

УДК 62-9

А. А. Махов, канд. техн. наук, **П. С. Белов**, канд. техн. наук, **О. Г. Драгина**, канд. техн. наук, доцент, **М. А. Сосенков**, зам. главного конструктора
Егорьевский технологический институт филиал ФГБОУ ВО МГТУ «Станкин», Россия,
АО «Станкотех», Россия.

Тел./Факс: +7(496)4030476; E-mail: eti-stankin@mail.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРИВОДОВ ПОДАЧ ФРЕЗЕРНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ЧПУ ПОРТАЛЬНОГО ТИПА

Применение механических преобразователей движений (редуктора и преобразователя вращательного движения в поступательное) в приводах подач в металлорежущих станках ухудшает их параметры: к общей погрешности добавляется погрешность, обусловленная неточностью изготовления преобразователей; возникают «люфтовые» явления; точностные параметры привода ухудшаются по мере механического износа преобразователей. Одним из путей повышения качественных характеристик электроприводов - это применение линейных электродвигателей прямого действия.

Ключевые слова: привод, механические преобразователи, линейные электродвигатели.

A. A. Makhov, P.S. Belov, O.G. Dragina, M. A. Sosenkov

MODERNIZATION OF THE FEED DRIVES FOR MILLING MACHINING CENTER, CNC GANTRY TYPE

The use of mechanical motion transducers (reducer and rotary motion Converter in the translational) in the feed drives in metal-cutting machines worsens their parameters: an error due to the inaccuracy of the transducers manufacturing is added to the General error; "backlash" phenomena occur; the accuracy parameters of the drive deteriorate as the mechanical wear of the converters. One of the ways to improve the quality characteristics of electric drives is the use of direct - acting linear motors.

Keywords: drive, mechanical converters, linear motors.

1. Введение

В настоящее время в конструкциях многоцелевых станков наметилась устойчивая тенденция применения в качестве исполнительных устройств перемещения линейных координат (осей) приводов прямого действия на базе линейных двигателей. Линейные двигатели, управляемые от современных цифровых микропроцессорных систем, обеспечивают оптимальные технологические режимы обработки на современных станках. При этом достигаются весьма высокие показатели точности и производительности практически всех видов обработки: точение, фрезерование, сверление, шлифование, а также электрофизические виды обработки [2, 3, 4, 5, 6].

По сведениям фирмы Frost&Sullivan (США), представленных в [6], за счет превосходства линейных электродвигателей по ряду параметров над многими механическими системами, область применения линейных двигателей постоянно расширяется, в частности в медицинской и оборонной промышленности, а также в транспортировании материалов, где она пока неоправданно мала. А по прогнозам фирм Siemens Linear Motor Systems (Германия) и GE Fanuc Automation Deutschland (Германия) выпуск линейных двигателей с учетом их дальнейшего совершенствования будет увеличиваться довольно быстрыми темпами.

Главным препятствием создания и широкого внедрения линейных электроприводов прямого действия являются недостаточная разработка теорий, научных основ расчета, системотехнических и конструкторско-технологических вопросов, а также практика проектирования таких приводов. Из-за этого их проектирование становится сложной многокритериальной задачей [7, 8, 1, 9, 12]. Тем не менее, выполненные па-

тентные исследования демонстрируют весьма высокую активность в этих областях электромеханики и мехатроники (особенно в США, Японии, Германии).

На основании вышеизложенного **актуальность проекта обоснована** необходимостью дальнейшего развития исполнительных устройств перемещения линейных координат (осей) приводов прямого действия на базе линейных двигателей, применение которых обеспечивает высокие динамические и скоростные характеристики приводов подач металлорежущих станков.

Целью работы является проектирование приводов подач портально-фрезерного обрабатывающего центра по осям «X» и «Y» на линейных электродвигателях АО «Станкотех».

Новизна проекта состоит в том, что на основе проведенного анализа возможности применения линейных приводов подач портально-фрезерного обрабатывающего центра АО «Станкотех» по осям «X» и «Y», расчета силовых факторов в приводах, расчетов приводов подач траверсы и каретки для двух режимов осуществлен выбор линейных электродвигателей фирмы «Siemens».

Практическая значимость проекта - расчет приводов подач фрезерного 5-ти координатного обрабатывающего центра портального типа с ЧПУ с целью реализации возможности установки линейных электродвигателей.

1. Анализ конструкции фрезерного 5-ти координатного обрабатывающего центра портального типа с ЧПУ.

Пятикоординатный продольно-фрезерный обрабатывающий центр предназначен для обработки крупногабаритных деталей (плит, рам, корпусов и т.д.) из конструкционных сталей, алюминиевых сплавов и композитных материалов.

На рисунке 1 показана модель основных элементов станка, участвующих в движениях подач по координатам X и Y.

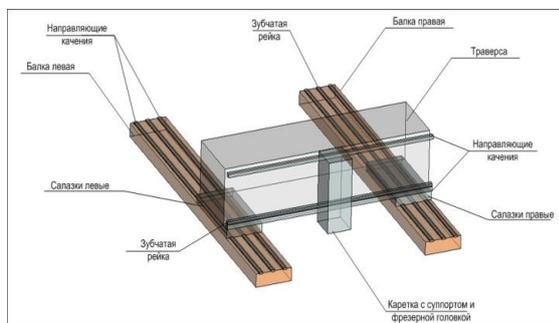


Рисунок 1. Модель основных элементов станка

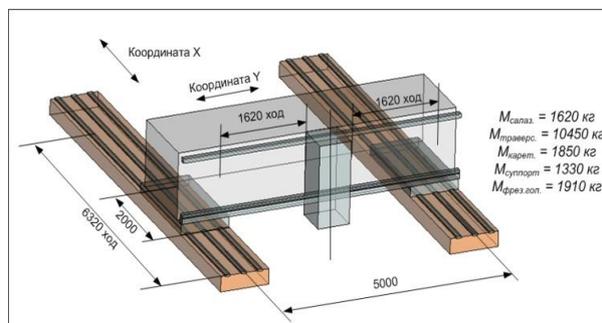


Рисунок 2. Геометрические и инерционные параметры узлов станка.

Фрезерная головка располагается на суппорте, размещаемом на каретке. Каретка может перемещаться по траверсе по направляющим качения фирмы Schneebarger. Перемещение каретки (координата Y) осуществляется от двух синхронных двигателей фирмы Siemens через передачу «зубчатое колесо-рейка».

Траверса располагается на двух салазках (правой и левой), перемещающихся по направляющим качения фирмы Schneebarger по правой и левой балкам. Привод перемещения траверсы также состоит из четырех синхронных электродвигателей фирмы Siemens (по два двигателя на правой и левой салазках) и передач «зубчатое колесо-рейка».

На рис. 2 показаны некоторые геометрические и инерционные параметры рассматриваемых узлов станка.

Требования к приводам:

$$a_{max} = 3 \text{ м/с}^2;$$

$$V_{max} = 90 \text{ м/с.}$$

масса подвижных частей: суппорт - 1330 кг., фрезерная головка – 1910 кг.

Необходимо проанализировать возможность замены синхронных электродвигателей и передач «зубчатое колесо-рейка» на линейные электропривода, а также рассчитать требуемые характеристики линейных двигателей и подобрать их из каталога фирмы Siemens.[11]

2. Расчет приводов подач с целью реализации возможности установки линейных электродвигателей.

Расчет силовых факторов в приводах.

Выбор линейных электродвигателей осуществляется по нескольким параметрам, главные из которых: максимальное усилие F_{max} ; номинальная рабочая нагрузка F_N и максимальная скорость V_{max} .

Так как значение максимальной скорости V_{max} задано, то необходимо лишь определить силовые характеристики приводов.[10]

Построение расчетных моделей.

Ориентировочно максимальное усилие F_{max} можно определить, используя упрощенную формулу:

$$\overline{F_{max}} = 1,5 \cdot (\overline{F_a} + \overline{F_g}) \quad (1)$$

где $\overline{F_a} = m \cdot a$ – сила инерции перемещаемого тела, Н;

m – масса перемещаемого тела, кг;

a – ускорение тела, м/с²;

$\overline{F_g}$ – эффективная составляющая гравитационной силы, Н. (Так как проектируемые приводы осуществляют перемещение узлов станка в горизонтальной плоскости, то $\overline{F_g} = 0$.)

Также необходимо определить силу трения:

$$\overline{F_{тр}} = \mu \cdot (\overline{F_n} + \overline{F_d}) \quad (2)$$

где $\overline{F_n}$ – нормальная составляющая силы трения, Н;

$\overline{F_d}$ – сила магнитного притяжения первичной секции, Н.

μ - коэффициент трения (для направляющих качения $\mu = 0,001 \dots 0,005$).

Сила $\overline{F_d}$ является характеристикой конкретной модели линейного привода, поэтому уточненный расчет привода, можно будет выполнить только после выбор электродвигателя.

Коэффициент трения качения зависит от многих факторов: зазора/натяга, смазки, температуры и пр.). Ориентировочно примем $\mu = 0,005$.

Очевидно, что большую часть времени, привод будет не с максимальной нагрузкой F_{max} , а номинальной F_N . Чтобы ее рассчитать, необходимо знать характеры нагружения приводов. Это может быть задано в виде временных диаграмм или схем действия сил.

Номинальная сила F_N рассчитывается по формуле:

$$F_N = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t F^2(t) dt} \quad (3)$$

В общем случае, суммарная сила, которая действует на привод, будет складываться из следующих составляющих:

$$\overline{F_{\Sigma}} = \overline{F_a} + \overline{F_g} + \overline{F_{тп}} + \overline{F_p} \tag{4}$$

где $\overline{F_p}$ – рабочее усилие, Н, (в нашем случае – эффективная составляющая силы резания).

Для составления временной диаграммы действующих на электродвигатель сил, проанализируем их составляющие.

При ускоренном перемещении узла из одного крайнего положения в другое (например, траверсы), привод разгоняет перемещаемый объект с постоянным ускорением a_{max} до максимальной скорости v_{max} , далее перемещает его с максимальной скоростью v_{max} , а в конце замедляет движение с постоянным отрицательным ускорением (торможением) до $v=0$.

Таким образом, временная диаграмма будет выглядеть, как показано на рис. 3.

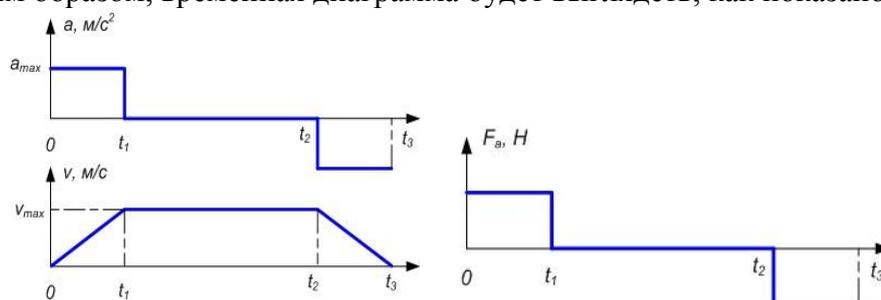


Рисунок 3. Временная диаграмма.

Зная массу подвижных частей и величины их перемещений, по параметрам a_{max} и v_{max} можно оценить не только F_a , но и времена разгонов, остановов и т.п., необходимых для расчета F_N .

Силу трения можно считать условно постоянной на всем участке диаграммы $\overline{F_{тп}}$ (см. рис. 4).



Рисунок 4. Диаграмма силы трения.

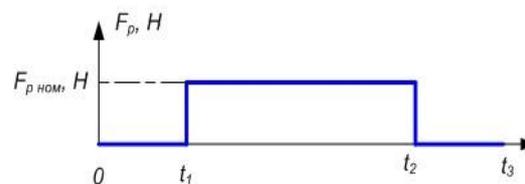


Рисунок 5. Диаграмма силы резания.

Рабочее усилие $\overline{F_p}$ (сила резания) – переменная составляющая, которая зависит от типа обработки, обрабатываемого материала, геометрии инструмента и пр. факторов. Распределение составляющих этой силы на силы F_N приводов координат X и Y будет зависеть от расположения обрабатываемых поверхностей, направления резания и пр. факторов. Точную оценку значение силы резания на этапе проектирования приводов проводить нецелесообразно. Можно лишь задаться ориентировочным значением номинальной силы резания $F_{p ном}$ и периодом ее действия на временной диаграмме (см. рис. 5).

Расчет привода подач траверсы (координаты «X»)

Траверса, установленная на подвижных салазках, перемещается по двум балкам (правой и левой).

В виду, того что при перемещении траверсы, каретка в общем случае будет располагаться на траверсе не в центре (плоскости симметрии), а в промежуточном положении, то и центр масс также будет смещен. Это приведет к различным усилиям в правом и левом линейном приводе.

Так, если каретка будет находиться в крайнем правом положении (возле правой балки), то усилия в правом приводе будут больше, и наоборот. Поэтому при расчете силы $\overline{F_a}$, приходящейся на один линейный двигатель, будет анализировать этот крайний («неблагоприятный») случай. На рис. 6 расчетная схема сил для определения силы инерции F_a .

Для нахождения F_1 и F_2 составим два уравнения статики:

$$\sum F_x = 0: F_{a2} + F_{a1} - F_1 - F_2 = 0;$$

$$\sum M_{z1} = 0: -F_{a1} \cdot 2500 - F_{a2} \cdot 4120 + F_2 \cdot 5000 = 0.$$

Тогда,

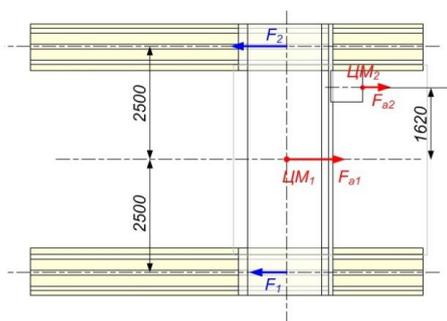
$$F_2 = \frac{F_{a1} \cdot 2500 + F_{a2} \cdot 4120}{5000} = 33120\text{Н}$$

$$F_1 = F_{a1} + F_{a2} - F_2 = 41070 + 15270 - 24730\text{Н} = 23220\text{Н}$$

Таким образом, за расчетную силу инерции принимаем большую из F_1 и F_2 , т.е. $\overline{F_a} = F_2 = 33120\text{Н}$

По формуле (1) ориентировочно определяем максимальную силу F_{max} для выбора электродвигателя.

$$F_{max} = 1,5 \cdot 33120 \approx 50000\text{Н}$$



- $ЦМ_1$ – центр масс траверсы с салазками;
- $ЦМ_2$ – центр масс каретки с суппортом и фрезерной головкой;
- F_{a1} – сила инерции траверсы салазками;
- F_2 – сила инерции каретки с суппортом и фрезерной головкой;
- F_1, F_2 – силы в приводах

Рисунок 6. Расчетная схема сил для определения силы инерции F_a .

Линейные электродвигатели фирмы Siemens имеют максимальную силу $F_{max} = 20700\text{Н}$. Таким образом, для получения необходимого значения F_{max} нужно будет использовать три первичные секции на каждой вторичной (см. рис. 7).

По значению F_{max} подбираем модель первичной секции линейного двигателя фирмы Siemens – см. табл. 1.

Длина вторичной секции составляет всего 184 мм. Необходимую длину вторичной секции для хода траверсы в 6320 мм можно получить, устанавливая стандартные вторичные секции рядом.

Далее приводится проверочный расчет линейных электродвигателей Siemens серии 1FN3 (см. табл. 1) с тремя первичными секциями на каждой вторичной.

В каталогах Siemens не указано значение $\overline{F_d}$ (силы магнитного притяжения первичной секции). Ориентировочно принимаем $\overline{F_d} = 2 \cdot F_{max} = 41400\text{Н}$ (для каждого первичной секции)

Таблица 1. – Характеристики линейных электродвигателей серии 1FN3 фирмы Siemens.

				
Первичные секции				
Модель	F_N, H	F_{max}, H	$V_{max}(F_N), м/мин$	$V_{max}(F_{max}), м/мин$
1FN3900-4NB20-0BA1	10375	17610	129	70
1FN3900-4NB20-0BA3	10375	17610	129	70
Вторичная секция				
1FN3900-4SA00-0AA0	$L = 184 мм$			

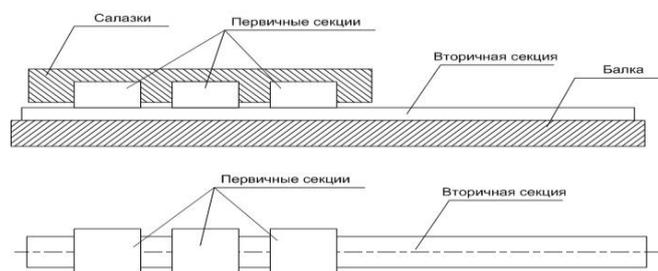


Рисунок 7. Соотношение первичных и вторичных секций.

Определим силу трения по формуле (2), где $F_n = mg$ – вес, приходящийся на наиболее нагруженную направляющую качения.

$$\overline{F_{тр}} = 0,005 \cdot (110500 + 3 \cdot 41400) \approx 2415Н$$

Для расчета усилия F_N проанализируем два режима работы:

Первый режим

1. Быстрое перемещение траверсы (например, из точки смены инструмента).

Длину перемещения примем равной половине длине хода траверсы $L \approx 3200 мм$ – участок T_1 ;

2. Рабочее перемещение траверсы (с выполнением резания) – время цикла обработки (участок T_2) примем как $T_2 = T_1 \cdot 10$;

3. Ускоренный возврат траверсы в исходную точку (участок $T_3 = T_1$).

С ускорением $a_{max} = 3 м/с^2$ привод разгоняет траверсу до $V_{max} = 90 м/мин$ за 0,5 с и проходит 375 мм, такое же расстояние потребуется, чтобы затормозить. Остальной участок $3200 - 2 \cdot 375 = 2450 мм$ траверса проходит за 1,63 с. Таким образом, длительность первого участка составит $T_1 = 0,5 + 1,63 + 0,5 = 2,63 с$.

Длину второго участка примем $T_2 \approx 25 с$.

Длина третьего участка $T_3 = T_1$.

На рисунке 8 показана временная диаграмма распределения силовых факторов в приводе координаты Y.

Так как, временная диаграмма имеет ступенчатый вид, то для определения F_N можно воспользоваться формулой:

$$F_N = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^n (F_i^2 t_i)} \tag{5}$$

Приняв ориентировочное значение силы резания, приходящейся на привод $F_{p\text{ ном}} = 12000\text{ Н}$, и подставив все компоненты сил и временных интервалов в формулу (5) получим:

$$F_N = \sqrt{\frac{1}{30,26} (35535^2 \cdot 0,5 \cdot 2 + 30705^2 \cdot 0,5 \cdot 2 + 14415^2 \cdot 25 + 2415^2 \cdot 1,63 \cdot 2)} \approx 15700\text{ Н}$$

Тогда на каждую первичную секцию (из трех) будет приходиться номинальное тяговое усилие:

$$F_N = 15700/3 = 5230\text{ Н.}$$

Как видно из табл. 1 все рассматриваемые линейные электродвигатели фирмы Siemens имеют значение F_N больше расчетного.

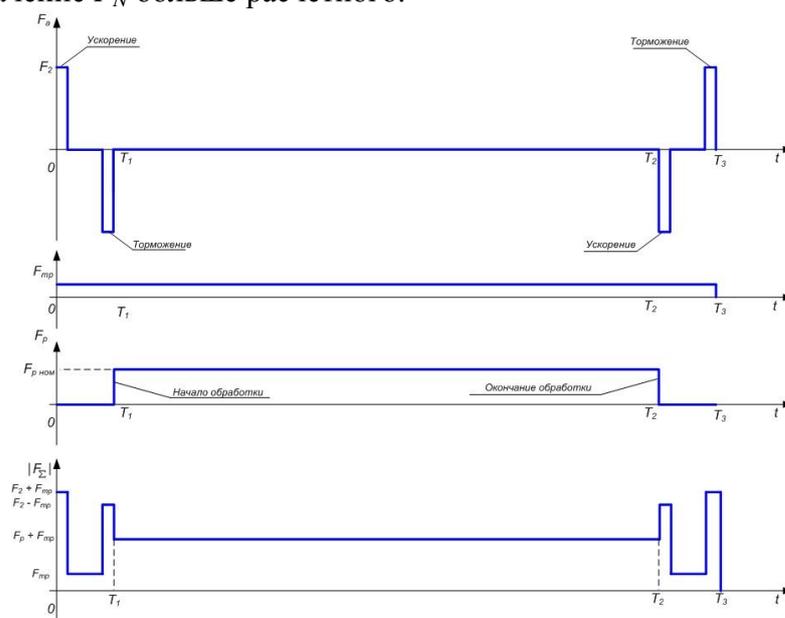


Рисунок 8. Временная диаграмма распределения силовых факторов в приводе координаты Y.

Рассмотренный режим работы привода, и соответствующая ему временная диаграмма, является весьма условной. Тем не менее, позволяет определить порядок силы F_N и подтвердить возможность практического использования линейных электродвигателей в приводе подачи траверсы.

Полагается, что реальные действующие значения F_N окажутся ниже расчетных, так как зачастую обработка будет выполняться по координате Y (т.е. при полном остатке траверсы), также привод будет простаивать при сменах инструментах, а ускорения при рабочих подачах могут быть меньше максимальных, к тому же, чистовая обработка характеризуется существенно меньшими усилиями резания, чем принято при расчетах. Это все гарантирует дополнительный запас долговечности линейных электродвигателей.

Второй режим

Второй режим характеризуется непрерывными разгонами и остановами привода (см. рис. 3 и 9), что возникает при обработке большого числа элементов сложной детали и частом позиционировании узлов станка.

Примем интервалы $T_1 = T_2 = T_3 = 0,5\text{ с}$ (разгон/движение/торможение).

Тогда:

$$F_N = \sqrt{\frac{1}{1,5} (35535^2 \cdot 0,5 + 30705^2 \cdot 0,5 + 2415^2 \cdot 0,5)} \approx 27150\text{H}$$

А на одну первичную секцию (из трех) будет приходиться:

$$F_N = 27150/3 = 9050\text{H}.$$

Обработка сложных деталей с большим числом обрабатываемых элементов приводит к частым быстрым перемещениям элементов станка, которые следуют друг за другом с небольшими паузами на обработку (например, центрование отверстий). Рассмотренный режим работы привода является наиболее неблагоприятным, так как в виду больших перемещаемых масс, наибольшие силы, возникающие в приводе – силы инерции. Проблема перегрева двигателя может быть устранена, применением системы защиты от перегрева. Так, первичные секции мод. 1FN3900-4WC00-0BA3, 1FN3900-4WB50-0BA3, 1FN3900-4WB00-0BA3, 1FN3900-4NB20-0BA3 фирмы Siemens имеют встроенные терморезисторные температурные зонды PTC120 и температурные датчик Pt1000. Все линейные электродвигатели фирмы Siemens требуют водяного охлаждения.

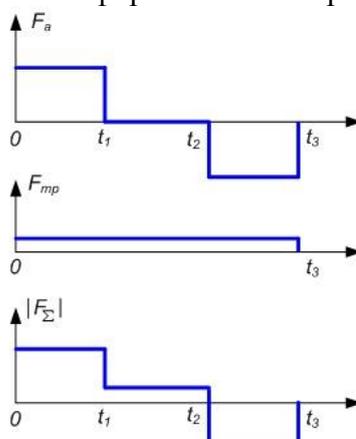


Рисунок 9. Диаграммы второго режима.

Расчет привода подач каретки (координаты «Y»)

Расчет требований к линейному электродвигателю для привода подач каретки аналогичен рассмотренному выше.

Каретка перемещается по направляющим качения, расположенным на траверсе. Таким образом, число вторичных секций линейного привода равно единице.

Силу инерции определим как $\overline{F_a} = m \cdot a_{max}$, где m – суммарная масса каретки, суппорта и фрезерной головки:

$$\overline{F_a} = 5090 \cdot 3 = 15270\text{H}$$

По формуле (1) ориентировочно определяем максимальную силу F_{max} для выбора электродвигателя.

$$F_{max} = 1,5 \cdot 15270 \approx 22905\text{H}$$

Потребуется две первичные секции, например, [1FN3900-4NB20-0BA3](#) (см. табл. 1).

Вторичная секция также будет образована комбинацией секций 1FN3900-4SA00-0AA0 по 184 мм.

Далее приводится проверочный расчет линейных электродвигателей Siemens [1FN3900-4NB20-0BA3](#) с двумя первичными секциями.

$$\overline{F_d} = 2 \cdot F_{max} = 35220\text{H} \text{ (для каждой первичной секции)}$$

$$\overline{F_{\text{тр}}} = 0,005 \cdot (50900 + 2 \cdot 35220) \approx 610 \text{ Н}$$

Для расчета усилия F_N также проанализируем два режима работы:

Первый режим

1. Быстрое перемещение траверсы (например, из точки смены инструмента). Длину перемещения примем равной половине длине хода каретки $L \approx 1620 \text{ мм}$ – участок T_1 ;

2. Рабочее перемещение траверсы (с выполнением резания) – время цикла обработки (участок T_2) примем как $T_2 = T_1 \cdot 10$;

3. Ускоренный возврат траверсы в исходную точку (участок $T_3 = T_1$).

С ускорением $a_{\text{max}} = 3 \text{ м/с}^2$ привод разгоняет траверсу до $V_{\text{max}} = 90 \text{ м/мин}$ за $0,5 \text{ с}$ и проходит 375 мм , такое же расстояние потребуется, чтобы затормозить. Остальной участок $1620 - 2 \cdot 375 = 590 \text{ мм}$ траверса проходит за $0,4 \text{ с}$. Таким образом, длительность первого участка составит $T_1 = 0,5 + 0,4 + 0,5 = 1,4 \text{ с}$.

Длину второго участка примем $T_2 \approx 14 \text{ с}$.

Длина третьего участка $T_3 = T_1$.

По формуле (5):

$$F_N = \sqrt{\frac{1}{16,8} (15880^2 \cdot 0,5 \cdot 2 + 14660^2 \cdot 0,5 \cdot 2 + 12000^2 \cdot 14 + 610^2 \cdot 0,4 \cdot 2)} \approx 12150 \text{ Н}$$

Тогда на каждую первичную секцию (из двух) будет приходиться номинальное тяговое усилие:

$$F_N = 12150/2 = 6075 \text{ Н.}$$

Второй режим

Примем $T_1 = T_3 = 0,5 \text{ с}$ (разгон/торможение), $T_2 = 0,2 \text{ с}$ (движение с V_{max}).

Для привода координаты Y номинальное тяговое усилие составит:

$$F_N = \sqrt{\frac{1}{1,2} (15880^2 \cdot 0,5 + 14660^2 \cdot 0,5 + 610^2 \cdot 0,2)} \approx 14000 \text{ Н}$$

А на одну первичную секцию (из двух) будет приходиться:

$$F_N = 14000/2 = 7000 \text{ Н.}$$

Все рассматриваемые линейные электродвигатели фирмы Siemens из табл. 1 имеют допустимое F_N больше расчетного.

Заключение.

Результатом проведённых работ и расчетов по проекту стали следующие **выводы**.

1. Линейные электродвигатели (в частности, двигатели фирмы Siemens) возможно использовать для реализации приводов подач траверсы и каретки (по координатам X и Y соответственно) портального фрезерного обрабатывающего центра АО «Станко-тех».

2. Наибольшие усилия F_{max} в приводах возникают из-за большой инерции движущихся частей станка (особенно по координате X).

3. Привод перемещения каретки (координаты Y) может быть реализован, как линейный электродвигатель с двумя первичными ступенями [1FN3900-4NB20-0BA3](#) (или 1FN3900-4WB50-0BA3) и вторичной 1FN3900-4SA00-0AA0.

4. Привод перемещения траверсы (координаты X) может быть реализован, как два линейных электродвигателя (по одному на правой и левой балках) с тремя первичными ступенями [1FN3900-4NB20-0BA3](#) и вторичной 1FN3900-4SA00-0AA0 каждый.

5. Число первичных секций в линейных электродвигателях подачи траверсы (координаты X) можно уменьшить до 4 (по две каждую вторичную секцию) за счет снижения максимального ускорения с 3 м/с^2 до 2 м/с^2 .

6. Стандартная вторичная секция 1FN3900-4SA00-0AA0 имеет длину $L = 184$ мм, поэтому необходимые ходы перемещений каретки и траверсы можно получить, размещая несколько вторичных секции в ряд.

7. Все электродвигатели требуют водяного охлаждения, а при наиболее нагруженных режимах (постоянные разгоны/остановы), рекомендуется контролировать температуру двигателей, не допуская их перегрева выше 120°C .

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловейчик, Ю. Г. Конечноэлементное моделирование электродинамических процессов в линейном электромагнитном двигателе / Ю. Г. Соловейчик, М. Г. Персова, В. Ю. Нейман // Электричество – 2004. – № 10.

2. Драгина О. Г. Повышение качества продукции за счет уменьшения погрешности привода подач / О. Г. Драгина // Вестник Курганского государственного университета. Сер.: Технические науки. – 2006. – № 5-1. – С. 135-136.

3. Аванесов, М. А. Оптимизация электромагнитной структуры линейных мехатронных модулей / М. А. Аванесов, А. П. Валковой, В. Е. Луценко, Ю. Ф. Ляшук // Привод техн. – 2001. – № 5. – С. 36-41, 11 ил. Библ. 3. Рус.

4. Козярук, А. Е. История и перспективы развития полупроводниковой преобразовательной техники и систем электропривода на ее основе / А. Е. Козярук, В. С. Томасов // Изв. Вузов. Приборостроение. – 1998. – № 1-2.

5. Основы проектирования следящих систем. Под редакцией д-ра техн. наук проф. Н.А. Лакоты. – М.: «Машиностроение», 1978. – 391 с.

6. Романов, В. В. Промышленная информатика: Межвуз. сб. научн. тр. / В. В. Романов, В. Л. Бурковский, Э. Г. Кузнецов, В. А. Поваляев – Воронеж: Воронежский ГТУ, 2003. – 178 с.

7. Бут, Д. А. Линейные вентильно-индукторные двигатели / Д. А. Бут, Е. Н. Чернова // Электричество. – 1999. – № 12 – С. 32-41.

8. Ефимов И. Г. Линейный электромагнитный привод / И. Г. Ефимов, А. В. Соловьев, О. А. Викторов. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. – 212 с.

9. Стеклов, В. К. Системы управления с безредукторным приводом / В. К. Стеклов, Р. Э. Милько. – К. Техника, 1983. – 120 с., ил. – Библиогр.: С. 118-119.

10. Математическое моделирование технологических процессов. Учебное пособие (конспект лекций). Допущено УМО АМ в качестве учебного пособия для студентов ВУЗ, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / П. С. Белов. – Егорьевск: ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2016. – 121 с.: ил.

11. Драгина О. Г. Модернизация настольного токарного станка JET BD-3 / О. Г. Драгина, В. А. Макаров, П. С. Белов // Технология машиностроения. – 2014. – № 3. – С. 32-34.

12. Технологическое обеспечение качества. Практикум. / В. А. Макаров, О. Г. Драгина, М. И. Седых, П. С. Белов – Москва; Берлин, ДиректМедиа, 2015.

Поступила в редколлегию 14.05.2018 г.