

СЕРВОПРИВОДЫ ХАРЗА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

МАКСИМ ГУРБАШКОВ

harza@inmodrive.ru

В статье представлен обзор возможностей, предоставляемых линейкой российских сервоприводов ХАРЗА для организации замкнутой системы управления, а также тех аспектов и свойств, которые позволяют повысить точность такой системы. Мы рассмотрим элементы и особенности приводов через призму точности, а также ответим на вопросы об отличительных характеристиках этих устройств и нюансах конструкции.

Прежде всего определимся с терминологией.

Замкнутая система управления — это система с замкнутым (посредством обратной связи) контуром передачи воздействий. Она является одним из основных типов систем автоматического управления. Управляющие воздействия в замкнутых системах управления вырабатываются в функции отклонения значения управляемой величины от требуемого закона ее изменения.

Что касается электропривода, в частности, сервопривода, в профессиональном обиходе допускаются очень широкие вариации определений этих терминов. В общем понимании электропривод представляет собой исполнительный элемент замкнутой системы управления нижнего уровня, включающий в себя электродвигатель, опционально редуктор, датчик обратной связи, а также контроллер/драйвер управления двигателем. В последнем случае электропривод представляет собой замкнутую систему управления нижнего уровня.

Под сервоприводом, как правило, понимается частный случай электропривода, который предназначен для точного управления по скорости или положению во вспомога-

тельных системах и механизмах. Таким сервоприводом является, например, привод следящей системы. Тем самым и определяются основные режимы работы сервопривода. Независимо от варианта компоновки — безредукторное исполнение или с редуктором того или иного типа (планетарный, рядный, волновой, циклоидный или любой другой) — главной задачей сервопривода является обеспечение необходимой точности стабилизации при обработке профиля скорости или положения.

В общем виде замкнутая система управления приводом без редуктора представлена на рис. 1. В зависимости от задачи, решаемой системой управления, она может как включать все три контура управления (по току/моменту, скорости и положению), так и ограничиваться меньшим количеством контуров управления. При использовании готового контроллера в составе привода контур управления по току обычно реализован в самом контроллере и является стандартной опцией. Следует отметить, что качество реализуемой системы управления будет определяться не только количеством контуров управления, но в большей степени типами регуляторов (пропорциональный,

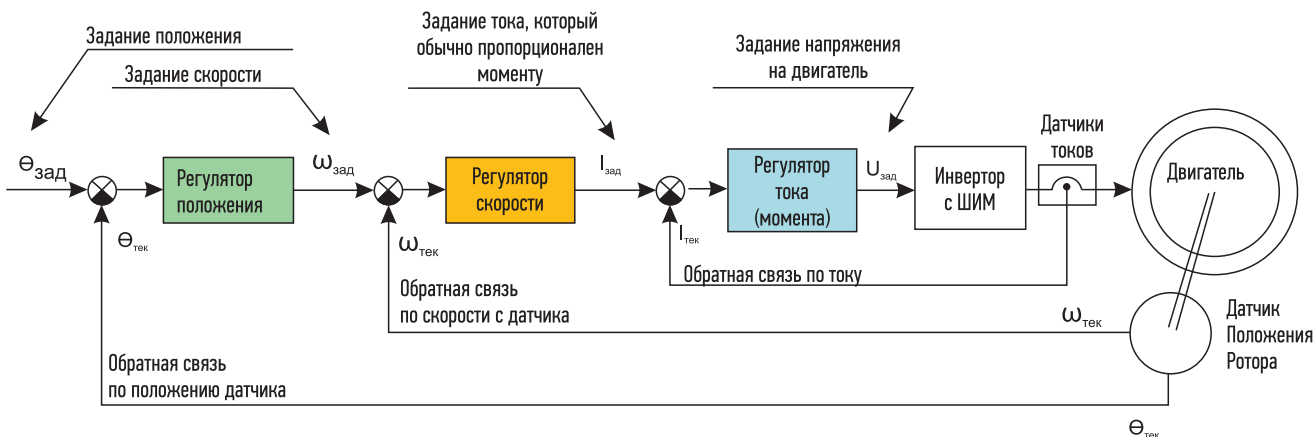
пропорционально-интегральный или пропорционально-интегриродифференциальный), установленными в каждом из контуров управления, а также коэффициентами настройки регуляторов с учетом параметров конкретного сервопривода. В зависимости от выбранного регулятора переходный процесс в каждом из контуров управления будет протекать тем или иным образом, обеспечивая соответствующие динамические свойства системы управления и ее точность.

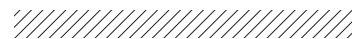
Отдельно отметим, что итоговая точность системы определяется каждым из элементов, входящих в состав конкретного сервопривода.

ОСОБЕННОСТИ СЕРВОПРИВОДОВ ХАРЗА

Сервоприводы ХАРЗА представляют собой прецизионную мехатронную систему с высокой степенью интеграции элементов и высокой плотностью компоновки. Ключевым элементом любой такой системы является электродвигатель. Используемые в конструкции сервопривода ХАРЗА синхронные двигатели на постоянных магнитах российского производства обладают рядом особенностей, обеспечивающих

РИС. 1. ▼
Классическая схема замкнутой системы управления приводом с тремя контурами обратной связи





преимущества при построении системы управления. В частности, они имеют хорошую управляемость и высокие удельные характеристики. Благодаря конструктивным особенностям двигателя обладают малым коэффициентом нелинейных искажений и нагрузочной характеристикой, близкой к линейной (рис. 2), что определяет точность управления.

Указанные электродвигатели обладают низкими значениями индуктивности и сопротивления обмоток, что напрямую влияет на величину электромагнитной постоянной $T_{\sigma} = L/R$ и в результате на время отклика двигателя на сигнал управления. В зависимости от габарита двигателя значение времени отклика находится в диапазоне 0,267–3,413 мс. При этом стоит отметить, что величина времени отклика аналогичных зарубежных двигателей (на примере двигателей производства TQ Robodrive, Германия) находится в диапазоне 0,34–6,181 мс, что в ряде случаев почти в два раза выше.

Кроме того, стоит отметить относительно низкие значения электро-механической постоянной времени T_M , которая среди прочего напрямую зависит от количества пар полюсов электродвигателей и момента инерции ротора. Количество пар полюсов российских двигателей сопоставимо с зарубежными двигателями (7–20). Благодаря особой конструкции ротора двигателя момент инерции последнего имеет минимальные значения. При этом КПД таких двигателей составляет 85–96%.

Помимо двигателя, прямой вклад в обеспечение точности конечной системы вносят редуктор и датчик (или датчики) обратной связи.

ВОЛНОВАЯ ПЕРЕДАЧА

В качестве основного типа редуктора в составе сервоприводов ХАРЗА применяется волновая передача. Рассмотрим несколько практических моментов, касающихся точности волновой передачи.

Принцип использования волновой деформации для передачи и преобразования движения был предложен инженером А.И. Москвитиным в 1944 г. для фрикционной передачи с электромагнитным генератором волн, а в 1959 г. в США был выдан патент Уолтону Массеру (Walter Musser) на зубчатую передачу с механическим генератором волн. В даль-

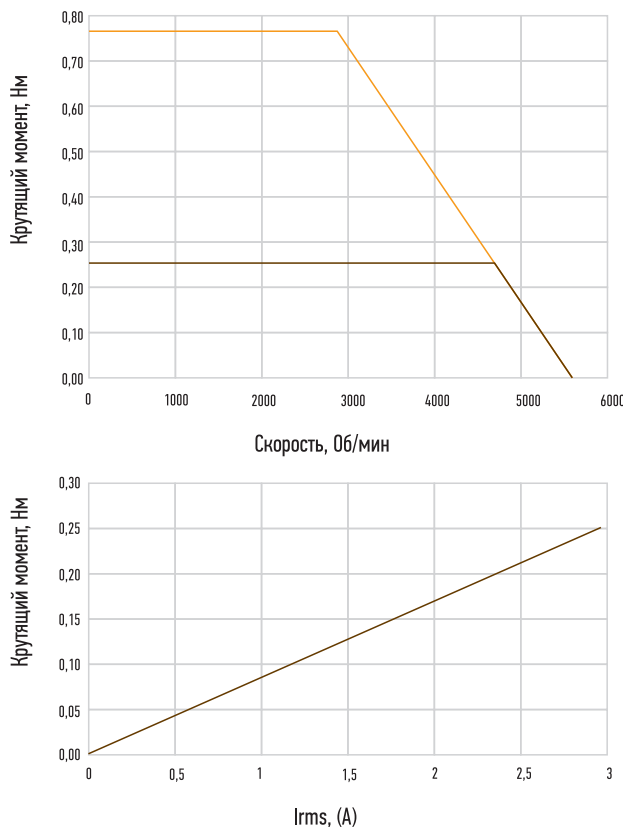


РИС. 2. Графики зависимости крутящего момента от скорости (где M_n — пиковый момент, M_n — номинальный момент) и крутящего момента от СКЗ тока (I_{rms})

нейшем для силовых передач стали использоваться, главным образом, зубчатые волновые передачи.

Гибкое колесо в волновой передаче в зависимости от конструкции генератора волн может нести

одну, две, три и более волн деформации. Однако, поскольку передаточное отношение волновой передачи не зависит от количества волн деформации на гибком колесе, а увеличение их числа способствует



РИС. 3. Схематическое изображение конструкции волновой передачи

РИС. 4. ►

Потери на гистерезис.
График изменения
соотношения между
моментом и углом
скручивания

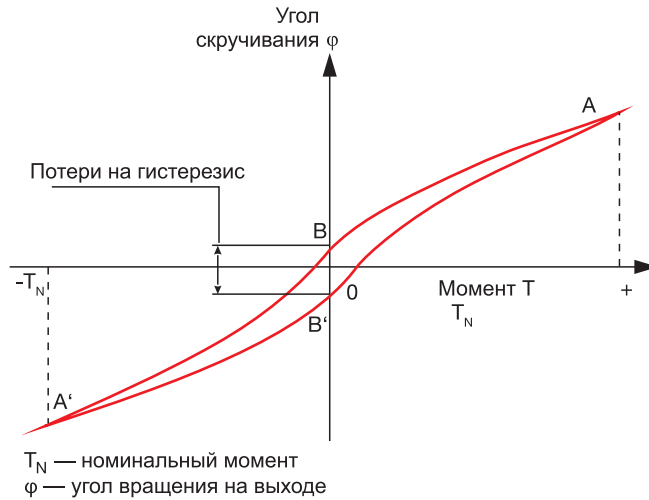


РИС. 5. ▼

Потери движения.
График соотношения
между углом отклонения
и приложенным
моментом в пределах
 $\pm 4\%$ от номинального
момента T_N

T_N — номинальный момент
 ϕ — угол вращения на выходе

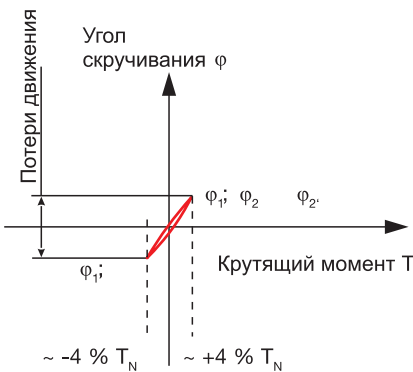


РИС. 6. ►

Повторяемость.
Схематическое
изображение

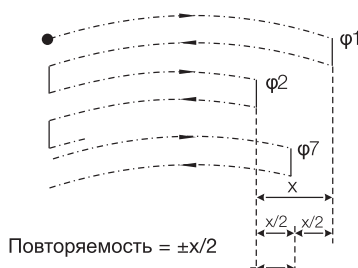
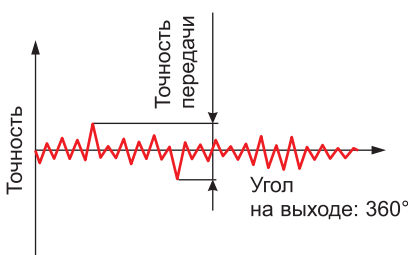


РИС. 7. ▼

Точность передачи
движения



росту изгибных напряжений в теле гибкого колеса, чаще всего используется симметричная двухволновая схема деформации гибкого колеса, позволяющая исключить возникновение поперечных нагрузок на валах передачи.

В большинстве известных конструкций гибким является колесо с внешним зубчатым венцом, а жесткое колесо оснащено внутренними зубьями. Такая волновая передача включает три основных звена: гибкое и жесткое колеса, а также генератор волны (рис. 3). Обычно конструктивно бывает наиболее удобно входной вал редуктора соединить с генератором волн, а выходной — с гибким колесом; в этом варианте конструкция редуктора становится наиболее компактной и технологичной. Легкая конструкция и большие передаточные числа на одной ступени (до 160:1) волновых передач позволяют использовать их в конструкциях, требующих минимального веса и объема.

Сама по себе волновая передача безлюфтовая. Напомним, что люфт — это разница между пространством для размещения зубьев и шириной зуба. В случае с волновой передачей эта разница равна нулю благодаря особенности конструкции. При номинальных нагрузках процент находящихся в зацеплении зубьев составляет 15–25% от их общего числа. Таким образом, в волновых передачах применяется мелкозубчатое зацепление, а количество зубьев колес находится в пределах 100–600. Зона зацепления в волновой зубчатой передаче совпадает с вершиной волны деформации.

При этом для описания точности волновой передачи движения корректно использовать ряд терминов: потери на гистерезис, потери движения, повторяемость и точность передачи движения. Разберем их:

- Потери на гистерезис (рис. 4). При приложенном к выходному звену редуктора крутящем моменте с заблокированным входным звеном изменение соотношения между крутящим моментом (Torque) и углом скручивания (Torsion) происходит по кривой A–B–A'–B'–A. Величина разницы между точками B и B' определяется как потери на гистерезис (Hysteresis loss).
- Потери движения (рис. 5). Этот термин (Lost Motion) используется для описания жесткости скручивания в области малых моментов. Он описывает угол отклонения выходного звена при зафиксированном генераторе волны и приложенном к выходному звену моменте в диапазоне $\pm 4\%$ от номинального момента T_N .
- Повторяемость (рис. 6). Повторяемость (Repeatability) редуктора описывает измеренную разницу позиции при повторяющемся движении в одну и ту же точку в одном и том же направлении. Определяется как половина максимальной измеренной разницы с указанием знака \pm .
- Точность передачи движения (рис. 7). Точность передачи движения (Transmission accuracy) показывает ошибку линейности между входным и выходным звеном. Измеряется на одном полном обороте выходного звена без реверса и представляет собой сумму максимального положительного и отрицательного отклонений фактического угла поворота выходного звена редуктора от расчетного (теоретического).

Приведенные характеристики в совокупности дают представление о точностных свойствах волнового редуктора.

На практике благодаря применению в составе сервоприводов ХАРЗА волновых редукторов в зависимости от выбранного передаточного числа обеспечивается безлюфтовая передача момента двигателем на нагрузку с суммарной точностью до 10 угловых секунд (в отдельных случаях — не более 20 угловых секунд). При этом устанавливаемые на выходе сервопривода прецизионные упорно-радиальные

подшипники позволяют приложить относительно большие осевые и радиальные нагрузки на выходной фланец привода. Однако при высоких значениях нагрузок на выходной фланец привода в системе необходимо предусмотреть дополнительный упорный подшипник и механически разгрузить подшипник самого привода.

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

При обеспечении обратной связи сервопривода в большинстве случаев используется один датчик на валу двигателя. В зависимости от задачи применяются датчики Холла, аналоговый (резольвер / СКВТ) или цифровой датчик относительного положения (инкрементальный энкодер) или абсолютного положения (абсолютный энкодер) высокого разрешения, одновременно обеспечивающие и обратную связь по скорости, и обратную связь по положению (рис. 1).

В отдельных случаях при реализации высокоточной системы позиционирования для обеспечения обратной связи по скорости и положению применяются два разных датчика — инкрементальный энкодер, резольвер или датчики Холла, установленные на валу двигателя для скоростного контура, и датчик абсолютного положения на выходном

звене редуктора. Таким образом реализуется трехконтурная система управления с двумя независимыми контурами на основе датчиков положения вала. Благодаря высокому разрешению абсолютного датчика вторичного контура обратной связи (до 21 бит и выше) обеспечивается компенсация передачи движения на волновом редукторе и точное позиционирование нагрузки. Механически установка высокоточного абсолютного датчика положения на выходном звене редуктора возможна благодаря использованию полого вала в конструкции привода.

Для интеграции такого привода в существующие системы управления (станки ЧПУ, специализированные системы и контроллеры) предусмотрены варианты установки датчиков с соответствующими интерфейсами (EnDat, Hiperface, SSI, BISS, аналоговый sin/cos и др.).

В особых случаях при создании систем управления конструктором применяется дополнительный силовой датчик, формирующий четвертый контур обратной связи. Однако в таком случае для корректной работы сигнал с силовым датчиком должен заводиться не на контроллер привода, а в систему управления верхнего уровня.



РИС. 8. ◀ Варианты компоновки сервоприводов в разных габаритах: ХАРЗА-14, ХАРЗА-20, ХАРЗА-40

МОДЕЛИ СЕРВОПРИВОДОВ

Примеры внешнего вида приводов ХАРЗА в различных вариантах компоновки представлены на рис. 8.

В зависимости от решаемой задачи конструктор может выбрать вариант компоновки без полого вала или с ним. Размеры младшей модели сервопривода ХАРЗА-14 составляют всего 64×86 мм при развиваемом длительном выходном моменте до 11 Нм и краткосрочном до 26 Нм (рис. 9). Особый интерес такой привод представляет для приложений робототехники, мобильных платформ, компактных опорно-поворотных устройств.

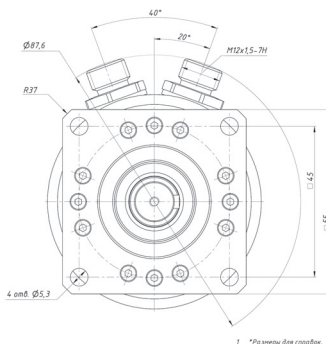
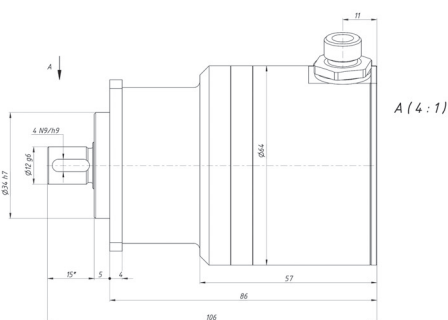


РИС. 9. ◀ Чертеж сервопривода ХАРЗА-14 и его внешний вид

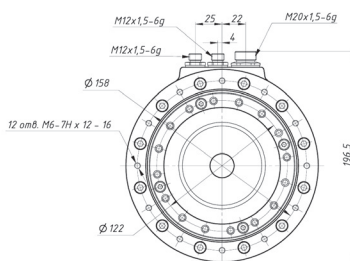
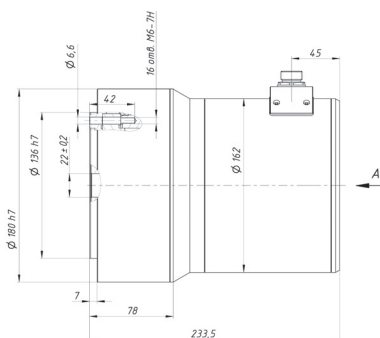


РИС. 10. ◀ Внешний вид и чертеж сервопривода ХАРЗА-40

Габариты самого мощного на настоящий момент сервопривода ХАРЗА-40 ощутимо больше, однако и значения развиваемых моментов составляют 420 и 647 Нм для длительного и кратковременного выходных моментов соответственно (рис. 10). Такое решение представляет интерес для больших опорно-поворотных устройств, точных осей прецизионных станков, металлообрабатывающих центров и других подобных задач.

Общие характеристики сервоприводов с разными габаритами приведены в таблице.

Параллельно ведется работа по выпуску еще нескольких типоразмеров (габаритов) привода, построенных по аналоговой схеме, для обеспечения более широкого круга задач и предоставления заказчику решений в более широком диапазоне моментов.

Резюмируя, заметим, что сервоприводы ХАРЗА обладают рядом особенностей и преимуществ, предоставляющих разработчикам конечных систем широкие возможности. Эти

компактные для своих моментов и возможностей приводы не только работают в широком диапазоне температур (-40...+65 °С), обладают высокой степенью защиты (до IP67) и полым валом, но и обеспечивают доступ конструкторов к высокочастотной мехатронной системе с высокой точностью передачи движения, малым временем отклика, низкой инерцией и достаточно линейной характеристикой, что в совокупности обуславливает хорошую управляемость. При использовании качественного контроллера совместно с сервоприводами можно получить замкнутую систему управления нижнего уровня, обеспечивающую заданные показатели по качеству управления, точности и стабильности. С учетом возможности адаптации каждого из предлагаемых типоразмеров под индивидуальные требования конкретного проекта линейка сервоприводов ХАРЗА представляет собой достаточно гибкие инструменты для решения задач высокоточного позиционирования и реализации систем

управления исполнительными механизмами (приводами) в приложениях разных видов. ●

Подробную информацию по продукту можно найти на сайте harza.innodrive.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория автоматического управления. Конспект лекций для студентов направления подготовки 151900 — конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств. ВГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых / Составитель: Н. Г. Рассказчиков. Владимир. 2012.
2. А. М. Абакумов, П. В. Тулупов, Ю. А. Чабанов. Электрический привод. Часть 1. Электроприводы постоянного тока. Уч. пособие. СГТУ. Самара. 2010.
3. В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. Теория систем автоматического управления. Изд. Профессия. 2003.
4. ILM Series. Frameless Servo Kits // www.tq-group.com.
5. L. Eitel. Basics of Wave and Cycloidal Gearing for Robotics and Servo Designs. Motion Control Tips. June 16. 2022. www.motioncontroltips.com/wave-and-cycloidal-gearing.
6. Harmonic Drive Gears. Engineering data. Harmonic Drive SE. June 2022.
7. М. Н. Иванов. Волновые зубчатые передачи. Изд. Высшая школа. 1981.

ТАБЛИЦА. ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРВОПРИВОДОВ ХАРЗА

| Модель | ХАРЗА-14 | | | ХАРЗА-20 | | | | | ХАРЗА-40 | | | | |
|--|---|------|------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|------|------|-------|-------|
| | 50 | 80 | 100 | 50 | 80 | 100 | 120 | 160 | 50 | 80 | 100 | 120 | 160 |
| Передаточное число | 50 | 80 | 100 | 50 | 80 | 100 | 120 | 160 | 50 | 80 | 100 | 120 | 160 |
| Максимальный кратковременный выходной момент, Нм | 9 | 18 | 26 | 56 | 70 | 82 | 86 | 92 | 256 | 310 | 528 | 560 | 647 |
| Максимальный продолжительный момент при 0 об/мин, Нм | 6,8 | 6,9 | 11 | 32 | 49 | 49 | 49 | 49 | 124 | 220 | 260 | 320 | 420 |
| Скорость холостого хода (на выходе), об/мин | 90 | 56,3 | 45 | 102 | 63,75 | 51 | 42,5 | 31,88 | 62 | 38,8 | 31 | 25,83 | 19,4 |
| Номинальная скорость (на выходе), об/мин | 83 | 51,9 | 41,5 | 90 | 56,25 | 45 | 37,5 | 28,13 | 53 | 33,1 | 26,5 | 22,08 | 16,6 |
| Максимальный кратковременный ток, А | 9 | 9 | 9 | 33 | 27 | 27 | 28 | 30 | 70 | 70 | 70 | 70 | 54 |
| Максимальный продолжительный ток при 0 об/мин, А | 8,5 | 7,8 | 8,2 | 15,2 | 14,85 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 29 | 31 | 30 | 30,5 | 30 |
| Постоянная момента (на выходе), Нм/А | 0,8 | 0,84 | 1,3 | 2,1 | 3,3 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 4,23 | 7,06 | 8,63 | 10,45 | 13,96 |
| Постоянная момента (двигатель), Нм/А | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| Номинальный момент двигателя, Нм | 0,5 | 0,47 | 0,47 | 0,84 | 0,82 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 2,61 | 2,79 | 2,7 | 2,74 | 2,7 |
| Механическая мощность, Вт | 205 | 205 | 205 | 395 | 385 | 345 | 345 | 345 | 725 | 775 | 750 | 765 | 750 |
| Постоянная напряжения (фаза-фаза; действующее значение переменного тока) при +20 °С, В/1000 об/мин | 3,4 | | | 3,3 | | | | | 5,47 | | | | |
| Постоянная напряжения (фаза-фаза; амплитудное значение переменного тока) при +20 °С, В/1000 об/мин | 4,8 | | | 4,68 | | | | | 7,74 | | | | |
| Напряжение на двигателе, амплитудное значение, В | 24 | | | 24 | | | | | 24 | | | | |
| Число пар полюсов | 10 | | | 10 | | | | | 15 | | | | |
| Номинальная скорость двигателя, об/мин | 4150 | | | 4500 | | | | | 2650 | | | | |
| Скорость холостого хода двигателя, об/мин | 4500 | | | 5100 | | | | | 3100 | | | | |
| Сопrotивление обмотки (фаза-фаза) при +20 °С, Ом | 0,1475 | | | 0,285 | | | | | 0,0185 | | | | |
| Длина, мм | 86 | | | 192 | | | | | 234 | | | | |
| Диаметр, мм | 64 | | | 106 | | | | | 180 | | | | |
| Рабочие температуры, °С | -40...+65 | | | | | | | | | | | | |
| Варианты датчиков обратной связи | Энкодер (абсолютный/инкрементальный), резольвер | | | | | | | | | | | | |
| Класс защиты | До IP 67 | | | | | | | | | | | | |
| Нормально-замкнутый тормоз, В | 24 | | | | | | | | | | | | |
| Масса, кг | 1,2 | | | 4,7 | | | | | 10,3 | | | | |