

УДК 621.313.3

С.И. Качин, О.С. Качин, А.В. Киселев, Л.Ю. Бурцев

Исследование конструкции однофазного асинхронного двигателя с повышенным пусковым моментом

Показана необходимость повышения пускового момента однофазного асинхронного двигателя. Предложено конструкторское решение изменения геометрии статора. С помощью симуляции в программных продуктах ANSYS Maxwell и ANSYS Simlорer выполнено моделирование различных модификаций статора асинхронного двигателя. Отмечены варианты модифицированных конструкций однофазного электродвигателя с улучшенными пусковыми свойствами.

Ключевые слова: Однофазный асинхронный двигатель, пусковой момент, механическая характеристика, моделирование, магнитное поле, немагнитный зазор, статор, ANSYS, Maxwell, Simlорer.

В настоящее время асинхронные электродвигатели (АД) являются основой силового электропривода, применяемого в различных областях человеческой деятельности. Известно, что от всей производимой электрической энергии в нашей стране, данный вид электрических машин потребляет до 50% энергии [1], а доля однофазных асинхронных двигателей от общего числа АД составляет около 30%.

Широкое распространение однофазные АД получили в различных сферах применения, преимущественно бытовых, таких как холодильные установки, стиральные машины, станки по обработке дерева и металла, системы вентиляции и отопления, а также в других сферах. Для большинства перечисленных устройств важно, чтобы электродвигатель имел высокий номинальный момент, а также обладал высокой кратностью пускового момента:

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad (1)$$

где M_{Π} – пусковой момент, Н×м; $M_{\text{НОМ}}$ – номинальный момент, Н×м.

Высокая кратность пускового момента особенно необходима для двигателя, применяемого в приводе компрессоров холодильных установок, для обрабатывающих станков по дереву и металлу, а также для различных дробильных и измельчительных установок. Особенно актуальна данная проблема, проявляется при питании устройств от сети с пониженным напряжением, что часто встречается в нашей стране в отдаленных районах, в сельской местности и даже в пригородных поселках.

Повышение номинального момента, а также повышение пускового момента однофазных асинхронных электродвигателей является актуальной задачей для предприятий, занимающихся проектированием и производством данных двигателей. Решение указанной задачи позволит обеспечить стабильную и безопасную работу вышеперечисленных устройств. Кроме этого, для некоторых устройств и приборов за счет увеличения кратности пускового момента можно будет рекомендовать асинхронные двигатели меньшей мощности, что позволит решить ряд других задач:

- снижение массо-габаритных показателей установок;
- расширение возможностей и областей применений некоторых изделий;
- уменьшение стоимости готового изделия за счет снижения расхода активных материалов.

Постановка задачи. В настоящий момент времени известны разные технические решения, позволяющие решать задачи по повышению момента [2, 3]. Одно из таких решений предложено коллективом авторов Томского политехнического университета [4]. Основная суть предложенного решения заключается в том, что в ядре статора в области пазов, расположенных в зонах магнитных осей основной обмотки, выполнены немагнитные зазоры с образованием мостиков насыщения. Это позволяет снизить индуктивность ротора до двух раз по сравнению с обычной конструкцией статора. В результате снижения индуктивности обмотки ротора удастся достичь снижения величины индуктивного сопротивления фазы ротора, и, соответственно, повышения пускового момента.

В данной работе объектом исследований стал однофазный асинхронный двигатель с рабочей и пусковой обмотками, используемый в шлифовальных машинах настольного исполнения (электрото-

чило «Томск-УХЛ 4», потребляемая мощность $P = 460 \text{ В} \times \text{А}$, напряжение питания $U = 220 \text{ В}$, номинальная частота вращения $n = 2700 \text{ мин}^{-1}$).

Целью проведенных исследований являлся анализ механических характеристик (пусковой, средний и максимальный моменты) нескольких вариантов исполнения однофазного асинхронного электродвигателя при равных условиях испытаний:

1 вариант. Электродвигатель с традиционной конструкцией статора серийного производства (прототип).

2–4 варианты. Электродвигатели модернизированной конструкции, изготовленные в соответствии с предложенным техническим решением и отличающиеся друг от друга расположением немагнитных зазоров в статоре электродвигателя.

Моделирование модификаций статора асинхронного двигателя. Первым этапом работы было создание различных геометрических моделей в программном продукте ANSYS Spaceclaim. Результатом этой работы стало создание четырех моделей: модель серийной конструкции однофазного электродвигателя и трех вариантов модификаций. При помощи программной платформы ANSYS Workbench была интегрирована геометрия в среду ANSYS Maxwell 2D.

Имитационное моделирование осуществлялось с помощью современных программных продуктов ANSYS Maxwell 2D и ANSYS Simplorer [5, 6]. С помощью приложения ANSYS Maxwell 2D была проведена симуляция работы асинхронного электродвигателя в режиме холостого хода и получены механические характеристики. Для оценки величины индукции в элементах магнитопровода асинхронного электродвигателя было получено распределение магнитного поля в поперечном сечении электродвигателя. Приложение ANSYS Simplorer применялось для связи модели асинхронного электродвигателя в среде Maxwell 2D с электрической схемой, учитывающей полное сопротивление обмоток статора и позволяющей осуществлять коммутацию пусковой обмотки статора. На рисунке 1 представлена электрическая схема управления однофазным асинхронным электродвигателем, построенная в среде ANSYS Simplorer.

Питание данной схемы осуществляется от однофазного источника переменного напряжения E1. С помощью элементов R1 и R2 учитывались активные сопротивления лобовых частей рабочей и пусковой обмоток соответственно. Аналогично с помощью элементов L1 и L2 были учтены индуктивные сопротивления обеих обмоток. Блок AM отвечает за модель магнитного состояния, рассматриваемого однофазного асинхронного электродвигателя. Блоки ROTB_ROT1, MASS_ROT1 и VM_ROT1 применяются для механической связки двух программных приложений, управления значениями момента инерции и демонстрации механических характеристик. Коммутация пусковой обмотки осуществляется посредством блоков S1 и STEP1.

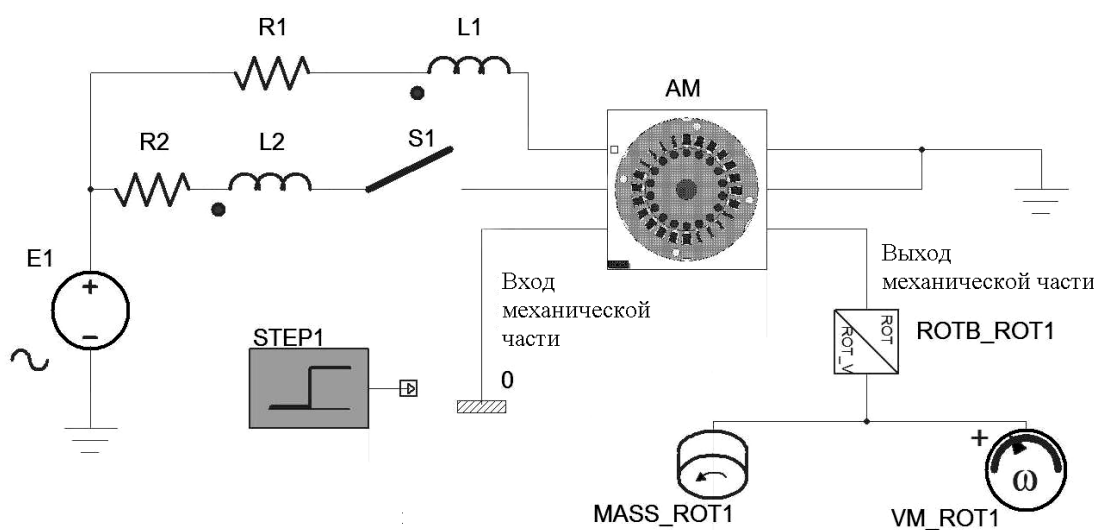
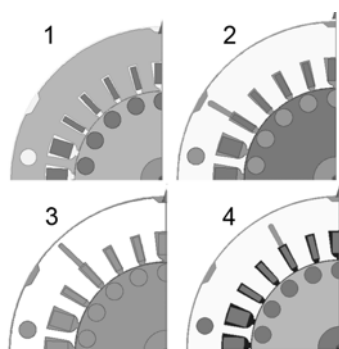


Рис. 1. Схема управления однофазного асинхронного электродвигателя

Отключение пусковой обмотки происходит через заданный промежуток времени. При моделировании учитывался момент инерции вращающихся масс ротора электродвигателя и шлифовальных



кругов. Варианты модификаций электродвигателя предложенной конструкции отличаются местом расположения немагнитных зазоров в статоре и представлены на рис. 2. Характеристики конструкционных материалов асинхронного электродвигателя во всех исследованных моделях одинаковы и соответствуют прототипу. Полное время расчета, шаг расчета и размеры конечных элементов во всех исследованных моделях также одинаковы.

Рис. 2. Расположение немагнитных зазоров на статоре:
1 – прототип, 2–4 – модификации

Кроме механических характеристик исследуемых электродвигателей оценивались и сравнивались с данными прототипа следующие параметры:

- время разгона до номинальной частоты вращения;
- значения токов в статорных обмотках;
- величина индукции в различных частях магнитной цепи асинхронных электродвигателей.

В результате выполненных расчетов получена картина распределения магнитного поля в поперечном разрезе серийного однофазного асинхронного электродвигателя шлифовальной машины (прототип), представленная на рисунке 3. Картина поля указана для момента времени при котором электродвигатель достигает номинальной частота вращения (об/мин) при отключенной пусковой обмотке.

Из представленной картины распределения магнитного поля в поперечном разрезе прототипа видно, что в ярме магнитопровода статора величина индукции не превышает предела 1,7 Тл. Указанное значение индукции является допустимым для применяемой в этих двигателях марки электротехнической стали (Ст 2013). Максимальное значение индукции достигает 3 Тл и отмечается лишь в местах высокой концентрации напряжений: крайние области коронок зубцов статора, технологические отверстия, зона сварного шва магнитопровода статора. Данные области имеют локальный характер и обусловлены технологией штамповки листов магнитопровода. Аналогичные области отмечаются и в магнитопроводе ротора.

Стоит отметить, что в рассмотренных модификациях однофазного электродвигателя (2-4 модификации) с немагнитными зазорами в ярме магнитопровода статора значения индукции увеличились незначительно и не превышает порога 1,9 Тл в области, примыкающей к немагнитному зазору.

В рассмотренных модификациях изменения тока в пусковой обмотке в сравнении с прототипом незначительны. Наибольшее отклонение тока в сторону увеличения относительно тока прототипа зафиксировано в модификации №2 и составляет не более 7%.

Время разгона до номинальной частоты вращения во всех рассмотренных модификациях относительно прототипа было сокращено. Подробнее результаты представлены в таблице.

В данной работе были рассмотрены несколько вариантов расположения немагнитных зазоров в зоне пусковой обмотки. Для каждой из конструкций были получены значения пускового, среднего и максимального моментов. Результаты моделирования указанных конструкций обобщены и представлены в таблице.

Результаты моделирования прототипа и модификаций асинхронного электродвигателя

Конфигурация	Прототип	Модификация 1	Модификация 2	Модификация 3
Пусковой момент, Н·м	1,04	0,78 (-25%)	1,21 (+16,3%)	1,46 (+40,3%)
Средний момент, Н·м	0,86	1,06 (+23,6%)	1,21 (+40,7%)	1,1 (+27,9%)
Максимальный момент, Н·м	1,7	2,18 (+28,2%)	1,96 (+15,2%)	1,86 (+9,4%)
Время разгона, с	1,83	1,49 (-18,5%)	1,31 (-28,4%)	1,44 (-21,3%)

Из представленных результатов следует, что наибольшую ценность с точки зрения повышения среднего значения момента представляет модификация 2. В указанной модификации немагнитный зазор располагается со смещением против часовой стрелки относительно магнитной оси основной обмотки. Данная конфигурация представлена на рис. 2. Также в остальных рассмотренных модификациях были отмечены и другие положительные изменения относительно прототипа. Стоит отметить, что для получения определенного результата необходимо детально подходить к вопросу выбора конфигурации немагнитного зазора, его размеров, а также его расположения.

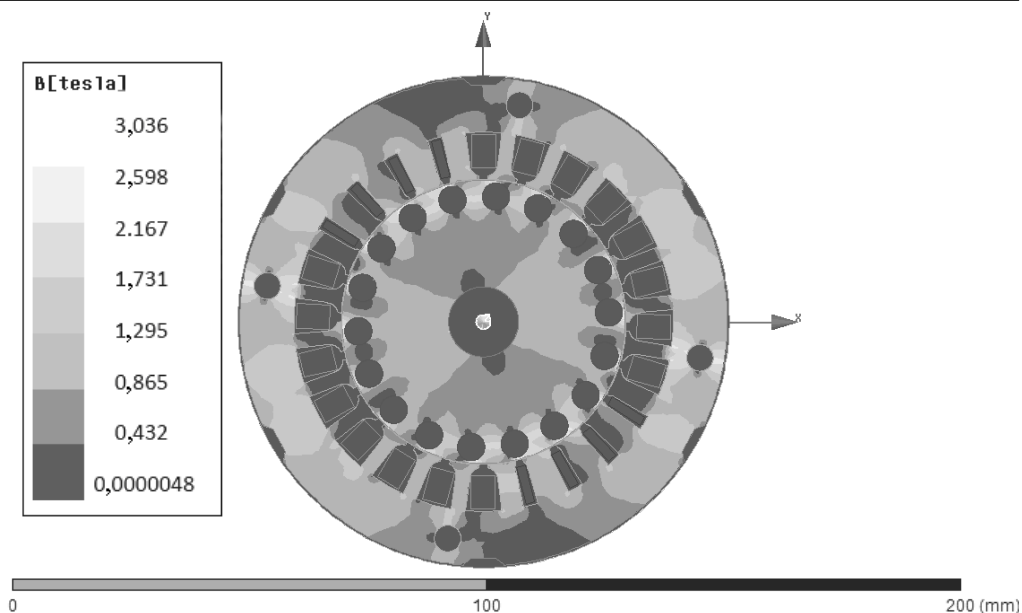


Рис. 3. Картина магнитного поля в поперечном разрезе прототипа

Семейство механических характеристик рассмотренных модификаций и прототипа представлено на рис. 4.

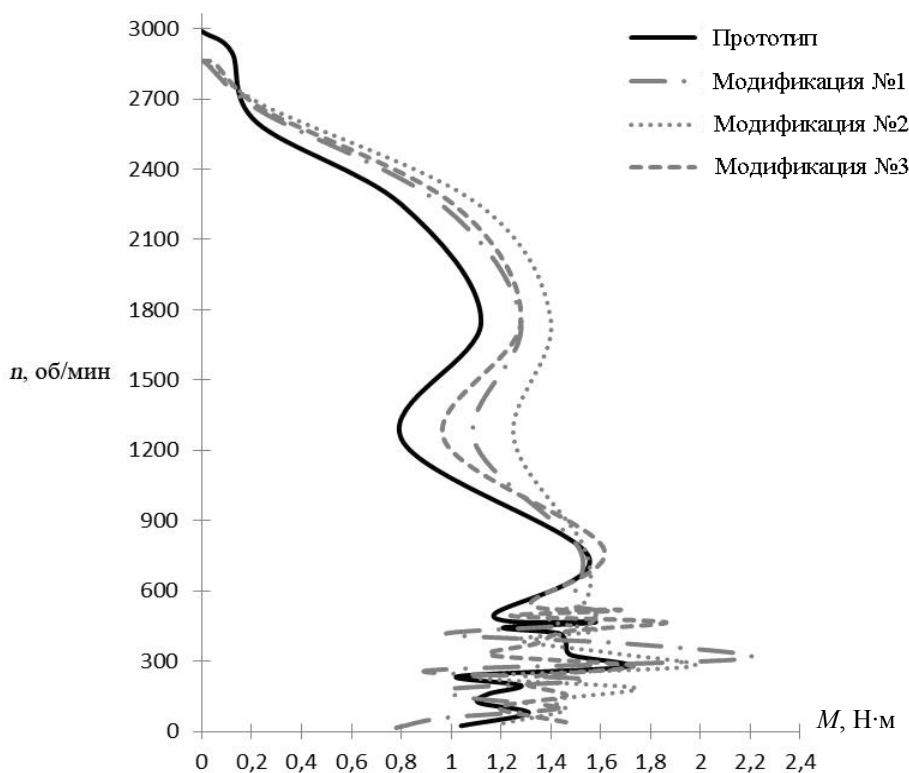


Рис. 4. Семейство механических характеристик

Стоит отметить, что механическая характеристика прототипа с учетом момента инерции вращающихся масс (ротор и шлифовальные круги) в значительной степени совпадает с экспериментальными данными, полученными в результате натурных испытаний прототипа на динамометрическом стенде, что свидетельствует об адекватности рассматриваемой модели электродвигателя. Последнее в свою очередь позволяет осуществлять сравнительный анализ математических моделей модификаций и прототипа.

Заключение. На основании полученных результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная конструкция электродвигателя обеспечивает повышение среднего и максимального моментов во всех рассмотренных модификациях. В большинстве моделей также отмечено повышение пускового момента.

2. Максимальное увеличение пускового момента в одной из модификаций за счет применения немагнитного зазора составило 40,7%. Что позволит уверенно осуществлять пуск асинхронного двигателя с модернизированной конструкцией статора при пониженных значениях напряжения питания сети.

Литература

1. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для бакалавров / под ред. И.П. Копылов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2012. – 675 с.

2. Пат. 2 028 024 РФ, МПК Н 02 К 17/08. Однофазный электродвигатель / Е.И. Ефименко (РФ). – № 5 000 293/07; заявл. 16.08.91; опубл. 27.01.95. Бюл. № 3. – 6 с.

3. Пат. 2 010 410 РФ, МПК Н 02К 17/04. Однофазный асинхронный электродвигатель / Б.Ф. Ковалев (РФ). – № 4 948 371/07; заявл. 24.06.91; опубл. 30.03.94. Бюл. № 9. – 4 с.

4. Пат. 2 5101 20 РФ, МПК Н 02К 17/08. Однофазный электродвигатель / С.И. Качин, О.С. Качин (РФ). – №2 012 139 937/07; заявл. 18.09.12; опубл. 20.03.14. Бюл. № 8. – 8 с.

5. Computational Design and Analysis of Core Material of Single-Phase Capacitor Run Induction Motor / Gurmeet Singh, Gurlad Singh, Mohd. Afaque Iqbal // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – № 7. – P. 20–25.

6. O.S. Kachin, A.V. Kiselev, A.B. Serov, Research of Operation Modes of the Synchronous Electric Motor Drive System with use of Software ANSYS Maxwell and Simplorer, 15th International Conference of Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2014. – P. 362–364.

Качин Сергей Ильич

Д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и электрооборудования
Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)
Тел.: 8 (382-2) 56-37-59
Эл. почта: kos@tpu.ru

Качин Олег Сергеевич

Доцент каф. электропривода и электрооборудования НИТПУ
Тел.: 8 (382-2) 56-37-59
Эл. почта: kos@tpu.ru

Киселев Александр Викторович

Ассистент каф. электротехнических комплексов и материалов НИТПУ
Тел.: 8 (382-2) 56-34-53
Эл. почта: kiselevav@tpu.ru

Бурцев Леонид Юрьевич

Магистрант каф. электропривода и электрооборудования НИТПУ
Тел.: 8 (382-2) 56-34-53
Эл. почта: leonidburtsev@mail.ru

Kachin S.I., Kachin O.S., Kiselev A.V., Burtsev L.Y.

Simulation and analysis of a novel single-phase induction motor with increased starting torque

The article presents a novel design of a single-phase induction motor with increased starting torque. A new stator configuration is proposed. The simulation and analysis of the wide range of stator modifications of induction motor were fulfilled with help of the special software: ANSYS Maxwell and Simplorer.

Keywords: induction motor, starting torque, stator, speed-load curve, simulation, magnetic field, non-magnetic gap, ANSYS, Maxwell, Simplorer.