

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

Прямой пуск от сети любых асинхронных короткозамкнутых двигателей характеризуется возникновением пиковых бросков пусковых токов и слабозатухающих колебаний электромагнитного момента, что может приводить к просадкам напряжения, износу изоляции обмоток, ударам, биению, резонансным колебаниям механического оборудования. Данные слова справедливы не только для распространенных в промышленности трехфазных двигателей, но и для двухфазных и однофазных двигателей, частным случаем которых являются незаменимые в быту и вспомогательных системах маломощные конденсаторные двигатели. Двухфазные двигатели слабо распространены, но они являются регулируемым аналогом однофазных двигателей, а потому в дальнейшем могут заменить их во многих сферах применения. Другое возможное применение двухфазных двигателей – замена двигателей постоянного тока в тяговых приводах, применяемых в механическом оборудовании металлургической, горной промышленности, электротранспорте, то есть тех сферах, где электрические и механические нагрузки оказывают наиболее негативное влияние. Их снижение или устранение всегда будет являться актуальной научно-технической задачей. Целью статьи является определение возможности снижения пусковых токов и моментов двухфазного асинхронного двигателя за счет последовательности подачи напряжения на каждую обмотку статора. Для данной оценки разработана компьютерная модель прямого пуска двухфазного двигателя, проведены необходимые исследования и определены требования к очередности подключения к сети. Для исследования математической модели использовался пакет программ Matlab Simulink. Исследования показали, что задержка подключения к сети второй фазы двухфазного двигателя значительно снижает максимальные значения тока и момента и устраняет их начальные колебания. Однако, в отличие от трехфазных двигателей, решающее действие оказывает угол начального сдвига фаз, что накладывает дополнительное требование к рациональной системе прямого пуска двухфазных асинхронных двигателей.

Ключевые слова: двухфазный асинхронный двигатель, однофазный двигатель, компьютерная модель, прямой пуск, колебания момента, пусковой ток, угол начального сдвига фаз, начальные значения напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы механического оборудования определяется надежностью работы их электроприводов. Большинство маломощных механизмов (деревообрабатывающие станки, бетономешалки, насосы, компрессоры) приводятся в движение с помощью нерегулируемых однофазных асинхронных двигателей посредством прямого пуска от однофазной сети [1, 2]. Стоит отметить, что большинство таких двигателей выпускаются типовыми сериями и устанавливаются на механизм только в соответствии с мощностными параметрами. Как следствие, их работа характеризуется существенной механической нагрузкой и инерционностью привода, возникают пиковые броски пусковых токов и слабозатухающие колебательные составляющие электромагнитного момента [3]. Все это приводит к просадке напряжения, ускоренному износу изоляции обмоток двигателя, ударам, резонансным колебаниям [4]. Поэтому снижение электрических и механических нагрузок за счет разработки схемных решений при прямом пуске однофазных двигателей является актуальной научно-технической задачей во всех сферах промышленности и области бытовой техники.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПРЯМОГО ПУСКА ОДНОФАЗНЫХ И ДВУХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье [4] подобные проблемы и пути их решения описывались для трехфазного асинхронного

электропривода. Было установлено, что пиковые броски тока и момента и их последующие колебания при прямом пуске можно снизить путем подачи напряжения на каждую фазу двигателя с последовательными задержками. Цель данной работы – показать применимость данной концепции и к однофазным асинхронным двигателям.

Эта цель выглядит вполне достижимой, поскольку в подобных статьях, касающихся трехфазных АД, объектом исследования служили двухфазные динамические модели с некоторыми особенностями трехфазных машин [5-6]. Двухфазная же машина имеет подобную приведенную форму в чистом виде [7].

Известно, что однофазный двигатель не образует вращающегося магнитного поля, а значит, не имеет пускового момента [8]. Для возможности запуска в однофазный двигатель добавляют вторую пусковую обмотку, расположенную под углом 90° относительно рабочей. Чаще всего фазосмещающим элементом для подключения пусковой обмотки является конденсатор, потому такой двигатель называют конденсаторным [8]. После разгона пусковая обмотка может отключаться, а может продолжать работать. Асинхронный двигатель, у которого вторая обмотка питается независимо от первой, называют двухфазным (ДАД). Главное достоинство двухфазного двигателя по сравнению с однофазным – возможность регулирования скорости посредством изменения напряжения на обеих обмотках [9].

Конечно, в этом случае прямой пуск от однофазной сети невозможен, требуется преобразователь частоты, а значит, вместо двухфазного двигателя в тех же условиях может быть применен и трехфазный. Однако двухфазный будет иметь больший момент и меньшую скорость по сравнению с аналогичным трехфазным за счет размещения большего количества полюсов статора при тех же массо-габаритных параметрах [10].

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Объектом управления (двухфазным двигателем) математической модели выступает блок *Single Phase Asynchronous Machine* из библиотеки *SimPowerSystem* программы *Matlab Simulink*, работающий в режиме раздельного управления основной и вспомогательной обмотками. Его структурная схема показана на рис. 1.

Данная модель двигателя описана в [11], она имеет самые распространенные допущения: обмотки статора и ротора распределены по пазам равномерно и создают синусоидальные намагничивающие силы; зубцовые пульсации потока не учитываются; вихревые токи учтены в виде сопротивлений потерь в стали.

Структурная схема основана на разделении двух обмоток статора и ротора, составляющих четыре малых контура, и их взаимовлиянии. Напряжения статора U_a, U_b из двухфазной неподвижной системы координат AB пересчитываются в потокосцепления статора Φ_{qs}, Φ_{ds} в двухфазной вращающейся системе координат dq . Учитывая потокосцепления ротора Φ'_{qr}, Φ'_{dr} рассчитываются взаимные потокосцепления в системе координат dq Φ_{mq}, Φ_{md} . q -составляющая потокосцепления ротора Φ'_{qr} определяется на основе взаимной q -составляющей потокосцепления с учетом влияния противоположающего потокосцепления ротора Φ'_{dr} . Аналогично рассчитывается и потокосцепление Φ'_{dr} . Блоки обратной связи в каждом из четырех малых контуров служат для расчета векторов ЭДС двух статорных и двух роторных обмоток. На основе рассчитанных потокосцеплений определяются токи статора и ротора в системе координат dq . На основе токов и потокосцеплений ротора рассчитывается электромагнитный момент ротора. На основании момента двигателя, момента нагрузки и момента инерции рассчитывается угловая скорость двигателя, которая учитывается и при расчете составляющих потокосцеплений ротора.

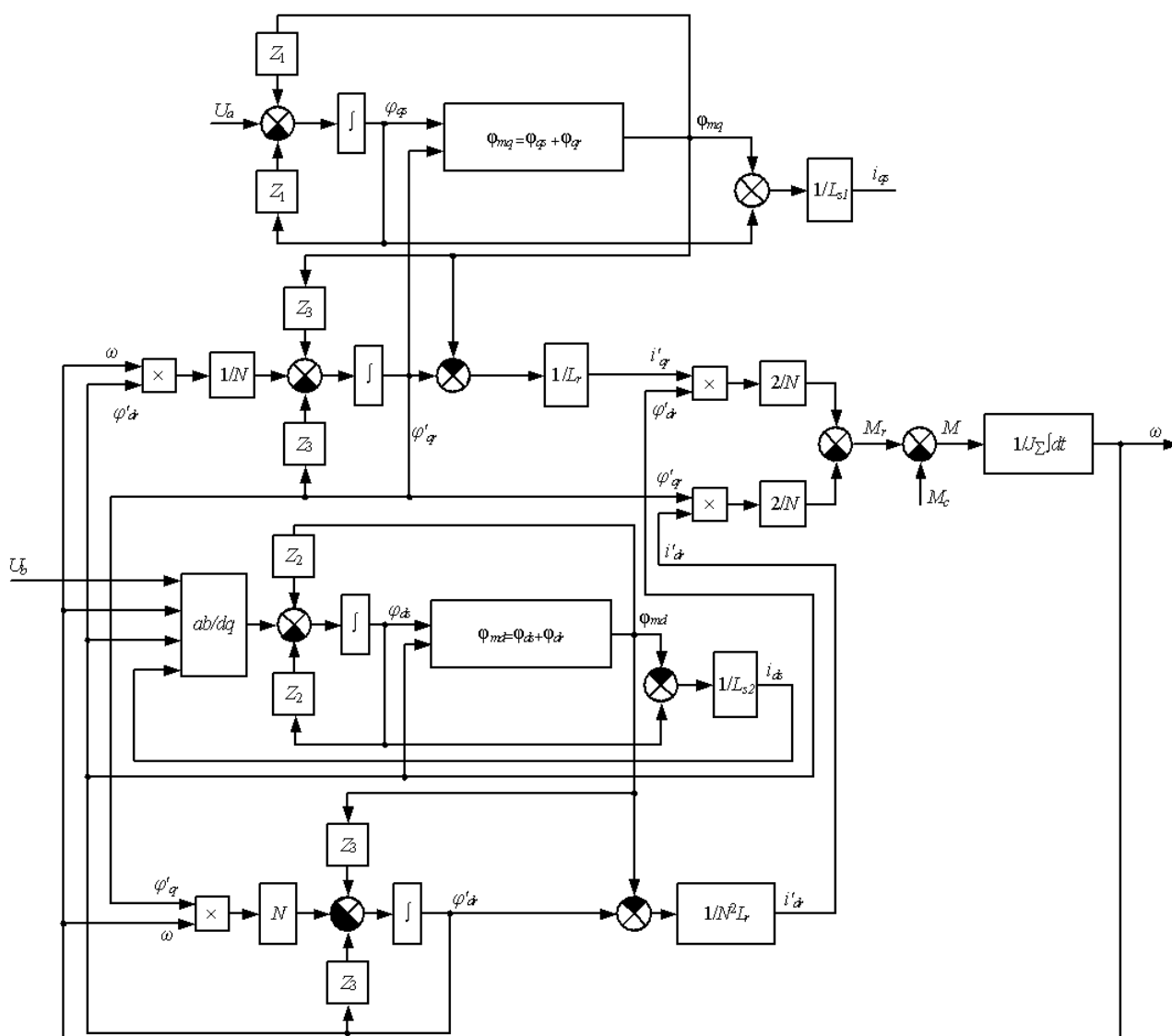


Рис. 1. Структурная схема модели двухфазного двигателя

Стандартный двигатель из библиотеки имеет параметры, соответствующие асимметричному однофазному двигателю с добавочной обмоткой. Однако в нашем эксперименте исследуется симметричный двухфазный двигатель, вследствие чего у двигателя из библиотеки были изменены несколько параметров в соответствии с табл. 1.

Как видно из таблицы, двигатель имеет нетипичные для РФ номинальную мощность, измеряемую в лошадиных силах, и номинальную частоту 60 Гц. Данные параметры остаются неизменными, поскольку нам для моделирования важно иметь номинальный режим работы двигателя. Модель прямого пуска двухфазного АД показана на рис. 2.

Основные параметры модели двухфазного асинхронного двигателя из библиотеки *SimPowerSystem*

Параметр	Значение
Номинальная мощность	0,25 л.с. (187 Вт)
Номинальное напряжение статора	110 В
Номинальная частота	60 Гц
Сопротивление первой обмотки статора	2,02 Ом
Индуктивность первой обмотки статора	7,4 мГн
Сопротивление второй обмотки статора	2,02 Ом
Индуктивность второй обмотки статора	7,4 мГн
Сопротивление обмотки ротора	4,12 Ом
Индуктивность обмотки ротора	5,6 мГн
Взаимная индуктивность обмоток	177,2 мГн
Момент инерции	0,0146 кг·м ²
Коэффициент трения	0
Число пар полюсов	2
Коэффициент соотношения обмоток статора	1

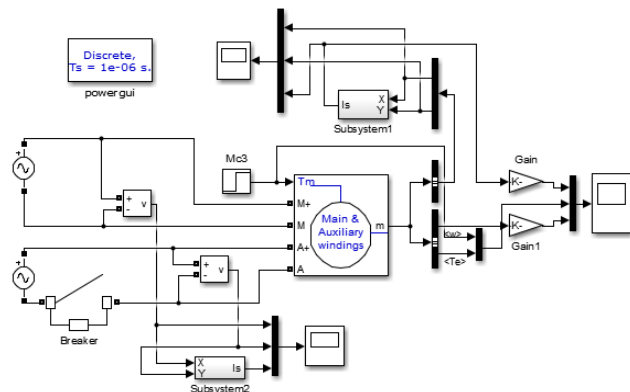


Рис. 2. Модель прямого пуска двухфазного двигателя

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПУСКА ДВУХФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 3 показаны переходные процессы тока статора, момента и угловой скорости вращения при обычном прямом пуске под нагрузкой, рассчитанные с помощью компьютерной модели.

Данные кривые представлены в относительных единицах, при этом скорость в масштабе 10:1. Время прямого пуска составляет 0,7 с. На интервале времени от 0 до 0,25 с в кривых тока и момента выражены существенные, слабозатухающие колебания частотой до 60 Гц.

Графики двухфазного напряжения статора и его модуля, а также двухфазного тока и его модуля показаны на рис. 4.

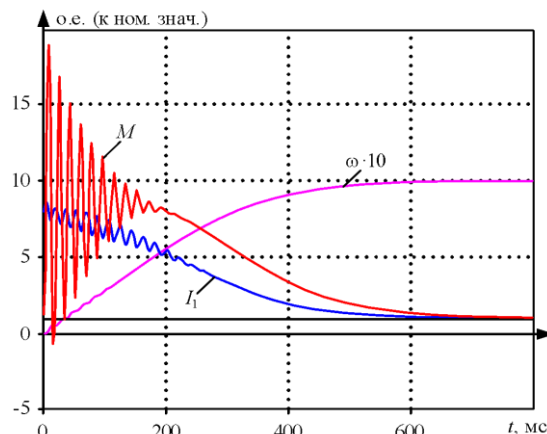


Рис. 3. Переходные процессы прямого пуска

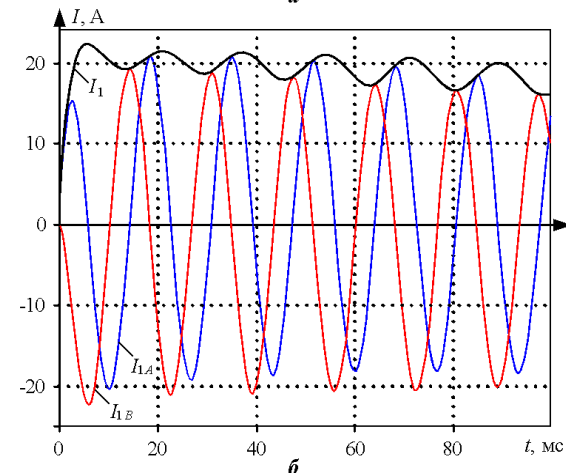
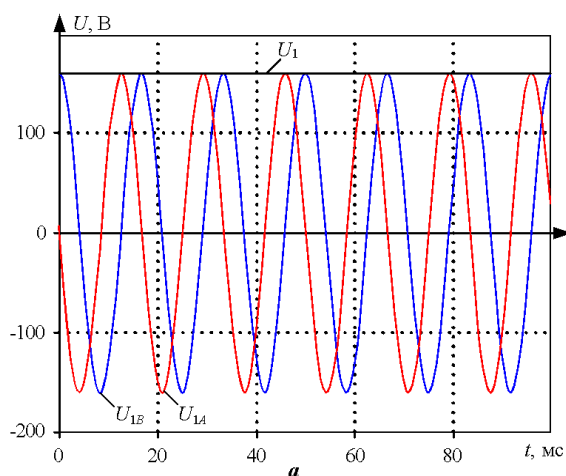


Рис. 4. Переходные процессы прямого пуска:
а – напряжения обмоток статора; б – токи статора

Наличие слабозатухающих колебаний на графиках переходных процессов объясняется разницей начальных значений фазных напряжений, изменяющихся по формуле (1) и при прямом пуске подаваемых на статорные обмотки одновременно [12].

$$\begin{cases} U_{1a}(t) = U_{1m} \cos(\omega t + \Delta\varphi); \\ U_{1b}(t) = U_{1m} \cos(\omega t + \Delta\varphi + \pi/2), \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – начальный угол сдвига двух фаз питающего напряжения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКА С ЗАДЕРЖКОЙ ВТОРОЙ ФАЗЫ

Согласно предыдущим исследованиям для исключения слабозатухающих свободных колебаний трехфазного двигателя при прямом пуске напряжения на обмотки *B* и *C* необходимо подавать с задержкой на 120 и 240 эл. град соответственно [4]. Проверим выполнение данного утверждения для двухфазного двигателя, для чего обеспечим задержку подачи напряжения на вторую обмотку *B* статора на 90 эл. град, то есть на 4,2 мс (при частоте двигателя и сети 60 Гц). Вид графиков напряжения и токов статора при задержке напряжения показан на **рис. 5**, кривые модуля тока статора, электромагнитного момента и угловой скорости приведены на **рис. 6**.

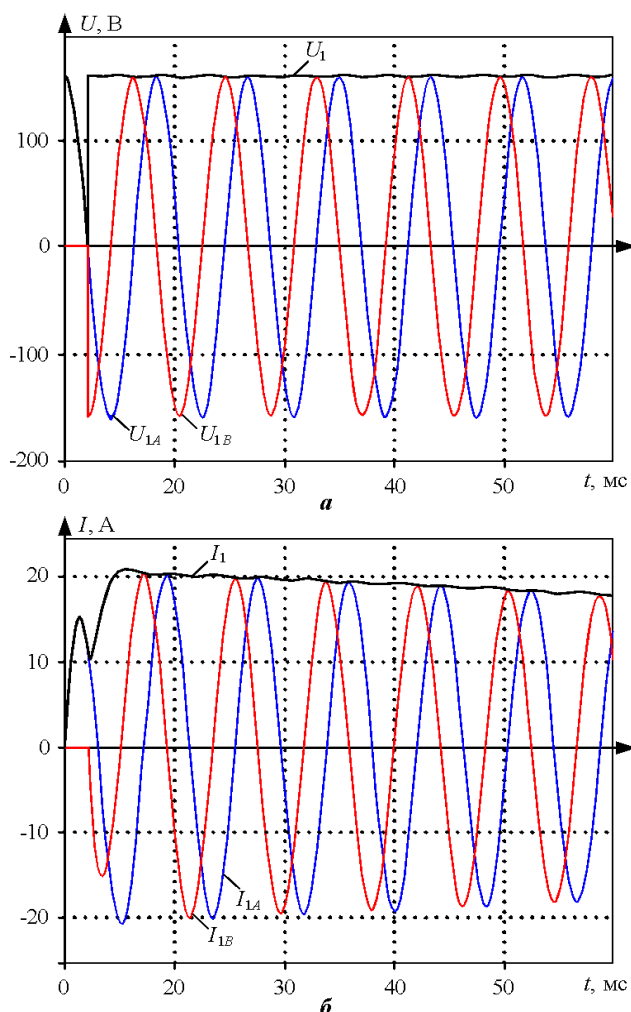


Рис. 5. Переходные процессы при пуске с задержкой

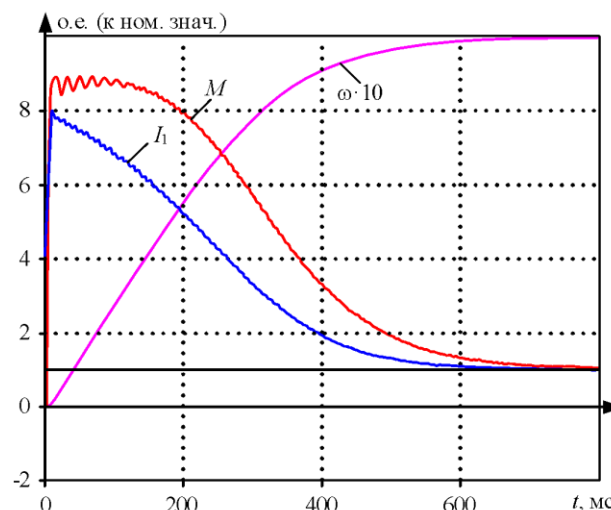


Рис. 6. Переходные процессы при пуске с задержкой подачи напряжения на вторую фазу

Время переходного процесса не изменилось и составляет примерно 700 мс. Максимумы тока и момента уменьшились до 8,00 и 8,95 о.е. соответственно. Однако время затухания колебаний тока и момента оказалось равно времени переходного процесса угловой скорости. Амплитуда этих колебаний невелика, она составляет около 0,02 о.е., потому ими можно пренебречь. В начале пуска на графике момента видны колебания другого рода, с амплитудой до 0,5 о.е. и временем затухания 110 мс. Именно они подлежат сравнению с колебаниями при прямом пуске без задержек, время затухания которых составляло 200 мс.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА СДВИГА ФАЗ

Из формулы (1) видно, что в предыдущих моделях мы не учитывали угол сдвига фаз $\Delta\varphi$, являющийся начальным углом для каждой фазы по отношению к нулевым начальным условиям АД. На модели прямого пуска ДАД без задержки было установлено, что переходные процессы не зависят от угла сдвига $\Delta\varphi$, так же как и у трехфазного АД.

Для трехфазного двигателя известно, что ненулевой угол сдвига при задержанной подаче фазных напряжений влияет на качество переходных процессов пуска, однако их качество сохраняется [4]. Проверим данное утверждение для ДАД с задержкой. На **рис. 7** приведены переходные процессы при задержанной подаче напряжения и $\Delta\varphi = 90^\circ$, по которым видно, что время переходных процессов и время затуханий колебания электромагнитного момента и тока стали такими же, как у прямого пуска без задержек, а максимумы тока и момента выросли до 9,13 и 22,7 о.е. соответственно.

На **рис. 8** и **9** представлены зависимости максимумов тока и момента соответственно от угла сдвига напряжений в начале пуска ДАД при задержке подачи напряжения на вторую фазу.

Приведенные зависимости тока и момента имеют явно выраженные минимумы $\Delta\varphi = -10^\circ$ и $\Delta\varphi = 0^\circ$ соответственно, при которых максимальные ток и момент будут равны 7,90 и 8,95 о.е. Максимальные значения тока и момента будут при $\Delta\varphi = 90^\circ$ и составят 9,14 и 22,7 о.е.

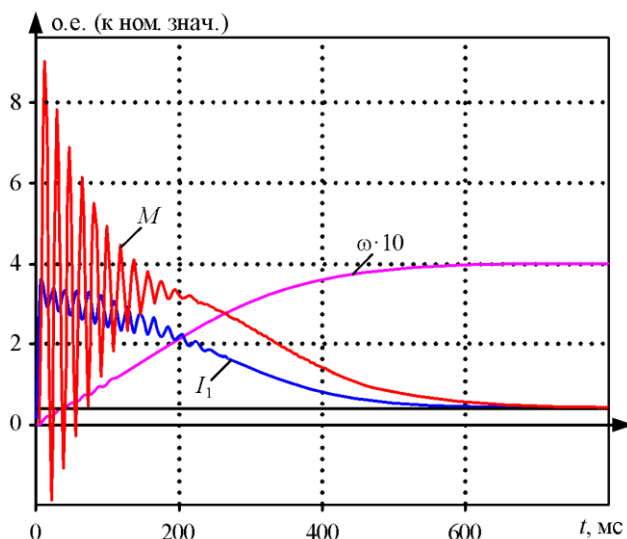


Рис. 7. Переходные процессы при пуске с задержкой подачи напряжения на вторую фазу

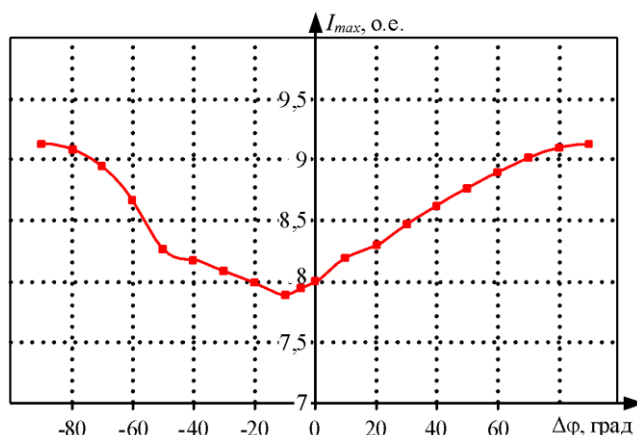


Рис. 8. Зависимость максимума тока от угла сдвига

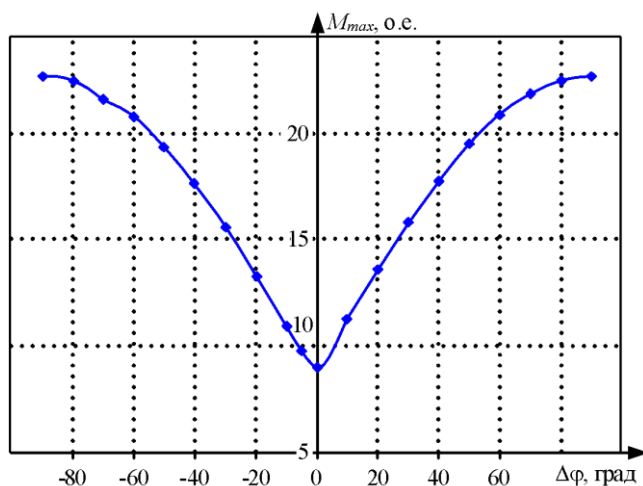


Рис. 9. Зависимость максимума момента от угла сдвига

Полученные зависимости показывают, что угол сдвига значительно влияет на максимальные значения тока и момента, а также на характер начальных колебаний момента, которые незначительны только при очень малом диапазоне значений угла сдвига. Установлено, что они минимальны при $\Delta\varphi = -1^\circ$. Таким образом, при прямом пуске двухфазного АД с задержанной подачей напряжения на вторую фазу нежелательно

регулировать максимумы тока и момента с помощью угла начального сдвига фаз. Данный способ пуска должен осуществляться с помощью устройства, точно определяющего текущую точку на синусоиде сетевого напряжения и коммутирующего первую фазу, а за ней и вторую в строго заданные моменты времени.

Выводы

На основании исследований можно сделать следующие выводы:

1. Как и у трехфазного двигателя, в начале прямого пуска при одновременной подаче напряжения в кривых тока статора и электромагнитного момента двухфазного АД явно выражены слабозатухающие колебания с частотой, доходящей до частоты питающей сети, но амплитуда колебаний момента у двухфазного двигателя в относительных единицах значительно больше, чем у трехфазного.

2. При одновременной подаче двухфазного напряжения начальный угол сдвига напряжения статора не влияет на форму переходных процессов.

3. При задержке подачи напряжения на вторую фазу на 90° эл. град приводит к значительному уменьшению амплитуды колебаний момента в начале пуска, однако высокочастотные низкоамплитудные незатухающие колебания тока и момента продолжают действовать на всем протяжении переходного процесса, хотя и не оказывают влияние на переходные процессы скорости.

4. При задержке подачи напряжения на вторую фазу начальный угол сдвига фаз статора существенно влияет на максимумы модуля тока и электромагнитного момента. При этом диапазон угла сдвига, при котором колебания момента в начале пуска незначительны, минимален, и угол сдвига фаз не подлежит широкому регулированию.

5. Для осуществления описанного алгоритма сглаживания колебаний тока и момента при прямом пуске двухфазного двигателя необходимо устройство, определяющее текущее значение на синусоиде сетевого напряжения и коммутирующее первую фазу двухфазного двигателя точно в момент максимального значения действующего фазного напряжения, а вторую фазу – строго через 90° эл. град (при условии, что сетевые напряжения двух фаз сдвинуты на 90° эл. град относительно друг друга).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, описанное в статье, показало, что путем задержки подачи напряжения на вторую фазу можно добиться снижения пульсаций электромагнитного момента и тока статора двухфазного двигателя при прямом пуске от сети. Подобным способом можно добиваться улучшения характеристик и однофазного двигателя с добавочной пусковой обмоткой. Однако для двухфазного двигателя требуется большая точность коммутации фазных цепей, обеспечить которую возможно при электронном управлении. Следующим шагом в данном исследовании видится создание устройства, осуществляющего данную коммутацию и смещение цепи питания второй фазы относительно первой.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdel-Rahim N., Shaltout A. Operation of single-phase induction motor as two-phase motor // IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON). 2002. Vol. 2. Pp. 967-972. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185403
2. Мешков А.С., Суздорф В.И. Статические и динамические характеристики системы стабилизации скорости однофазным коллекторным двигателем с нелинейной обратной связью // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 2. С. 139-143.
3. Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2012. 482 p.
4. Снижение пусковых токов и моментов асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет последовательности фазных напряжений / Е.Я. Омельченко, А.Б. Лымарь, В.О. Танич, М.Ю. Петушков // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2(47). С. 47-54. DOI 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54.
5. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Система управления асинхронным электроприводом с принудительным заданием скольжения // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. № 1. С. 24-28.
6. Мещеряков В.Н., Данилов В.В. Ограничение колебаний электромагнитного момента асинхронного двигателя при скалярном частотном управлении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 3. С. 88-97. DOI 10.14529/power180311.
7. Kumsuwan Y., Srirattanawichaikul W., Premrudeepreechacharn S. Analysis of two-phase induction motor using dynamic model based on MATLAB/Simulink // Asian Journal on Energy and Environment. 2010. Vol. 11. No. 1. Pp. 48-59.
8. Диагностика конденсаторных однофазных асинхронных двигателей с учетом технологических и эксплуатационных факторов / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, О.А. Бойкова, Д.Ю. Пашали // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. № 34 (251) С. 28-34.
9. Hayakwong E., Kinnaree V., Bunlaksanunusorn C. Two-phase induction motor drive improvement for PV water pumping system // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE. 2016. Pp. 1-6.
10. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations / A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev, O.V. Kryukov // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE. 2019. Pp. 444-449. DOI 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487.
11. Collins E.R., Puttgen H.B., Sayle W.E. Single-phase induction motor adjustable speed drive: Direct phase angle control of the auxiliary winding supply // Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 1988. Pp. 246-252. DOI 10.1109/IAS.1988.25070.
12. Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов // Вестник ИГЭУ. 2019. № 3. С. 49-61. DOI 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061.

Поступила в редакцию 26 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

REDUCING THE VALUES OF INITIAL CURRENT AND TORQUES OF A TWO-PHASE INDUCTION MOTOR DUE TO DELAYS OF PHASE VOLTAGES

Aleksey S. Belousov

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: 011bas962@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9464-2260>.

Viktor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Direct start-up of any induction squirrel-cage motors is characterized by the occurrence of peak inrush currents and weakly damped oscillations of the electromagnetic torque, which can lead to voltage drops, deterioration of the winding insulation, shock, beating, resonant oscillations of mechanical equipment. These words are true not only for three-phase motors, which are common in the industry, but also for two-phase and single-phase motors, a special case of which are low-power capacitor motors that are indispensable in everyday life and in auxiliary systems. Two-phase motors are not widely used, but they are a controlled analogue of single-phase motors and therefore can subsequently replace them in many areas of application. Another possible application of two-phase motors is the replacement of DC motors in traction drives used in mechanical equipment of the metallurgical, mining, electric transport industries, that is, those areas where electrical and mechanical loads have the most negative impact. Their reduction or elimination will always be an urgent scientific and technical task. The purpose of the article is

to determine the possibility of reducing the starting currents and moments of a two-phase asynchronous motor due to the sequence of voltage supply to each stator winding. To achieve this, a computer model of direct start-up of a two-phase motor was developed, the necessary studies were carried out and the requirements for the sequence of connection to the network were determined. To study the mathematical model, the Matlab Simulink software package was used. Studies have shown that a delay in connecting the second phase of a two-phase motor to the network significantly reduces the maximum current and torque values and eliminates their initial fluctuations. However, unlike three-phase motors, the angle of the initial phase displacement has a decisive effect, which imposes an additional requirement on a rational system of direct starting of two-phase asynchronous motors.

Keywords: two-phase asynchronous motor, single-phase motor, computer model, direct start, torque fluctuations, starting current, angle of initial phase shift.

REFERENCES

1. Abdel-Rahim N., Shaltout A. Operation of single-phase induction motor as two-phase motor. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, 2002, no. 2, pp. 967-972. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185403.
2. Meshkov A.S., Suzdorf V.I. Static and dynamic characteristics of the speed stabilization system with a single-phase collector motor with nonlinear feedback. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzhya* [Scientific and technical bulletin of the Volga region], 2011, no. 2, pp. 139-143. (In Russian)
3. Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models. United Kingdom, JohnWiley&Sons Ltd, 2012. 482 p.
4. Omelchenko E.Ya., Lyman 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. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 47-54. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-47-54. (In Russian)
5. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Asynchronous electric drive control system with forced slip reference. *Vestnik Lipetskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Lipetsk State Technical University], 2017, no. 1, pp. 24-28. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Danilov V.V. Limiting electromagnetic torque fluctuations of an induction motor with scalar control. *Vestnik Juzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 88-97. DOI: 10.14529/power180311. (In Russian)
7. Kumsuwan Y., Srirattanawichaikul W., Premrudeepreechacharn S. Analysis of two-phase induction motor using dynamic model based on MATLAB/Simulink. *Asian Journal on Energy and Environment*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 48-59.
8. Ismagilov F.R., Hairullin I.H., Boykova O.A., Pashali D.Y. Diagnostics of capacitor single-phase induction motors taking into account technological and operational factors. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2011, no. 34 (251), pp. 28-34. (In Russian)
9. Hayakwong E., Kinnaree V., Bunlaksanunusorn C. Two-phase induction motor drive improvement for PV water pumping system. 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2016, pp. 1-6.
10. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a Control Algorithm for Three-Phase Inverter in Two-Phase Electric Drives Reducing the Number of Commutations. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE, 2019, pp. 444-449. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487.
11. Collins E.R., Puttgen H.B., Sayle W.E. Single-phase induction motor adjustable speed drive: Direct phase angle control of the auxiliary winding supply. Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1988, pp. 246-252. DOI: 10.1109/IAS.1988.25070.
12. Meshcheryakov V.N., Belousov A.S. Development of a control algorithm for three-phase inverter of two-phase electric drive to reduce the number of switching. *Vestnik IGEU* [Bulletin of the Ivanovo State Technical University], 2019, no. 3, pp. 49-61. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061. (In Russian)

Белоусов А.С., Мещеряков В.Н. Снижение пусковых токов и моментов двухфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя за счет задержек фазных напряжений // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 4(49). С. 42-48. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-42-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-42-48)

Belousov A.S., Meshcheryakov V.N. Reducing the Values of Initial Current and Torques of a Two-Phase Induction Motor Due to Delays of Phase Voltages. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 42-48. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-42-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-42-48)