

УДК 621.313

*Еремочкин С.Ю., доцент, д.т.н., кафедры
«Электротехника и автоматизированный электропривод»
Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунов
Россия, г. Барнаул
Россоха Е.С. магистрант
2 курс магистратуры, кафедры
«Электротехника и автоматизированный электропривод»
Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунов
Россия, г. Барнаул*

УСТРОЙСТВО БЕСКОНДЕНСАТОРНОГО ЗАПУСКА ТРЕХФАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

***Аннотация:** В работе исследуется способ питания трёхфазного асинхронного электродвигателя от однофазной сети без применения фазосдвигающих конденсаторов. Рассматривается вариант построения электропривода на основе полупроводникового коммутатора, обеспечивающего последовательное переключение обмоток статора по заданному алгоритму. Выполнено сравнение бесконденсаторного и конденсаторного способов запуска по механическим характеристикам, электромагнитному моменту и угловой скорости ротора. Моделирование режимов работы электропривода проведено в программной среде SimInTech.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, трёхфазный двигатель, однофазная сеть, бесконденсаторный запуск, электропривод.*

*Yeremochkin S.Y., Associate Professor,
Doctor of Technical Sciences, Department of Electrical Engineering and
Automated Electric Drive,
Altai State Technical University named after I.I. Polzunov
Russia, Barnaul*

*Rossokha E.S. Master's student 2nd year of the Master's degree,
Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive
Altai State Technical University named after I.I. Polzunov
Russia, Barnaul*

DEVICE FOR NON-CONDENSATORY STARTING OF A THREE-PHASE MOTOR FROM A SINGLE-PHASE NETWORK

Abstract: *The paper investigates a method of operating a three-phase induction motor from a single-phase power supply without phase-shifting capacitors. A semiconductor switching device implementing sequential stator winding commutation is considered. Comparative analysis of capacitor and capacitor-free starting methods was carried out using mechanical characteristics, electromagnetic torque, and rotor speed responses. Simulation of the electric drive operating modes was performed in the SimInTech environment.*

Keywords: *asynchronous motor, three-phase motor, single-phase network, capacitor-free start, electric drive.*

Введение. Трёхфазные асинхронные двигатели широко применяются в электроприводах благодаря простоте конструкции, высокой надёжности и сравнительно невысокой стоимости [1, 4]. Однако в ряде случаев возникает необходимость эксплуатации таких двигателей при наличии только однофазной питающей сети. Подобная ситуация характерна для малых производственных объектов, мастерских, сельскохозяйственных установок и бытового оборудования.

Использование трёхфазных асинхронных двигателей в однофазных сетях сопровождается ухудшением условий пуска и снижением устойчивости работы электропривода. Для получения вращающего момента обычно применяют конденсаторные схемы, однако эффективность таких решений существенно зависит от параметров нагрузки и правильно выбранной ёмкости конденсаторов [2].

Одним из перспективных направлений является применение полупроводниковых коммутаторов, позволяющих реализовать алгоритмическое управление подключением статорных обмоток. Такой подход даёт возможность отказаться от фазосдвигающих конденсаторов и повысить стабильность работы электропривода при питании от однофазной сети [3, 5].

В данной работе рассматривается устройство бесконденсаторного запуска трёхфазного асинхронного двигателя на основе транзисторного полупроводникового преобразователя. Работа электропривода обеспечивается последовательным переключением силовых транзисторов, подключающих различные комбинации статорных обмоток к однофазной сети. Исследование работы электропривода выполнено в среде компьютерного имитационного моделирования SimInTech.

Рисунок 1 представляет собой принципиальную электрическую схему реверсивного полупроводникового коммутатора, предназначенного для питания трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети переменного тока.

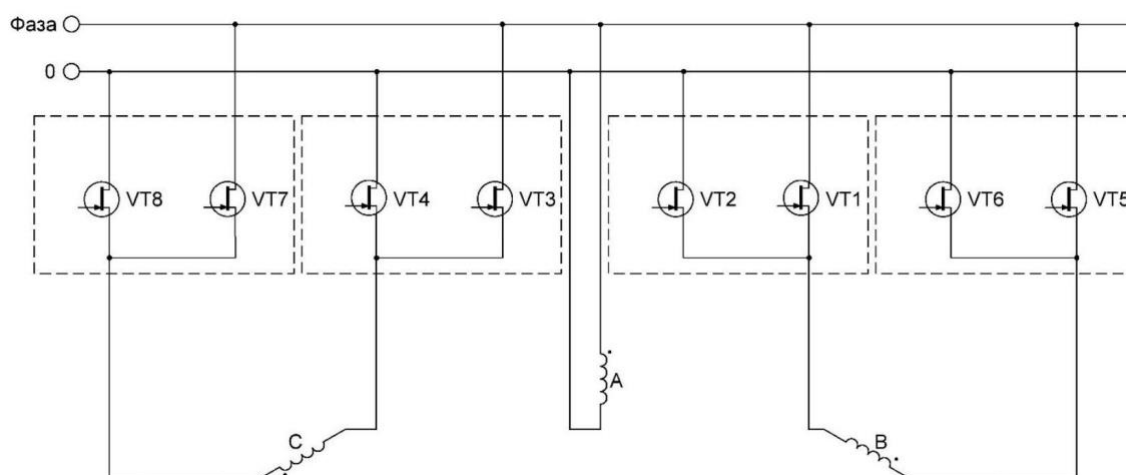


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема реверсивного полупроводникового коммутатора

Фаза, 0 – фазный и нулевой провод однофазной питающей сети;

VT1–VT8 – полупроводниковые ключи коммутатора;

А, В, С – статорные обмотки трёхфазного асинхронного двигателя.

Схема представляет собой полупроводниковый преобразователь, предназначенный для питания трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети переменного тока.

Работа схемы основана на поочерёдном переключении силовых транзисторов, обеспечивающем подключение различных комбинаций статорных обмоток двигателя к однофазной сети. За счёт изменения состояний ключей формируется вращающий момент, необходимый для запуска и устойчивой работы асинхронного двигателя [3, 5].

Предложенная схема позволяет осуществлять питание трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети без применения фазосдвигающих конденсаторов и механических преобразователей фаз.

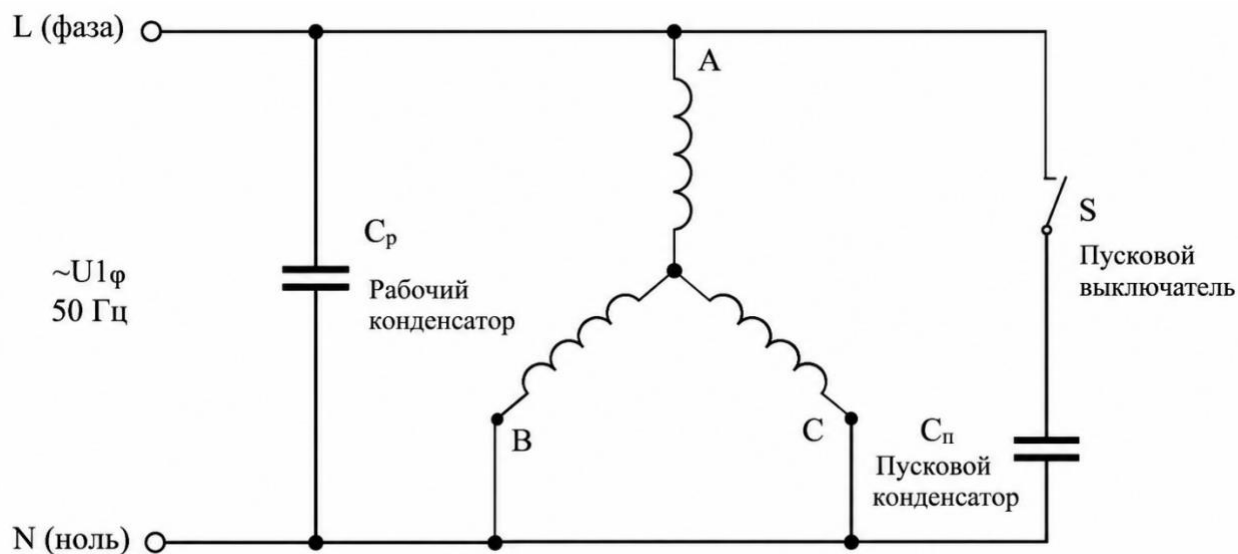


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема конденсаторного пуска трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети

L, N – фазный и нулевой провод однофазной питающей сети;

A, B, C – статорные обмотки трёхфазного асинхронного двигателя;

C_p – рабочий фазосдвигающий конденсатор;

C_{π} – пусковой конденсатор;

S – пусковой выключатель.

Схема представляет собой классическую систему конденсаторного пуска трёхфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети переменного тока [2].

В конденсаторной схеме одна из статорных обмоток подключается через фазосдвигающий конденсатор, благодаря чему между токами возникает сдвиг фаз. Во время запуска дополнительно используется пусковой конденсатор, позволяющий увеличить стартовый момент двигателя [2].

Работа конденсаторной схемы существенно зависит от параметров фазосдвигающих элементов и характера нагрузки двигателя. При изменении режима работы характеристики электропривода могут изменяться более заметно, чем в бесконденсаторной схеме.

Недостатком конденсаторного способа запуска является снижение пускового и номинального момента, увеличение нагрева обмоток статора, а

также ухудшение энергетических характеристик двигателя при отклонении ёмкости конденсаторов от расчётных значений.

По сравнению с конденсаторной схемой полупроводниковый коммутатор обеспечивает более стабильную работу двигателя при изменении нагрузки и уменьшает зависимость характеристик электропривода от параметров фазосдвигающих элементов. Это позволяет повысить стабильность работы электродвигателя, уменьшить зависимость характеристик двигателя от параметров нагрузки и исключить применение громоздких фазосдвигающих конденсаторов.

На рисунке 3 представлена векторная диаграмма вращения вектора магнитного потока поля статора, формируемого транзисторным преобразователем при питании трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети.

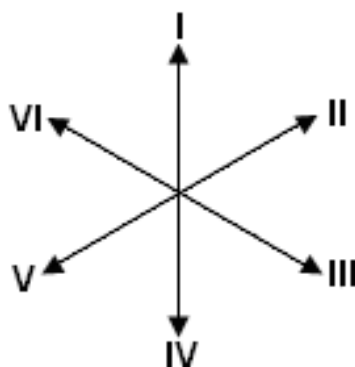


Рисунок 3 – Векторная диаграмма вращения вектора магнитного потока поля статора при использовании полупроводникового устройства бесконденсаторного запуска

На рисунке 3 показан принцип изменения положения результирующего магнитного вектора при работе бесконденсаторного коммутатора. Последовательное переключение силовых элементов обеспечивает создание вращающего момента, необходимого для работы асинхронного двигателя.

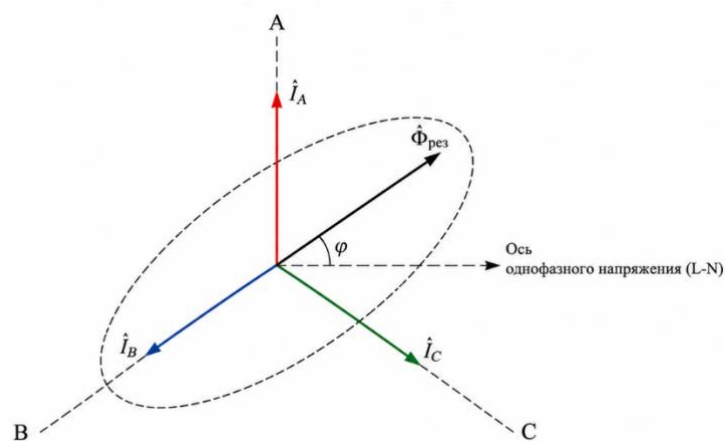


Рисунок 4 – Векторная диаграмма магнитного поля статора при конденсаторном пуске от однофазной сети

На рисунке 4 представлена векторная диаграмма магнитного поля статора трёхфазного асинхронного двигателя при конденсаторном пуске от однофазной сети.

Векторы E_a , E_b , E_c соответствуют магнитным потокам (токам), создаваемым статорными обмотками двигателя. Обмотка фазы А подключена непосредственно к однофазной питающей сети, а обмотки фаз В и С подключены через рабочий и пусковой конденсаторы, обеспечивающие фазовый сдвиг токов.

Из-за неравномерного распределения токов в статорных обмотках при конденсаторном способе питания ухудшается устойчивость работы двигателя и возрастают колебания электромагнитного момента.

Проведённое моделирование показало, что при конденсаторном способе питания работа двигателя сопровождается более выраженными колебаниями электромагнитного момента и скорости вращения. Это связано с неравномерным распределением токов в обмотках статора при питании от однофазной сети.

Таблица 1.

Последовательность коммутации ключей VT1–VT8

Этап переключения	Активные силовые элементы	Подключённые фазы двигателя
Шаг 1	VT1, VT4	A–B
Шаг 2	VT1, VT6	A–C
Шаг 3	VT3, VT6	B–C
Шаг 4	VT3, VT8	B–A
Шаг 5	VT5, VT8	C–A
Шаг 6	VT5, VT2	C–B

Таблица 1 отражает порядок переключения силовых элементов реверсивного коммутатора при работе бесконденсаторной схемы питания асинхронного двигателя.

В процессе моделирования установлено, что использование алгоритмической коммутации позволяет обеспечить устойчивый запуск двигателя и уменьшить колебания электромагнитного момента по сравнению с конденсаторным способом питания.

Реализованный способ управления позволяет обеспечить запуск и устойчивую работу асинхронного двигателя при питании от однофазной сети без применения фазосдвигающих конденсаторов. Кроме того, изменение порядка переключения силовых элементов делает возможным реверсирование электропривода.

Эффективность предложенного способа бесконденсаторного запуска оценивалась по механическим характеристикам электропривода, а также по осциллограммам изменения электромагнитного момента и угловой скорости вала двигателя.

На рисунке 5 показано изменение электромагнитного момента двигателя при бесконденсаторном запуске. В процессе разгона наблюдаются колебания момента, после чего система переходит в устойчивый режим работы. При

подключении нагрузки электропривод сохраняет стабильность работы.

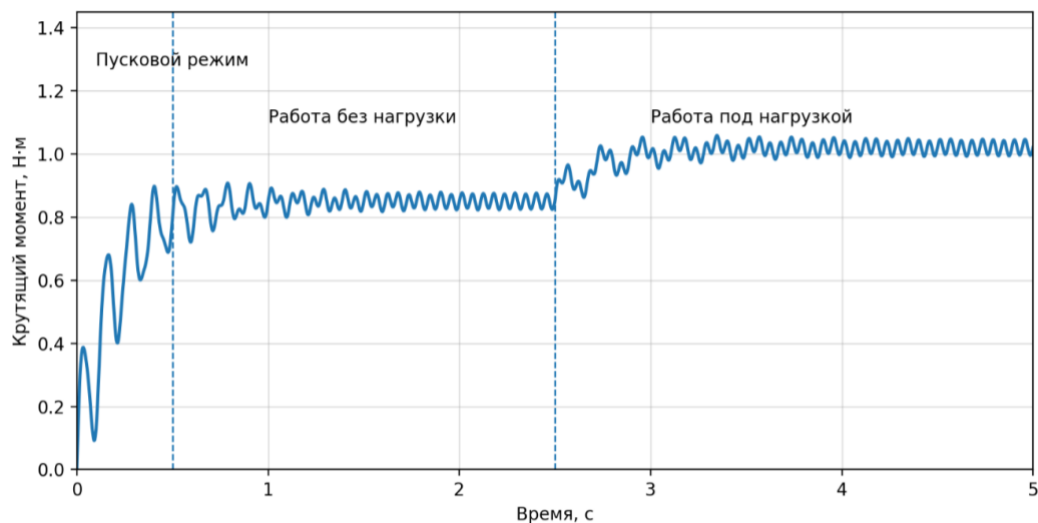


Рисунок 5 – Осциллограмма крутящего момента вала электродвигателя при пуске и работе под нагрузкой

На рисунке 6 представлена осциллограмма изменения электромагнитного момента при конденсаторном способе запуска. Во время разгона наблюдаются более выраженные колебания момента по сравнению с бесконденсаторной схемой. После подключения нагрузки пульсации сохраняются, что связано с несимметрией токов статора при питании двигателя от однофазной сети через фазосдвигающие конденсаторы.

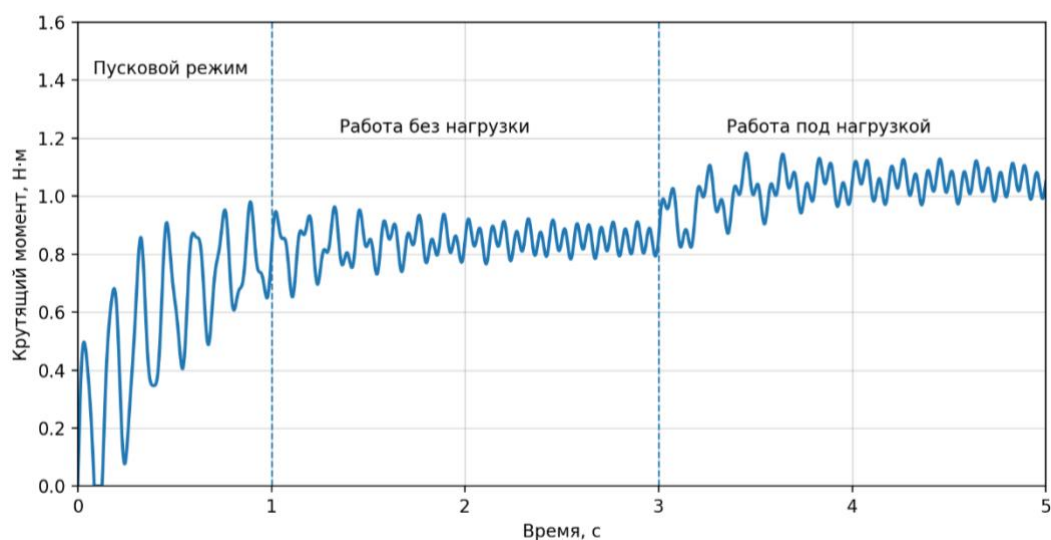


Рисунок 6 – Осциллограмма крутящего момента вала

электродвигателя при пуске и работе под нагрузкой при конденсаторном пуске

На рисунке 7 показано изменение угловой скорости двигателя при бесконденсаторном способе запуска. Во время разгона скорость ротора быстро увеличивается и после окончания пускового режима стабилизируется около рабочего значения. После подключения механической нагрузки наблюдается небольшое снижение скорости, однако электропривод сохраняет устойчивость работы.

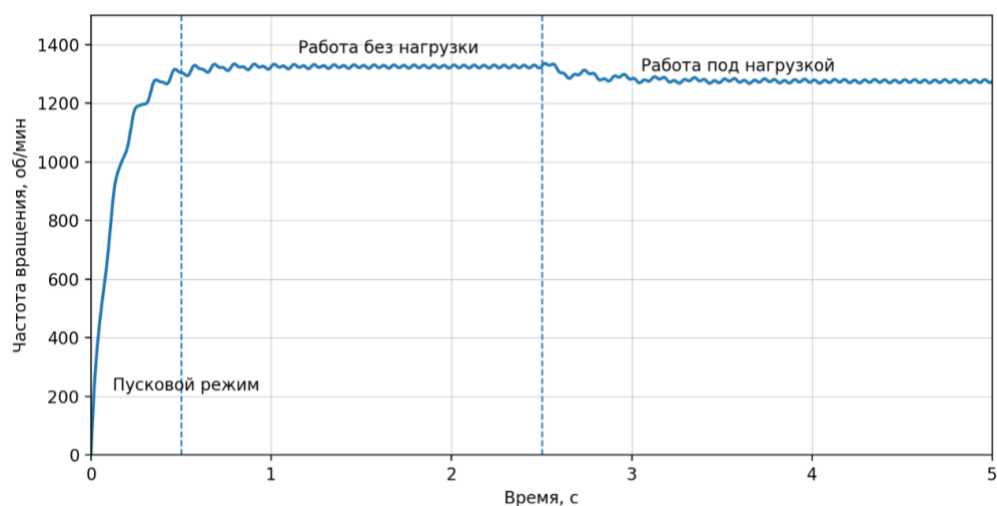


Рисунок 7 – Осциллограмма угловой скорости вала электродвигателя при пуске и работе под нагрузкой при бесконденсаторном пуске

На рисунке 8 показано изменение угловой скорости двигателя при конденсаторном способе запуска. В процессе разгона наблюдаются колебания скорости вращения, вызванные несимметрией токов статора. После подключения нагрузки снижение скорости становится более заметным, чем при бесконденсаторной схеме питания.

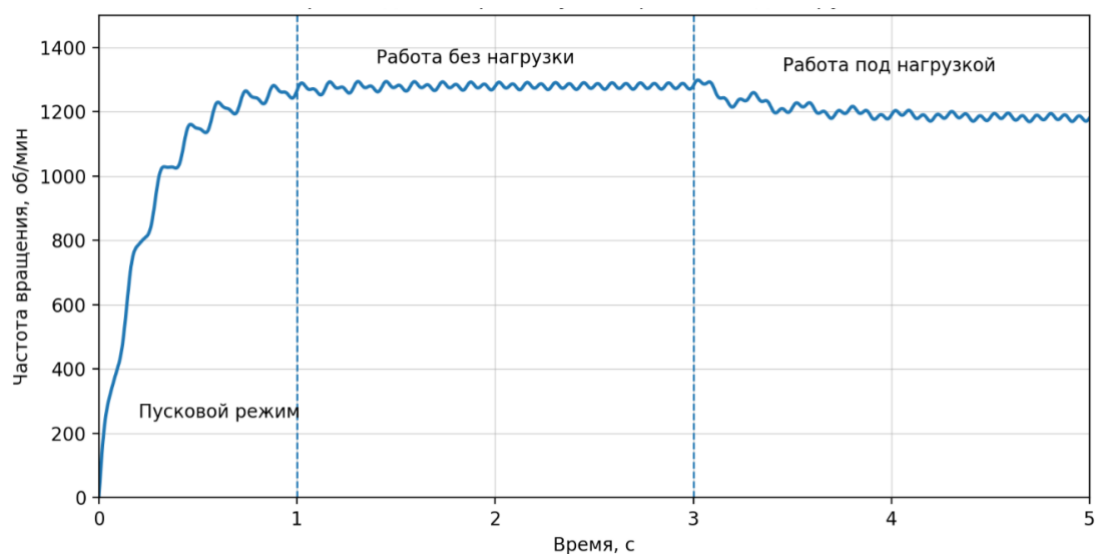


Рисунок 8 – Осциллограмма угловой скорости вала электродвигателя при пуске и работе под нагрузкой при конденсаторном пуске

Таблица 2.

Результаты моделирования

Параметр	Конденсаторный запуск	Бесконденсаторный запуск
Характер разгона	С заметными колебаниями	Более плавный
Пульсации электромагнитного момента	Повышенные	Меньше выражены
Устойчивость при подключении нагрузки	Ниже	Выше
Чувствительность к изменению нагрузки	Значительная	Умеренная
Стабильность скорости вращения	Ниже	Выше
Необходимость подбора конденсаторов	Требуется	Не требуется

Сложность схемы управления	Средняя	Повышенная
----------------------------	---------	------------

По результатам компьютерного моделирования в среде SimInTech установлено, что применение полупроводникового бесконденсаторного коммутатора позволяет уменьшить колебания электромагнитного момента в переходных режимах работы. При подключении механической нагрузки снижение скорости вращения оказывается менее выраженным по сравнению с конденсаторным способом запуска.

Полученные результаты подтверждают возможность применения бесконденсаторных схем для питания трёхфазных асинхронных двигателей от однофазной сети на объектах с ограниченной мощностью электроснабжения.

Дополнительным преимуществом бесконденсаторного способа запуска является возможность реализации реверсивного режима работы электропривода без применения механических переключающих устройств. Это расширяет область применения подобных схем в системах автоматизированного электропривода.

На рисунке 9 представлена статическая механическая характеристика (зависимость частоты вращения от момента) трёхфазного асинхронного двигателя АИР56А4 [1, 4], паспортные данные которого приведены в таблице 2. Она была получена с использованием блока из библиотеки SimInTech для построения графиков «Фазовый портрет».

Механическая характеристика, представленная на рисунке 9, показывает зависимость частоты вращения двигателя от момента нагрузки при бесконденсаторном способе запуска. При увеличении нагрузки скорость вращения уменьшается постепенно, а работа электропривода сохраняет устойчивый характер во всём исследуемом диапазоне.

Таблица 3.

Паспортные данные асинхронного двигателя АИР56А4

Параметр	Значение
----------	----------

Номинальное напряжение, В	220/380
Номинальная мощность, Вт	120
Номинальная частота вращения, об/мин	1325
Номинальный момент, Н·м	0,85
КПД, %	65
Номинальный ток, А	0,8 / 0,46
Пусковой момент, Н·м	0,9
Критический момент, Н·м	1,4
Частота сети, Гц	50
Коэффициент мощности cosφ	0,72

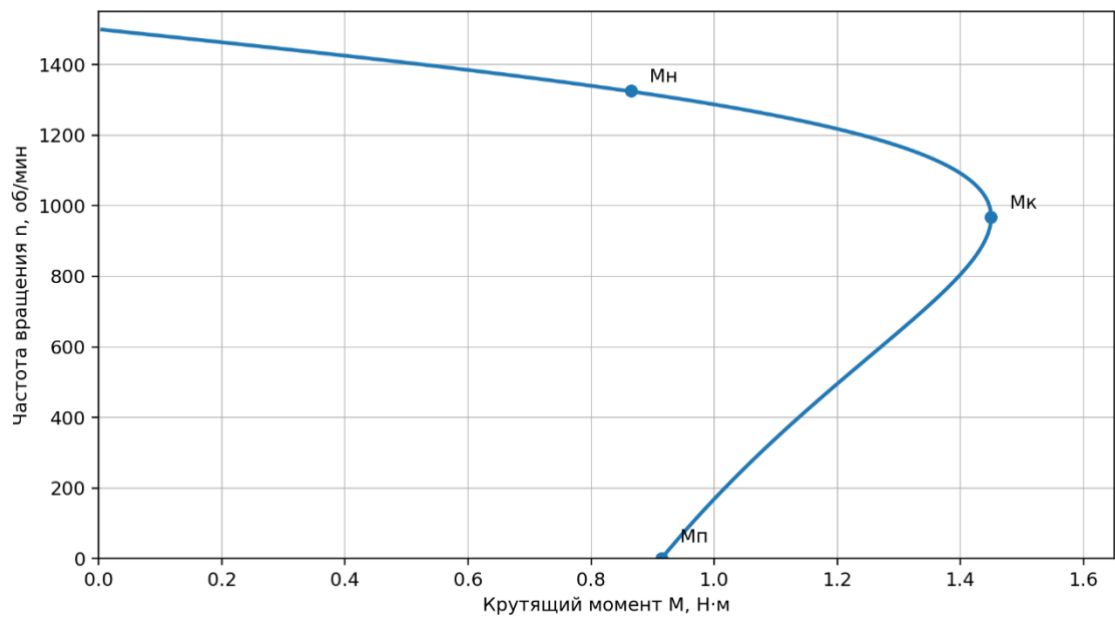


Рисунок 9 – Статическая механическая характеристика трёхфазного асинхронного двигателя АИР56А4 при бесконденсаторном запуске от однофазной сети

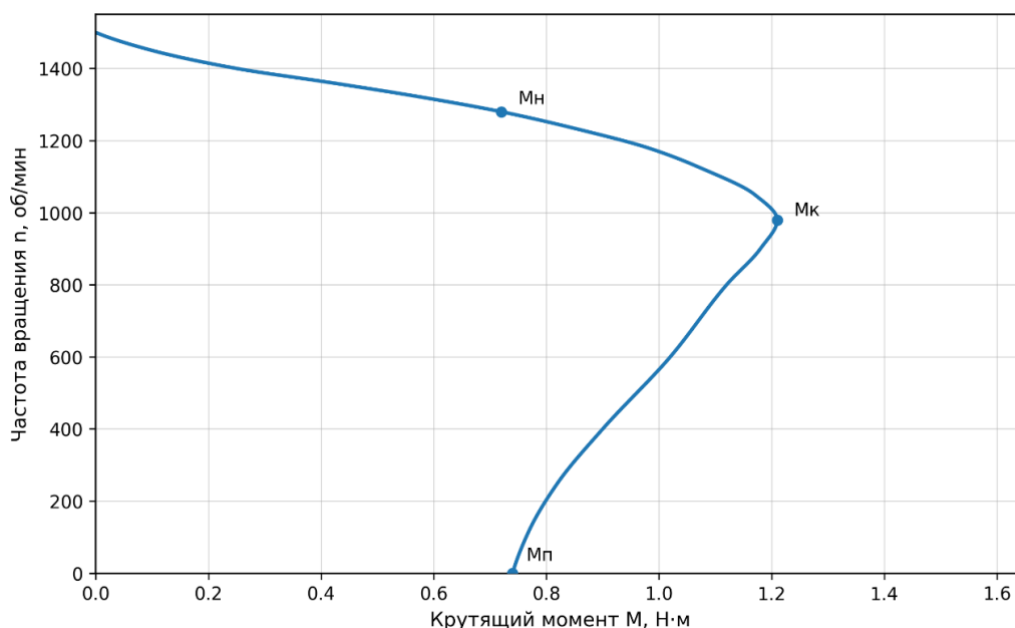


Рисунок 10 – Статическая механическая характеристика трёхфазного асинхронного двигателя АИР56А4 при конденсаторном запуске от однофазной сети

На рисунке 10 показана механическая характеристика асинхронного двигателя АИР56А4 при конденсаторном способе питания от однофазной сети. График отражает изменение частоты вращения двигателя при увеличении момента нагрузки на валу.

Результаты моделирования показывают, что при конденсаторном запуске скорость вращения двигателя сильнее зависит от изменения нагрузки по сравнению с бесконденсаторной схемой. При увеличении момента сопротивления наблюдается более заметное снижение частоты вращения и ухудшение устойчивости работы электропривода.

Дополнительные колебания характеристик связаны с несимметрией токов статора и зависимостью фазового сдвига от параметров конденсаторов. В результате работа двигателя становится менее стабильной при изменении

режима нагрузки.

По сравнению с бесконденсаторной схемой питания конденсаторный способ запуска характеризуется большей чувствительностью к параметрам нагрузки и менее устойчивыми механическими характеристиками.

Таким образом, использование полупроводникового устройства бесконденсаторного запуска позволяет улучшить механические характеристики асинхронного двигателя и повысить устойчивость его работы при питании от однофазной сети по сравнению с традиционным конденсаторным способом запуска.

Применение полупроводниковых бесконденсаторных схем представляет интерес для электроприводов, работающих в условиях ограниченной мощности однофазной сети. Подобные системы могут использоваться в небольших мастерских, сельскохозяйственных установках, вентиляционном оборудовании и вспомогательных технологических механизмах.

Одним из преимуществ бесконденсаторного способа является отсутствие необходимости подбора фазосдвигающих конденсаторов для различных режимов работы двигателя. Это позволяет уменьшить влияние параметров нагрузки на устойчивость электропривода и повысить стабильность работы системы при изменении момента сопротивления на валу двигателя.

Вместе с тем применение полупроводниковой коммутации требует использования системы управления силовыми ключами и дополнительного анализа тепловых режимов работы преобразователя. При практической реализации также необходимо учитывать электромагнитные помехи и режимы коммутации транзисторных элементов.

Таблица 4.

Сравнение конденсаторного и бесконденсаторного способов запуска асинхронного двигателя

Характеристика	Конденсаторная схема	Полупроводниковая бесконденсаторная схема
Пусковые свойства	Ограниченный пусковой момент	Более устойчивый запуск
Симметрия фазных токов	Выраженная несимметрия	Более равномерное распределение токов
Колебания электромагнитного момента	Более заметные	Менее выраженные
Чувствительность к нагрузке	Значительная	Меньшая
Необходимость настройки элементов	Требуется подбор ёмкости конденсаторов	Дополнительная настройка конденсаторов не требуется
Работа при изменении нагрузки	Возможны ухудшения характеристик	Работа более стабильна
Особенности реализации	Простая схема подключения	Требуется система управления ключами

Анализ результатов моделирования показал, что при бесконденсаторном способе запуска электропривод быстрее переходит в устойчивый режим работы после окончания пускового процесса. Колебания электромагнитного момента оказываются менее выраженными, а изменение скорости вращения при подключении нагрузки происходит более плавно.

При конденсаторной схеме питания наблюдается большая чувствительность характеристик электропривода к изменению нагрузки и параметров фазосдвигающих элементов. В переходных режимах возникают дополнительные пульсации момента и скорости вращения, связанные с несимметрией токов статора.

Полученные результаты подтверждают возможность применения полупроводниковых бесконденсаторных схем в системах электропривода, работающих от однофазной сети [3, 5].

Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование алгоритмов управления полупроводниковыми ключами и повышение энергетической эффективности электропривода. Дополнительный интерес представляет исследование работы подобных систем при изменении мощности двигателя и параметров нагрузки.

Дополнительный интерес представляет исследование работы асинхронных двигателей большей мощности, а также анализ влияния параметров преобразователя на коэффициент полезного действия и коэффициент мощности электропривода.

Следует отметить, что полученные результаты относятся к исследуемой модели асинхронного двигателя и выбранным параметрам схемы управления. При изменении мощности двигателя, параметров нагрузки или алгоритма коммутации характеристики электропривода могут отличаться. Для практического применения бесконденсаторных схем требуется дополнительный анализ тепловых режимов работы полупроводниковых ключей и исследование энергетических показателей системы.

Заключение. В работе было выполнено исследование режимов работы трёхфазного асинхронного двигателя при питании от однофазной сети с использованием конденсаторного и бесконденсаторного способов запуска. Для анализа характеристик электропривода использовалась среда компьютерного моделирования SimInTech.

Результаты моделирования показали, что применение полупроводникового бесконденсаторного коммутатора позволяет обеспечить более устойчивую работу электропривода при изменении нагрузки. По сравнению с конденсаторной схемой наблюдаются меньшие колебания электромагнитного момента и более стабильное изменение скорости вращения двигателя.

Проведённое сравнение механических характеристик подтвердило, что бесконденсаторный способ запуска обладает меньшей чувствительностью к параметрам нагрузки и не требует подбора фазосдвигающих конденсаторов. Это позволяет повысить устойчивость работы асинхронного двигателя при эксплуатации в условиях ограниченной мощности однофазной сети.

Полученные результаты подтверждают возможность практического применения полупроводниковых бесконденсаторных схем в системах электропривода малой и средней мощности.

Список источников:

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2010. — 350 с.
2. Алиев И. И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. — М.: РадиоСофт, 2004. — 128 с.
3. Еремочкин С. Ю., Дорохов Д. В. Разработка и исследование однофазного асинхронного электропривода сельскохозяйственной машины с полупроводниковым устройством регулирования скорости // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 10 (216). С. 89–100. DOI: 10.53083/1996-4277-2022-216-10-89-100.
4. Копылов И. П. Электрические машины: учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 2006. — 607 с.
5. RU 221498 U1 Патент RU 221498 U1 Российская Федерация, МПК H02P 1/42, H02P 27/04. Устройство бесконденсаторного запуска однофазного двухобмоточного асинхронного электродвигателя / Д.В. Дорохов, С.Ю. Еремочкин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». — № 2023112345; заявл. 08.09.2023; опубл. 09.11.2023.