

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Петухов С.В., Надеин В.Ф., Радюшин В.В., Кришьянис М.В.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск

Ключевые слова: точность позиционирования, деревообрабатывающий станок, исполнительный механизм, рабочий орган, электропривод, линейный асинхронный электродвигатель, регулирование скорости, следящий режим, привод релейного действия.

Аннотация. В статье рассматривается решение задачи выбора привода поступательного движения для точного позиционирования рабочего органа деревообрабатывающих станков. Рассмотрены технико-экономические показатели пневматического, гидравлического и электрического приводов. Получены зависимости значимых показателей – скорости вращения, быстродействия, вращающего момента и мощности, – влияющих на точность позиционирования. Рассмотрена динамика физических процессов, происходящих при перемещении рабочего органа из исходного положения в требуемое с заданной точностью. Подобраны законы изменения скорости с точки зрения оптимизации по быстродействию цикла позиционирования рабочего органа. Показана целесообразность использования электропривода с электродвигателем поступательного действия (линейным асинхронным двигателем) в деревообрабатывающем станке с точным позиционированием рабочего органа. В качестве примеров приведены механизмы перемещения в ленточнопильных станках и механизмы перемещения пильного суппорта круглопильных обрезающих станков.

OPERATION ANALYSIS OF FORWARD MOTION ELECTRIC DRIVES IN WOOD-WORKING EQUIPMENT

Petukhov S.V., Nadein V.F., Radyushin V.V., Krishjanis M.V.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk

Keywords: movement accuracy of machine mechanism, woodworking machine, actuating mechanism, operating part, electric drive, linear asynchronous motor, speed regulation, tracking mode, relay drive.

Abstract. The problem of choice of a forward motion electric drive for wood-working machines is being solved. Technical-economic parameters of pneumatic, hydraulic and electric drives have been examined. The dependence of parameters (rotation speed, torque, power) influencing the movement accuracy of a machine mechanism has been identified. The dynamics of the physical process in moving of the operating part from the starting position to the required position has been examined. The law of change of velocity from the point of view of optimization in terms of performance of operating part has been installed. Expediency of using the electric drive with a linear asynchronous motor in a wood-working machine has been demonstrated. The mechanism for moving of the bandsaw machine and the mechanism for moving of the saw support has been reviewed.

Введение

В технических устройствах различного назначения применяются все типы приводов: пневматические, гидравлические электрические. Электрические приводы обладают рядом ценных преимуществ перед пневматическими и гидравлическими. Электродвигатели не используют промежуточного рабочего энергоносителя: жидкости или газа; скорость движения привода с электродвигателем легко регулируется. Но у приводов с электродвигателями есть и недостатки – недостаточная грузоподъемность и относительно большие габариты для малых систем [1].

В зависимости от типа исполнительного механизма и применяемой системы управления точностью позиционирования перемещением рабочего органа из исходного положения в требуемое с заданной точностью может осуществляться одним из следующих способов: ограничением пути движения рабочего органа жестким упором или системой взаимосвязанных жестких упоров; автоматическим отключением привода при достижении заданного положения с одновременным включением торможения для уменьшения

свободного выбега; плавным уменьшением скорости от максимального до минимального значения по мере уменьшения сигнала рассогласования – при позиционировании в так называемом следящем режиме [1-3].

Первый способ используется в сравнительно простых системах, в которых программносителем является барабан мерных позиционеров. Недостатками этого способа являются ограниченное число позиций (положений) и удары на заключительном этапе позиционирования. Второй способ, получивший наибольшее распространение в деревообрабатывающих станках [4, 5], позволяет осуществлять позиционирование в релейном режиме с отключением привода на скорости медленного подвода. При позиционировании в следящем режиме закон изменения скорости $V=f(t)$ выбирается исходя из двух основных требований к системе: обеспечения необходимой точности остановки в заданном положении и достаточного быстродействия. Выполнение этих требований обычно достигается применением двух- или трехскоростного привода с автоматическим переключением скорости медленного привода V_M (рис. 1, а).

В таком режиме работает, например, электромеханический привод механизма совместного перемещения стоек на тележках ленточнопильных станков [5]. Команда переключения на замедленную скорость подается с опережением по пути с учетом возможного разброса положения точки переключения и длительности переходного процесса снижения скорости. Необходимая скорость медленного подвода выбирается из условия уменьшения разброса выбега рабочего органа до величины, удовлетворяющей нормам точности [1-3].

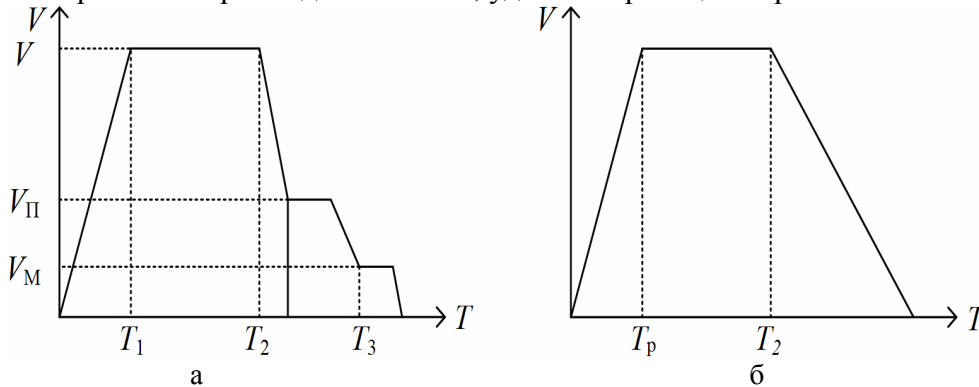


Рис. 1. Графики скоростей позиционирования в трехскоростном приводе релейного действия (а) и при позиционировании в следящем режиме (б)

Материалы и методы исследований

Экспериментальными исследованиями установлено [6-8], что при скоростях медленного подвода $V_M < 10...15$ мм/с – разброс выбега ΔS рабочего органа, перемещаемого электродинамическим приводом релейного действия, достаточно точно подчиняется линейному закону

$$\Delta S = \pm V_M \tau (\sigma_v + \sigma_\tau), \quad (1)$$

где τ – время запаздывания исполнительного привода; σ_v, σ_τ – безразмерные коэффициенты, учитывающие относительные случайные колебания скорости перемещения и времени запаздывания и определяемые по формуле:

$$\sigma_v = \Delta V_M / V_M; \quad \sigma_\tau = \Delta \tau / \tau, \quad (2)$$

где ΔV_M и $\Delta \tau$ – диапазоны разброса скорости медленного подвода и времени запаздывания.

Время запаздывания τ есть отрезок времени с момента поступления команды с последующим действием на отключение привода до ее исполнения:

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i + \tau_{И.М}, \quad (3)$$

где τ_i – время отпускания (срабатывания) электрического аппарата блока управления; n – число аппаратов, последовательно участвующих в передаче команды исполнительному органу; $\tau_{И.М}$ – время запаздывания исполнительного механизма [3].

Зная параметры выражения (1), можно определить значение допустимой скорости медленного подвода

$$V_M \leq (\sigma_y - \Delta_{\text{сист}}) / [\tau(\sigma_v + \sigma_i)], \quad (4)$$

где σ_y – допустимое отклонение на установку; $\Delta_{\text{сист}}$ – систематическая погрешность позиционирования.

При любом методе позиционирования в релейном режиме существует конечное значение скорости быстрого перемещения (ускоренного подвода) V_y , при которой длительность цикла позиционирования будет минимальной. Эту скорость принято называть оптимальной по быстродействию.

Для многих деревообрабатывающих станков необходимая точность позиционирования при высоком быстродействии обеспечивается двухскоростным режимом с автоматическим переключением на замедленную скорость V_M при подходе к заданному положению. С некоторыми допущением можно считать, что в этом случае скорость перемещения изменяется по трапецидальному закону. Анализ двухступенчатого графика изменения скорости приводит к следующему выражению для пройденного пути

$$L = V_y T - \frac{V_y^2}{2} \left(K + \frac{2\Delta\tau}{V_M} \right) - \frac{V_M}{2a_2} \quad (5)$$

или для длительности цикла позиционирования

$$T = \frac{L}{V_y} + \frac{V_y}{2} \left(K + \frac{2\Delta\tau}{V_M} \right) + \frac{V_M}{2a_2}, \quad (6)$$

где $K = 1/a_1 + 1/a_2$; a_1 и a_2 – ускорения при разгоне и замедлении.

Из условия минимизации среднего времени цикла, то есть при $\partial T / \partial V_y = 0$ получим выражение для оптимальной скорости быстрого перемещения

$$V_{y, \text{опт}} = \sqrt{2L(K + 2\Delta\tau/V_M)}. \quad (7)$$

Аналогично можно получить выражения, соответствующие трехступенчатому графику движения. Из выражения (7) следует, что ряд факторов определяет оптимальную скорость перемещения, а именно: величины перемещения L , которая может меняться в широких пределах. Поэтому при расчете оптимальной скорости рекомендуется исходить из наиболее вероятных перемещений, характерных для данного типа станка или механизма. Так, для круглопильных обрезных станков наиболее характерно перемещение пильного суппорта на 50...60 мм [9-11].

$$V_{np} = \sqrt{V_y V_M}. \quad (8)$$

При ступенчатом переключении скоростей и позиционировании в релейном режиме выявляется недостаток в виде возникновения значительных инерционных нагрузок в моменты переключения скорости:

$$P_{ин} = M_{np} a_2 = M_{np} [(V_y - V_{np}) / t_{пер}], \quad (9)$$

где M_{np} – приведенная масса перемещаемого рабочего органа; $t_{пер}$ – время переключения со скорости ускоренного привода V_y на промежуточную V_{np} .

Чем больше масса перемещаемого рабочего органа, тем выше инерционные нагрузки, возникающие в момент переключения скорости.

Результаты

При позиционировании рабочих органов со значительными массами, а также при повышенных требованиях к точности и быстродействию их установки к позиционным механизмам предъявляются более высокие требования в отношении динамики процесса позиционирования. В этих случаях целесообразно применение следящих механизмов, обеспечивающих позиционирование рабочих органов в следящем режиме с плавным изменением скорости на участках разгона и торможения (рис 1, б). Благодаря наличию отрицательной обратной связи по положению такой механизм осуществляет позиционирование с плавным изменением скорости перемещаемого органа,

пропорциональной сигналу рассогласования в сравниваемом устройстве. При этом процесс торможения становится управляемым и обеспечиваются необходимая плавность снижения скорости и постоянство допускаемого ускорения [12-14].

Оптимальный по быстродействию цикл позиционирования рабочего органа с постоянным ускорением достигается при треугольном законе изменения скорости и условии, что время разгона T_p равно времени торможения. При графическом представлении закон изменения скорости $V(t)$ в этом случае представляет собой равнобедренный треугольник, а период позиционирования имеет два одинаковых по длине участка: участок разгона и участок торможения, осуществляемых с допускаемым ускорением a_{max} . Однако такой закон изменения скорости не учитывает ряда других ограничений, например наибольшей скорости, развиваемой исполнительным двигателем, поэтому редко реализуем [2, 13].

Заключение

Ограничение по максимальной скорости перемещения приводит к изменению оптимального закона и превращению его в трапецеидальный закон. Если принять в качестве оптимального симметричный трапецеидальный закон изменения скорости, то получим цикл позиционирования, имеющий три участка: разгона с постоянным ускорением $+a$, участка движения с установившейся скоростью V_y и участка торможения с постоянным замедлением $-a$. При этом параметры движения связаны простой зависимостью:

$$a = V_y^2 / (V_y T - L), \quad (10)$$

где a – наибольшее ускорение на участках разгона и торможения; T – время перемещения рабочего органа на величину пути L .

Используя выражение (10), можно определить величину постоянного по модулю ускорения a , с которым надо разгонять и тормозить передвигаемый рабочий орган для обеспечения заданного быстродействия T при выбранном значении скорости V_y .

Подобное режим позиционирования используется при работе лифтов в жилых домах и работе грузоподъемных механизмах, а также в робототехнике.

Автоматизация и энергоэффективность производственных процессов – одно из основных направлений современных производств.

Усредненные энергетические показатели приводов различных систем приведены в таблице 1; из них наиболее важными являются следующие:

- 1) мощность N_y , требуемая для управления системой;
- 2) максимальная мощность N , скорость v и момент M электрической машины;
- 3) КПД η совокупности электродвигателя и приводного механизма;
- 4) масса и габарит на единицу мощности всей системы;
- 5) динамические и статические характеристики.

Табл. 1. Усредненные показатели приводов

Показатель	Электрический привод	Пневматический привод	Гидравлический привод
Энергонапряженность, МПа	0,4-0,6	0,6-0,8	5,5-6
Развиваемый момент и усилие (в относительных единицах)	1	10	150 и более
Удельный вес исполнительного механизма, кВт/Н	0,051-0,071	0,0204-0,102	0,102-0,255
Объем двигателя, %	100	60-180	12-15
Момент инерции двигателя, % от момента инерции всей системы	50	8-12	5
Диапазон рабочих частоты вращения, скорости перемещения	100-3000 мин ⁻¹ , 30 м/с	100000 мин ⁻¹ , 300 м/с	4000 мин ⁻¹ , 30 м/с
Диапазон регулирования частоты вращения	1:100	1:100	1:1000
Поддержание постоянной скорости при изменении нагрузки (в относительных единицах)	1	Почти невозможна	30 и более
Количество реверсов двигателя в минуту	До 10-20	До 1500-1600	До 1000

Табл. 1. Продолжение

Показатель	Электрический привод	Пневматический привод	Гидравлический привод
Частота надежного срабатывания, Гц	50-100 (электро-механический)	10-50	100-200
Быстродействие следящей системы (в относительных единицах)	1	5-8	10-15
Дальность передачи энергии (дальнодействие), м	Неограниченная	300-600	50-60

Выводы

1. По конструктивным показателям наилучшими приводами в деревообработке следует считать гидравлические. Для малых мощностей – $N < 40$ Вт – выгодно применять пневматические и электрические двигатели, а для $N > 50$ Вт – гидравлические.

2. Допустимыми следует считать электромеханический привод при мощности двигателя N меньше 50 Вт; пневматический привод – при мощности N меньше 500 Вт, и электрогидравлический и пневматический приводы – при необходимом моменте M меньше 10^3 Н·м. При большем значении мощности – допустимы только гидравлический или электрофрикционный приводы.

3. Применение линейного асинхронного двигателя в электроприводах промышленных механизмов дает преимущество за счет их функциональности, кинематической простоты, надежности, технологичности.

4. Другим видом линейных машин, применяемых в приводах, являются линейные электродвигатели постоянного тока. Линейные асинхронные двигатели обеспечивают следующие режимы работы: разгон с заданным ускорением, установившееся движение, торможение с заданным ускорением, установившееся движение, торможение с заданным ускорением, позиционирование за счет работы в режиме короткого замыкания на упор с заданным значением усилия.

5. Для обеспечения высокой точности позиционирования требуется применения в системе высокоточных измерителей положения: штриховые оптические или лазерные интерферометрические датчики положения. Направляющие конструкции механической части для повышения точности и предупреждения износа необходимо изготавливать с пониженным сопротивлением трению. Для этой цели часто применяют воздушный подвес перемещающейся каретки устройства.

6. Устройство управления двигателем, задающее различные режимы его работы, а также координаты точек позиционирования, управляются от специализированной микроЭВМ. Эта же ЭВМ обрабатывает сигналы перемещения, поступающие с датчиков внешней информации.

7. Рекомендуются широкое внедрение линейных, дугостаторных и цилиндрических асинхронных электродвигателей.

Список литературы

1. Выжигин А.Ю. Гибкие производственные системы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2012. – 288 с.
2. Яговкин А.И. Управление производственно-экономическими системами: учебное пособие. – 2-е изд. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – 272 с.
3. Машиностроение: энциклопедия. В 40 т. Т. IV-2: Электропривод. Гидро- и виброприводы / под ред. В.К. Асташева, Д.Н. Попова. – М.: Машиностроение, 2012. – 303 с.
4. Веселков В.И., Сметанин А.В. Лесопиление: между прошлым и будущим. – М.: ДоМира, 2005. – 544 с.
5. Амалицкий В.В. Деревообрабатывающие станки и инструменты. – М.: Изд. центр «Академия», 2011. – 400 с.
6. Емельянов В.П., Волков В.М., Маркин Н.И. Исследование и разработка линейных асинхронных двигателей для привода пил // Повышение эффективности энергетических систем и оборудования: Сборник научных трудов. – Архангельск: АГТУ, 1999. – С. 50-58.
7. Маркин Н.И. Особенности проектирования цилиндрических асинхронных линейных двигателей для механизмов позиционирования // Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. – Архангельск: РИО ЦНИИМОД, 1989. – С. 84-87.
8. Маркин Н.И. О преимуществах линейных электроприводов в механизмах позиционирования // Резервы использования материальных и трудовых ресурсов: Научные труды. – Архангельск: РИО ЦНИИМОД, 1988. – С. 183-187.
9. Алексеев А.Е., Емельянов В.П., Маркин Н.И. Линейный асинхронный двигатель для привода дисковых пил

// Моделирование, оптимизация и интенсификация производственных процессов и систем: сборник статей международной научно-технической конференции. – Вологда: Изд-во ВГТУ, 2004. – С. 136-141.

10. Емельянов В.П., Маркин Н.И. Цилиндрический линейный двигатель // Совершенствование энергетических систем и технологического оборудования: Сборник научных трудов.– Архангельск: АГТУ, 2002.– С. 78-80.
11. Алексеев А.Е., Петухов С.В., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А., Радюшин В.В., Бабкин И.М., Кришьянис М.В. Исследование возможности применения линейного асинхронного двигателя для привода пильного суппорта обрезного станка // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 107-115.
12. Кришьянис М.В. К вопросу повышения точности позиционирования обрезных станков // Актуальные проблемы метрологического обеспечения научно-практической деятельности: материалы II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Архангельск: Изд-во С(А)ФУ им. М.В. Ломоносова, 2018. – С. 150-155.
13. Теоретические основы формирования интегративной системы управления безопасностью производства: монография / Под ред. Г.Н. Яговкина. – Самара: АСИ СамГТУ, 2018. – 275 с.
14. Довганюк И.Я., Мурзаков А.Г., Шакарян Ю.Г. Выбор регулируемого тиристорного электропривода тягодутьевых механизмов ТЭС // Электрические станции. – 1984. – №11. – С. 27-31.

References

1. Vyzhygin A.Yu. Flexible production systems: study guide. – М.: Mechanical engineering, 2012. – 288 p.
2. Yagovkin A.I. Management of economic systems: study guide. – 2-nd edition. – Tyumen: TyumSOaGU, 2010. – 272 p.
3. Mechanical engineering: encyclopedia. In 40 vol. Vol. IV-2: Electric drive. Hydraulic- and vibration drives / edited by of V.K. Astashev, D.N. Popov. – М.: Mechanical engineering, 2012. – 303 p.
4. Veselkov V.I., Smetanin A.V. Sawmilling: between the past and the future. – М.: DoMira, 2005. – 544 p.
5. Amalitsky V.V. Woodworking machines and tools. – М.: Publ. center «Academy», 2011. – 400 p.
6. Emelyanov V.P., Volkov V.M., Markin N.I. Research and development of linear asynchronous motors to drive the saws // Effectiveness increase of energy systems and equipment: collection of articles. – Arkhangelsk: ASTU, 1999. – P. 50-58.
7. Markin N.I. Design features of cylindrical linear asynchronous motors for positioning mechanisms // Collection of articles of All-Union scientific and technical conference. – Arkhangelsk: RIO TSNIIMOD, 1989. – P. 84-87.
8. Markin N.I. About the benefits of linear electric drives in positioning mechanisms // Reserves for the use of material and labor resources: Collection of articles. – Arkhangelsk: RIO TSNIIMOD, 1988. – P. 183-187.
9. Alekseev A.E., Emelyanov V.P., Markin N.I. Linear asynchronous motor for the drive of circular saws // Modeling, optimization and intensification of production processes and systems: collection of articles of international scientific and technical conference. – Vologda: Publ. house of VSTU, 2004. – P. 136-141.
10. Emelyanov V.P., Markin N.I. Cylindrical linear asynchronous motor // Improvement of energy systems and technological equipment: Collection of articles. – Arkhangelsk: ASTU, 2002. – P. 78-80.
11. Alekseev A. E., Petukhov S.V., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Radyushin V.V., Babkin I.M., Krishjanis M.V. Study the possibility of using a linear asynchronous motor to drive the saw support of an edger // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023, no. 19, pp. 107-115.
12. Krishjanis M.V. On the issue of improving the positioning accuracy of edging machines // Actual problems of metrological support of scientific and practical activities: collection of articles of II All-Russian scientific and technical conference with international participation. – Arkhangelsk: Publ. house of S(A)FU n.a. M.V. Lomonosov, 2018 – P. 150-155.
13. Theoretical foundations of the formation of an integrative production safety management system: monograph / edited by of G.N. Yagovkin. – Samara: ASI SamSTU, 2018. – 275 p.
14. Dovganyuk I.Ya., Murzakov A.G., Shakaryan Yu.G. Selection of an adjustable thyristor electric drive for traction mechanisms of thermal power plants // Electric stations. 1984, no. 11, pp. 27-31.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Петухов Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	Petukhov Sergey Vasilievich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
Надеин Валерий Феодосиевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	Nadein Valery Feodosievich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
Радюшин Вячеслав Витальевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	Radyushin Vyacheslav Vitalievich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
Кришьянис Майя Волдемаровна – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники	Krishyanis Maya Voldemarovna – senior lecturer of the Department of electricity and electrical engineering
m.krishjyanis@narfu.ru	

Получена 07.10.2024