемой математической модели в среде программирования Matlab Simulink разработана компьютерная модель асинхронного электропривода по системе ПЧ-АД со скалярным регулированием *adkn3cp.mdl* [15]. Основные параметры модели (**табл. 1**) для асинхронного двигателя 4A250S4Y3 (75 кВт, 1500 об/мин) [18] сведены в файл базы данных *adk250S4cp.mat*.

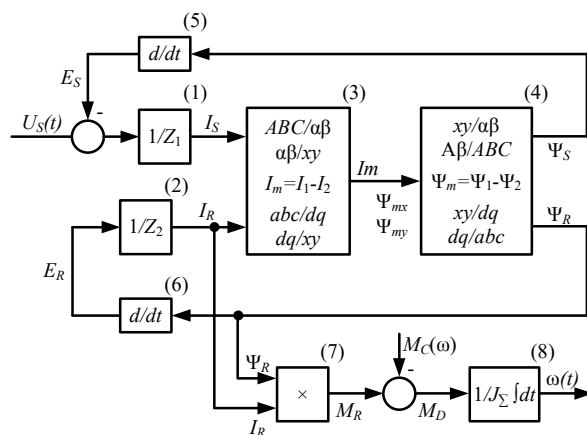


Рис. 1. Структурная схема математической модели трехфазного АД

Таблица 1

Основные параметры модели асинхронного двигателя 4A250S4Y3

Параметр	Значение
Номинальный ток статора I_{n_s} , А	135,77
Коэффициент мощности номинальный $\cos\varphi_n$	0,9
КПД номинальный η_n , %	93
Скольжение номинальное S_n , %	1,2
Момент критический M_{kz} , о.е.	2,3
Момент номинальный M_n , Н·м	483
Коэффициент вытеснения тока ротора по активному сопротивлению k_r	2
Коэффициент вытеснения тока ротора по реактивному сопротивлению k_x	0,83
Активное сопротивление статорной обмотки, приведенное к роторной обмотке R_1 , Ом	0,0397
Индуктивность потока рассеивания роторной обмотки, приведенная к роторной обмотке L_1 , мГн	0,45
Активное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной обмотке R_2 , Ом	0,0218
Индуктивность потока рассеивания роторной обмотки, приведенная к статорной обмотке L_2 , мГн	0,23
Индуктивность главного потока L_m , мГн	9,2
Электромагнитная постоянная времени статорной обмотки t_1 , мс	11,34
Ток пусковой i_n , о.е.	10,55

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 2 приведены рассчитанные с помощью компьютерной модели переходные процессы прямого пуска АД при номинальной реактивной нагрузке при подаче трехфазного линейного напряжения 380 В частотой 50 Гц. Кривые модуля тока статора I_1 , электромагнитного момента M , момента сопротивления M_C и угловой скорости вращения ω (на рис. 2 график скорости приведен в масштабе 2:1) представлены в относительных единицах. Инерционная постоянная времени [6] двигателя 4A250S4Y3 равна 0,31 с. Основные характеристики переходных процессов приведены в табл. 2. Задержанные пуски отличаются друг от друга разным углом сдвига $\Delta\phi$.

Время прямого пуска под номинальной нагрузкой не превышает 0,684 с при суммарном моменте инерции, в 2 раза большем момента инерции двигателя. На интервале времени от 0 до 0,29 с в кривых тока и момента явно выражены существенные, слабозатухающие колебания частотой до 50 Гц. Максимумы тока и момента в начале пуска равны 9,58 и 8,22 о.е. соответственно.

Эти колебательные процессы объясняются тем, что электрические и магнитные переходные процессы в АД имеют гармонический характер с различными постоянными времени [12] и разной степенью затухания [19], а электромагнитный момент равен произведению электрического тока на ортогональное потокоцепление [7], что приводит в начале пуска к существенному колебанию момента и модуля тока. Подобные переходные процессы получены многими исследователями на своих моделях и экспериментальных установках [1-5, 8-10, 20, 21].

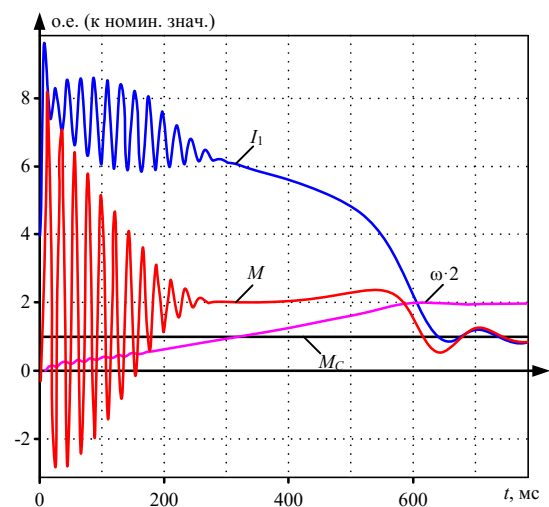


Рис. 2. Переходные процессы прямого пуска АД при одновременной подаче фазных напряжений

Таблица 2

Характеристики переходных процессов

Наименование	Прямой пуск	Зад. пуск 1	Зад. пуск 2
Максимум I_1 , о.е.	9,58	8,31	11,19
Максимум M , о.е.	8,22	3,16	4,27
Минимум M , о.е.	2,03	2,01	2,02
Момент критический M_{k2} о.е.	2,38	2,38	2,39
Время пуска, с	0,683	0,64	0,635
Время колебания тока I_1 , с	0,29	0,035	0,033
Время колебания момента M , с	0,284	0,035	0,04
Угол сдвига, град.	-	0	-90

Достоверность компьютерной модели оценивалась по точности расчета основных переменных в номинальном режиме. В установившемся режиме задавались номинальные напряжение, частота и момент. По окончании пуска замерялись скольжение, ток статора, коэффициент мощности, КПД, ток пусковой и момент критический. Величина среднеквадратичной ошибки по 6 переменным составила 5,73 %, что говорит о высокой достоверности компьютерной модели.

На рис. 3 представлены осциллограммы трехфазного статорного напряжения, модуля напряжения, трехфазного тока статора и его модуля, а также тока намагничивания и его проекций по осям x и y . Время затухания переходных процессов тока статора не превышает 35 мс, а время затухания свободной составляющей тока намагничивания доходит до 290 мс и определяет время затухания электромагнитного момента АД.

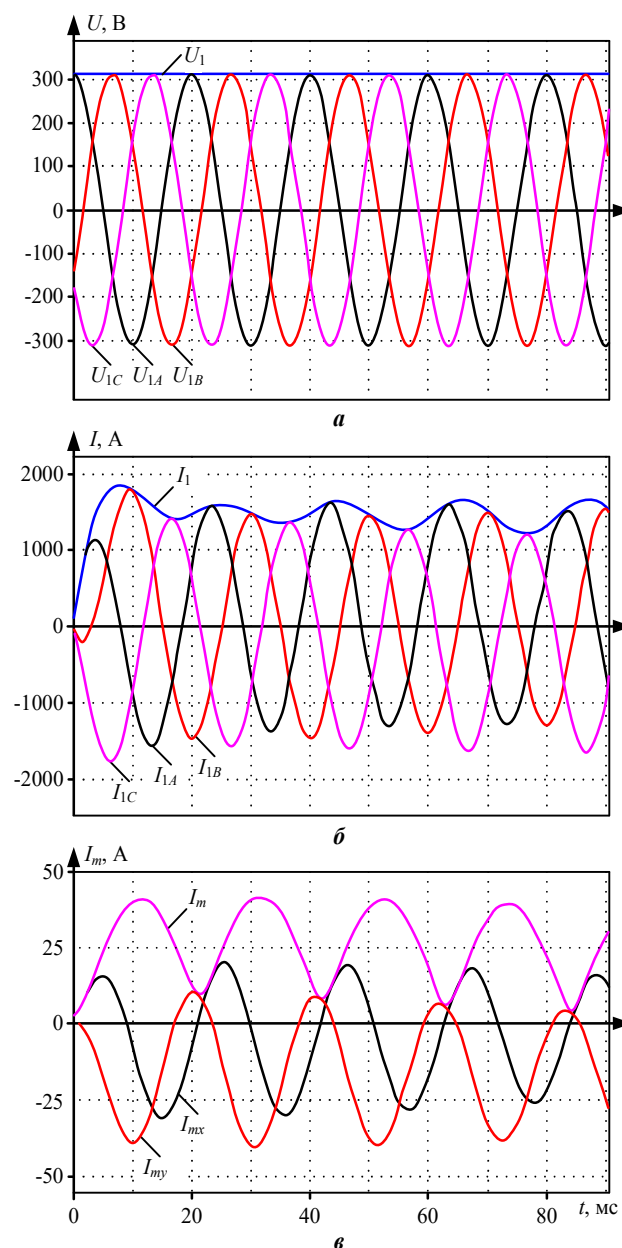


Рис. 3. Переходные процессы напряжения, тока статора, тока намагничивания при одновременной подаче фазного напряжения

Наличие слабозатухающих свободных составляющих в кривых тока намагничивания и потокосцепления связано с различными начальными значениями фазных напряжений [19], одновременно подаваемых на статорную обмотку при прямом пуске.

$$\begin{cases} U_{1a}(t) = U_{1m} \cos(\Omega t + \Delta\varphi); \\ U_{1b}(t) = U_{1m} \cos(\Omega t + \Delta\varphi - 2\pi/3); \\ U_{1c}(t) = U_{1m} \cos(\Omega t + \Delta\varphi + 2\pi/3). \end{cases} \quad (1)$$

Угол сдвига $\Delta\varphi$ является общим начальным углом для трех фаз питающего напряжения (1) по отношению к нулевым начальным условиям АД. При исследовании угол задавался в диапазоне от -90 до $+90$ град. Установлено на модели, что переходный процесс пуска (см. **рис. 2**) при одновременной подаче трехфазного напряжения не зависит от угла сдвига $\Delta\varphi$.

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ СТАТЬИ

Для исключения слабозатухающих свободных составляющих в потокосцеплении при прямом пуске фазные напряжения на статорные обмотки В и С необходимо подавать с задержкой на 120 и 240 эл. град соответственно.

На **рис. 4** в абсолютных величинах представлены осциллограммы трехфазного статорного напряжения, трехфазного тока статора, тока намагничивания и его проекций по осям x и y , рассчитанные с помощью компьютерной модели переходные процессы прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=0$. Задержки подачи напряжения на фазы В и С при частоте питающего напряжения 50 Гц составили 6,66 и 13,32 мс, соответственно. Время затухания переходных процессов тока статора и тока намагничивания при этом не превысили 35 мс.

На **рис. 5**, в продолжение осциллограмм **рис. 4**, приведены кривые модуля тока статора I_1 , электромагнитного момента M , момента сопротивления M_c и угловой скорости вращения ω в относительных единицах. Основные характеристики переходных процессов приведены в **табл. 2**. Время переходного процесса сократилось до 0,64 с, максимумы тока и момента уменьшились до 8,31 и 3,16 о.е. соответственно. Минимальный момент и момент критический остались прежними (см. **рис. 2**). Время затухания колебаний электромагнитного момента уменьшилось с 290 до 35 мс, а качество переходного процесса изменилось с существенно колебательного до монотонного.

Исследования влияния угла сдвига при задержанной подаче фазных напряжений на качество переходных процессов при пуске показали, что при $\Delta\varphi \neq 0$ максимумы тока и момента увеличиваются, но качество переходного процесса сохраняется. На **рис. 6** приведены переходные процессы пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi = -90$ град, по которым видно, что время переходного процесса пуска уменьшилось до 0,635 с, максимумы тока и момента увеличились до 11,19 и 4,27 о.е. соответственно при времени затухания колебаний электромагнитного момента 40 мс.

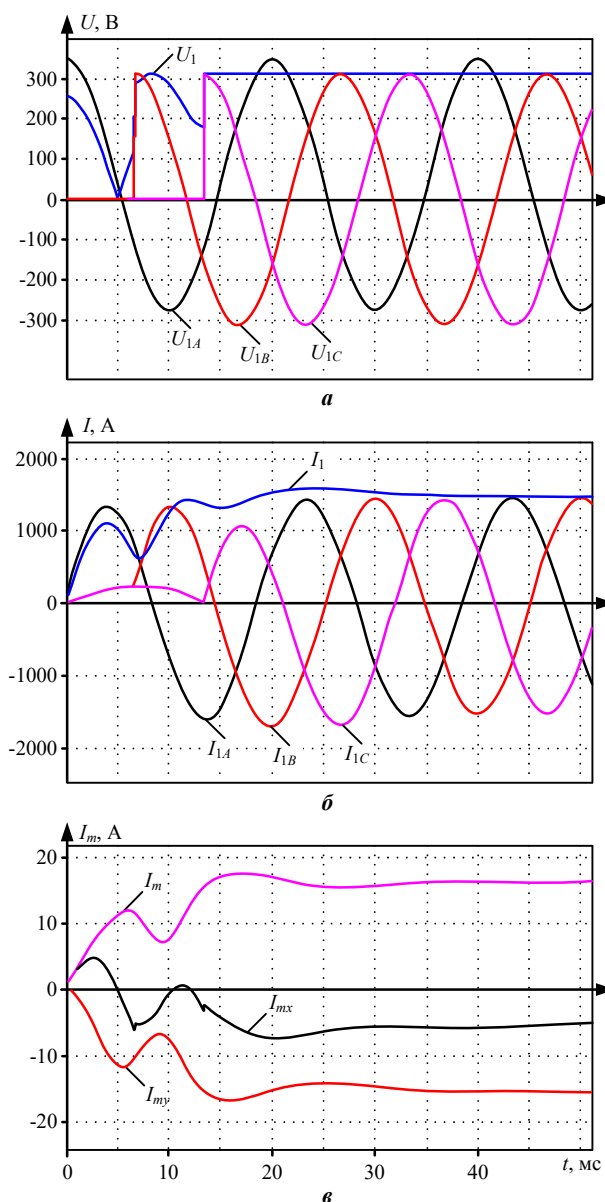


Рис. 4. Переходные процессы напряжения, тока статора, тока намагничивания при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=0$

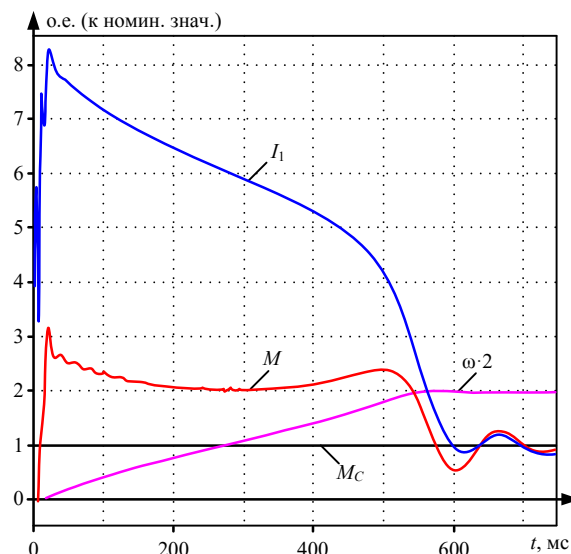


Рис. 5. Переходные процессы прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=0$

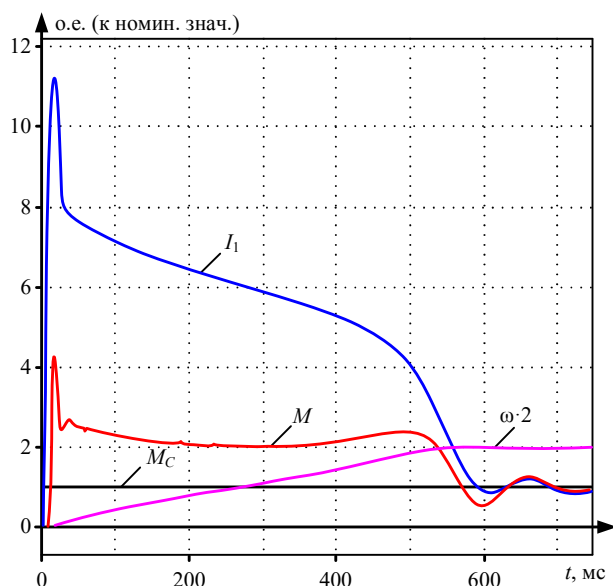


Рис. 6. Переходные процессы прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений и $\Delta\varphi=-90$

Для более полного доказательства полученных результатов проведены исследования влияния угла сдвига на максимумы токов и моментов в начале пуска на аналогичных компьютерных моделях асинхронных двигателей 4А315М4УЗ, 4А355М4УЗ и ДТА350М мощностью 200, 315 и 350 кВт при синхронных скоростях 1500, 1500 и 842 об/мин соответственно. Для этого по базам данных [14] и [18] сформированы файлы *adk315M4cp.mat*, *adk355M4cp.mat* и *adk350tanp.mat*. Совместно с файлом *adkn3cp.mdl* выполнены тестовые расчеты, доказаны достоверности моделей и далее выполнены исследования по влиянию угла сдвига на максимумы токов и моментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 7 и 8 представлены зависимости максимумов моментов и токов в начале пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений в зависимости от угла сдвига питающего напряжения для АД мощностью 75, 200, 315 и 350 кВт.

Приведенные зависимости имеют явно выраженные минимумы в районе $\Delta\varphi = \pm 20$ град и находятся в пределах $2,5 \pm 0,5$ и $7,5 \pm 1$ о.е. для моментов и токов соответственно. Максимальные значения моментов и токов проявляются при $\Delta\varphi = -90$ и не превышают 4 ± 1 и $12 \pm 1,5$ о.е. соответственно. Полученные зависимости показывают, что угол сдвига $\Delta\varphi$ существенно влияет на максимумы токов и моментов в начале прямого пуска АД при задержанной подаче фазных напряжений. Продолжительность этих всплесков не превышает 40 мс. Таким образом, при прямом пуске трехфазного АД с задержанной подачей фазных напряжений, задавая углом сдвига $\Delta\varphi$ от -90 град (по уравнению (1) напряжение фазы А – синусоида) до $\Delta\varphi = \pm 20$, можно регулировать максимумы тока статора и электромагнитного момента от наибольшего значения до наименьшего.

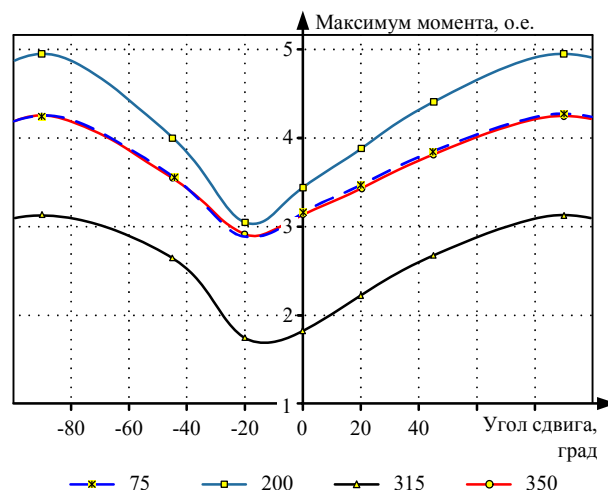


Рис. 7. Зависимости максимумов моментов от угла сдвига

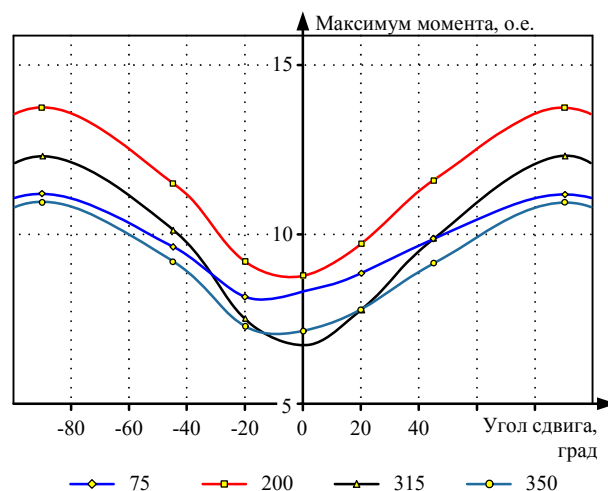


Рис. 8. Зависимости максимумов тока от угла сдвига

ВЫВОДЫ

1. В начале прямого пуска при одновременной подаче трехфазного напряжения в кривых тока статора и электромагнитного момента АД явно выражены существенные, слабозатухающие колебания частотой до 50 Гц. Наличие этих колебаний приводят к дополнительным нагрузкам в электрическом и механическом оборудовании.

2. Возникновение этих колебаний связано с разными начальными условиями фазных напряжений, подаваемых на статорную обмотку. Это приводит к возникновению разных свободных составляющих в кривых потокосцепления и дополнительным колебаниям электромагнитного момента. При одновременной подаче трехфазного напряжения начальный угол сдвига фазного напряжения статора не влияет на форму переходных процессов модуля тока статора и электромагнитного момента.

3. Задержка подачи напряжений фаз В и С в начале пуска на 120 и 240 электрических градусов приводит к исчезновению свободных составляющих в кривых потокосцепления и исчезновению высокочастотной колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента. При этом в начале пуска возникают дополнительные максимумы в кривых модуля тока статора и электромагнитного момента, затухающие за 35-40 мс.

4. При задержке подачи напряжений фаз *B* и *C* начальный угол сдвига фазного напряжения статора существенно влияет на максимумы модуля тока статора и электромагнитного момента. Полученные выводы сделаны на основании исследований на 4 достоверных компьютерных моделях АД мощностью 75, 200, 315 и 350 кВт. Задавая углом сдвига $\Delta\varphi$ от -90° град до $\Delta\varphi = \pm 20^\circ$, можно регулировать максимумы модуля тока статора и электромагнитного момента от наибольшего значения до наименьшего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выводов сформулированы требования к рациональным системам прямого пуска:

1. Подключать к сети АД со схемой соединения статорной обмотки «звезда» необходимо по 5-проводной схеме: 3 линейных провода *U*, *V* и *W* (*A*, *B* и *C*), нейтральный провод *N* и заземляющий провод *PE*.

2. Для направления «Вперед» фазы *U*, *V* и *W* подключать к зажимам статорной обмотки *C1*, *C2* и *C3* соответственно с задержками 0, 6,66 и 13,32 мс (см. рис. 4). Зажимы *C4*, *C5* и *C6* подсоединить к нейтральному проводу *N*.

3. Для направления «Назад» фазы *U*, *V* и *W* (*A*, *C* и *B*) подключать к зажимам статорной обмотки *C1*, *C3* и *C2* соответственно с задержками 0; 6,66; 13,32 мс.

4. При реализации схемы на тиристорах для минимизации всплесков модуля тока статора и электромагнитного момента подключать фазу *A* к зажиму *C1* следует при максимуме напряжения ($\Delta\varphi = \pm 20^\circ$) (см. рис. 5). Если подключение будет выполнено при прохождении напряжения через ноль, всплески тока и момента в начале пуска будут максимальными ($\Delta\varphi = -90^\circ$) (см. рис. 6).

5. При реализации схемы на однополюсных контакторах со стабильным временем срабатывания достаточно выполнение требований 2 и 3 без привязки подключения фазы *A* по величине фазного напряжения. При этом величина всплесков тока и момента будет носить случайный характер, но электрическая схема будет самая дешевая.

6. При реализации схемы реверсивного магнитного пускателя необходимо предусмотреть полную остановку двигателя через кнопку «Стоп» с последующим пуском в направлении «Назад».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров Л.Б., Масандилов, В.А. Ладензон. М.: Энергия, 1967. 200 с.
2. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М.: Энергоиздат, 1981. 84 с.
3. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. 2005. № 5. С. 57–61.
4. Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макаревич, А.В. Макаров // VIII Международная (XIX всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводе (АЭП). Саранск, 2014. С. 197–202.
5. Каширских В.Г., Переверзев С.С. Сравнительный анализ способов плавного пуска асинхронных электроприводов

- горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) ГИАБ, 2005 / Семинар № 17. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-0-199-207.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
7. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
8. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. US. 2006. 333 p. DOI 10.1002/9781119156079.
9. Cadirci I., Ermis M., Nalcacl E., Ertan B., Rahman M. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations, IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 14, Iss. 3, 1999. P. 402–412. DOI 10.1109/60.790889.
10. Ion Vlad, Aurel Campeanu, Sorin Enache, Monica-Adela Enache. Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017, DOI 10.1109/SIELMEN.2017.8123313.
11. Güdelhöfer J., Gottkehasch R., Möckelю A. Transient Model of Direct on Line Induction and Synchronous Reluctance Motors with Inter-bar Currents. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018. DOI 10.1109/ICELMACH.2018.8507162.
12. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008. 350 с.
13. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
14. Omelchenko E., Khramshin T., Tanich, V. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / Proceedings – 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2019. DOI 10.1109/PEAMI.2019.8915408.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617766. Динамическая математическая модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Тележкин О.А., Моисеев В.О., Енин С.С. // ОБПБТ. 2014. №8.
16. Омельченко Е.Я. Математическая модель трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2011. №15. С. 49–53.
17. Омельченко Е.Я., Моисеев В.О., Тележкин О.А. Математическая модель системы «Преобразователь частоты-асинхронный двигатель» с улучшенным пусковым моментом // АЭП 2012: труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе. Иваново, 2012. С. 169–172.
18. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
19. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. В 3-х т. Т. 1. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2003. 463 с.
20. Yanxia Lu, Chunyang Chen, Haichuan Tang, Ruikuo Liu. Simulation and research on direct torque control of asynchronous traction motor. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. 2010. Pp. 3423–3427.
21. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей / Е.Я. Омельченко, А.В. Белый, С.С. Енин, Н.В. Фомин // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №3(40). С. 12–19. DOI 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19.

Поступила в редакцию 03 апреля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

REDUCING OF VALUE OF STARTING CURRENT AND MOMENT OF ASYNCHRONOUS MOTOR WITH SQUIRREL CAGE ROTOR USING PHASE VOLTAGE SEQUENCE

Evgenii Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Aleksei B. Lyamar

Post-graduate student, Senior Lecturer, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lyamar.alexei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2783-3662>

Vasily O. Tanich

Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shift-91@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0098-6431

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electronic and Microelectronic, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.petushkov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-2523>

Relevance of this article is that direct-on-line start of asynchronous squirrel-cage motors is characterized by the appearance of peaks of inrush currents and weakly damped components of the electromagnetic moment, which in total leads to the voltage drop, accelerated wear of the insulation of the windings of asynchronous motors, impacts, resonant vibrations and deformation in the mechanical equipment. Therefore, the reduction of electrical and mechanical loads in the mechanical equipment of the metallurgical and mining industries due to the development of rational circuit solutions for direct-on-line of an asynchronous motor is an actual scientific and technical task. The aim of the article is to estimate the possibilities of limiting starting current and moments of an asynchronous squirrel-cage motor due to the sequence of supplying phase voltage to its stator windings. For this aim a dynamic computer model of a three-phase asynchronous motor was developed taking into account the peculiarities of connecting the stator winding to the mains during direct start-up, the necessary researches were carried out and the requirements for rational circuit solutions for asynchronous electric drives, leading to a reduction in electrical and mechanical loads, were determined.

Methods used in this article: theoretical researches were used with the methods of the theoretical foundations of electrical engineering, the theory of electrical machines, the theory of automatization and automated electric drive. The software package Matlab Simulink was used to calculate the computer model. Novelty: Reliable mathematical and computer models of three-phase asynchronous motors with power of 75, 200, 315 and 350 kW have been developed, which made it possible to research the dynamics of direct-on-line start options taking into account losses in stator steel, displacement of the rotor current, magnetization curve of the main stream, mechanical load and inertia rotor. Result: Delays in the supply of voltage to phases B and C can reduce the maximum torque to rated moment from 8.22 to 3.16 and the oscillation time from 0.29 s to 0.035 s. The dependences of the maxima of the stator current modulus and the electromagnetic moment are obtained depending on the angle of shift of the three phases of the supply voltage with respect to the zero initial conditions of the asynchronous motor. Practical relevance: The conclusions and requirements for circuit solutions for rational direct start are formulated, allowing us to control the maximum loads and oscillation at the beginning of a direct start.

Keywords: three-phase asynchronous squirrel-cage motor, computer model, direct-on-line start, oscillations of the moment, initial voltage values, schematic solutions.

REFERENCES

1. Sokolov M.M. Petrov L.P., Masandilov L.B., Ladenzon V.A. *Elektromagnitnyye perehodnyye protsessy v asinhronnom elektroprivode* [Electromagnetic transients of asynchronous electric drives]. Moscow: Energiya, 1967. 200 p. (In Russian)
2. Petrov L.P. *Upravlenie puskom i tormozheniem asinhronnykh dvigateley*. [Control of starting and stopping of asynchronous motors]. Moscow: Energoizdat, 1981. 84 p. (In Russian)
3. Vinogradov A.B. Taking into account losses in steel, saturation, and surface effect when modeling dynamic processes in a frequency-controlled asynchronous electric drive. *Elektrotehnika*. [Electrotechnic] 2005. No. 5. P. 57–61. (In Russian)
4. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarcheva E.V., Makarov A.V. Comparative evaluation of starting methods of induction motors by the vibrational component of the electromagnetic moment. *VIII Mezhdunarodnaya (XIX vserossiyskaya) konferentsiya po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2014* [VIII International (XIX Russian) Conference of Automatic Electric Drive AEP 2014], Saransk, 2014. P. 197–202. (In Russian)
5. Kashirskih V.G., Pereverzev S.S. Comparative analysis of soft start methods for asynchronous electric drives of mining machines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal) GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal) GIAB], 2005 / Seminar no. 17. DOI: 10.25018/02361493-2019-11-0-199-207. (In Russian)
6. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda: uchebnik dlya vuzov* [Theory of electric drive: Textbook for universities] Moscow: Energoatomizdat, 1985. 560 p. (In Russian)
7. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg: URO RAN, 2000. 654 p. (In Russian)
8. Bin Wu. High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. US. 2006. 333 p. DOI 10.1002/9781119156079

9. Cadirci I., Ermis M., Nalcacl E., Ertan B., Rahman M. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations, IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 14, Iss. 3, 1999. P. 402–412. DOI 10.1109/60.790889
10. Ion Vlad, Aurel Campeanu, Sorin Enache, Monica-Adela Enache. Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors. 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017, DOI 10.1109/SIELMEN.2017.8123313
11. Güdelhöfer J., Gottkehaskamp R., Möckelю A. Transient Model of Direct on Line Induction and Synchronous Reluctance Motors with Inter-bar Currents. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, 2018. DOI 10.1109/ICELMACH.2018.8507162
12. Voldek A.I., Popov V.V.. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric machines. AC machines]. St. Petersburg: Piter, 2008. 350 p. (In Russian)
13. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinhronnykh i sinhronnykh dvigateley*. [Operating modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p. (In Russian)
14. Omelchenko E., Khrumshin T., Tanich V. Dynamic Computer Model of Traction Asynchronous Motor / Proceedings – 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2019. DOI 10.1109/PEAMI.2019.8915408
15. Omelchenko E.Ya., Telezhkin O.A., Moiseev V.O., Enin S.S. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM # 2014617766. Dinamicheskaya matematicheskaya model trehfaznogo asinhronnogo dvigatelya s korotkozamknutyim rotorom* [Certificate of state registration of a computer program No. 2014617766. A dynamic mathematical model of a three-phase asynchronous motor with a short-circuited rotor] / OBPBT. 2014, no. 8. (In Russian)
16. Omelchenko E.Ya. Mathematical model of a three-phase asynchronous electric motor with a squirrel-cage rotor. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Vestnik SUSU. Series "Energy"]. 2011. No. 15. P. 49–53. (In Russian)
17. Omelchenko E.Ya., Moiseev V.O., Telezhkin O.A. The mathematical model of the "Frequency Converter-Asynchronous Motor" system with improved starting torque. *AEP 2012: Trudy VII Mezhdunarodnoy (XVIII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu*. [AEP 2012: Proceedings of the VII International (XVIII All-Russian) Conference on Automated Electric Drive]. Ivanovo, 2012. P. 169–172. (In Russian)
18. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik* [Asynchronous motors series 4A: Reference Book]. Moscow: Energoizdat, 1982. 504 p. (In Russian)
19. K.S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-h t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 1*. [Theoretical fundamentals of electrical engineering: Textbook for universities. Vol. 1] St. Petersburg: Piter, 2003. 463 p. (In Russian)
20. Yanxia Lu, Chunyang Chen, Haichuan Tang, Ruikuo Liu. Simulation and research on direct torque control of asynchronous traction motor. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. 2010. P. 3423–3427.
21. Omelchenko E.Y., Belyj A.V., Enin S.S., Fomin N.V. Energy-efficient test facility for electric motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. [Electrotechnical Systems and Complexes] 2018. №3(40). P. 12–19. DOI 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19. (In Russian)

Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений / Е.Я. Омелченко, А.Б. Лымарь, В.О. Танич, М.Ю. Петушков // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 47–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54)

Omelchenko E.Ya., Lyamar A.B., Tanich V.O., Petushkov M.Yu. Reducing of Value of Starting Current and Moment of Asynchronous Motor with Squirrel Cage Rotor Using Phase Voltage Sequence. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 47–54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54)