

ОПТИМАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**А.Н. Шишков¹, К.М. Виноградов², А.Е. Бычков¹, Е.В. Белоусов¹,
Д.А. Сычев¹, Н.И. Наумович¹, Е.С. Хаятов¹**

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Усть-Катаве,
г. Усть-Катав*

Определена оптимальная траектория движения позиционного электропривода на примере механизма подачи стана холодной прокатки труб. Показано, что оптимальной формой кривой скорости является треугольник, а соотношение его сторон зависит от вида нагрузочной диаграммы, в частности от влияния главного привода прокатной клетки, и не зависит от наличия люфта и упругости в системе. Данный тезис, доказанный аналитически, подтверждается результатами, полученными на математической модели, учитывающей влияние главного привода на привод подачи. Проведенная статистическая обработка осциллограмм, полученных на реальном объекте, позволила дать рекомендации по оптимальному управлению электроприводом подачи стана ХПТ-450. Исходя из полученных данных о том, что момент наброса нагрузки, обусловленный попаданием трубы в валки прокатной клетки, происходит в промежутке $(0,6 \dots 0,75)t_n$, рекомендуемым соотношением времени пуска ко времени торможения является 2:1. Проведенная оптимизация траектории движения позволяет получить до 25 % больший среднеквадратичный момент за цикл подачи, что позволит увеличить производительность стана.

Ключевые слова: оптимальная кривая скорости, позиционный электропривод.

При проектировании электропривода одной из главных целей в большинстве случаев является повышение производительности механизма. Однако ограничения, обусловленные возможностями силового, механического и электромеханического оборудования, например, по току, максимальной скорости, нагреву, делают актуальной задачу оптимального управления электроприводом [1–4].

Поэтому синтез силовой части электрооборудования необходимо начинать с поиска оптимальной кривой скорости рабочего органа $\omega(t)$. Критерием расчета принимался минимум электрических потерь в электроприводе

$$Q = \min_{\varphi \in \Phi} Q(i; r),$$

где $Q = \int_0^{t_n} I^2 r dt$ – активные потери в обмотке. При расчете постоянным принималось значение суммарного угла поворота рабочего органа $\varphi = f(M_c(t); \omega(t)) = \text{const}$. Предполагалось, что переменные электрические потери зависели только от тока и активного сопротивления обмотки, которое не изменяется при нагреве машины.

Методом вариационного исчисления доказывается, что для случая, когда единственным ограничением при проектировании электропривода является ограничение по нагреву, оптимальными являются параболическая диаграмма скорости и линейная диаграмма тока [5]. Однако при учете ограничения по току вид оптимальных диаграмм меняется. В случае, когда

$$I_m \geq \sqrt{Q/T},$$

где I_m – максимальное значение тока, T – время цикла; длина линейного участка оптимальной диа-

граммы обращается в ноль. Оптимальной становится прямоугольная форма, при которой ток меняется от $+I_m$ до $-I_m$. Диаграмма скорости приобретает «треугольный» вид с изломом в момент времени t_n (рис. 1). В этом случае время пуска и торможения равны соответственно:

$$t_n = \frac{T}{2} + \frac{M_c T}{2I_m},$$

$$t_r = \frac{T}{2} - \frac{M_c T}{2I_m}.$$

Для диаграммы, учитывающей локальное ограничение по току:

$$Q = I_m^2 t;$$

$$h = \frac{1}{4T^2} \sqrt{\frac{Q}{T} - M_c^2} = \frac{1}{4T^2} \sqrt{I_m^2 - M_c^2},$$

где Q – суммарные потери, h – перемещение исполнительного механизма.

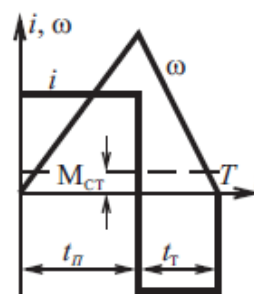


Рис. 1. Оптимальные нагрузочные диаграммы тока и скорости при учете ограничений по нагреву и току

Таким образом, форма нагрузочных диаграмм была определена однозначно. Однако величину

участков пуска и торможения следовало уточнить. Оптимальной кривой скорости позиционного электропривода является равнобедренный треугольник или трапеция, т. е. оптимальным является соотношение времени разгона к времени торможения 1:1 [6]. Между тем оптимальным соотношением времени разгона к времени торможения является 2:1. Оптимизируется данное соотношение по критерию минимума потребляемого из сети тока при максимальном перемещении.

В силу отсутствия обоснования оптимального соотношения времени разгона ко времени торможения выскажем ряд гипотез, объясняющих это утверждение [7]. Предположим, что на положение оптимума влияет наличие люфта. Тогда при том же графике скорости двигателя, что и в случае идеальной системы, труба переместится на меньшее расстояние. Будем сдвигать во времени сигнал на торможение, увеличивая тем самым время разгона (рис. 2). Критерием оптимизации является отношение среднеквадратичного момента двигателя за время позиционирования к перемещению трубы $M_{\text{ср.кв.}}/s$, где

$$M_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{п.п}}} \int_0^{T_{\text{п.п}}} (M(t))^2 dt}.$$

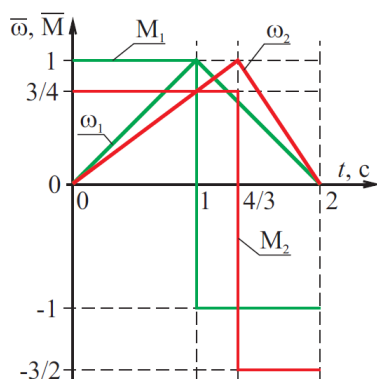


Рис. 2. Пояснение к расчету $M_{\text{ср.кв.}}/s$

Тогда при постоянстве модуля ускорения на всем времени переходного процесса

$$\begin{aligned} \overline{M_{\text{ср.кв.1}}} &= \sqrt{M_{\text{п}}^2 t_{\text{п}} + M_{\text{т}}^2 t_{\text{т}}} \\ &= \sqrt{1^2 \cdot 1 + 1^2 \cdot 1} = \sqrt{2}. \end{aligned}$$

Принимаем, что разгон осуществляется до $\overline{\omega} = 1$, время пуска $t_{\text{п}} = 1$ с, время торможения $t_{\text{т}} = 1$ с. Во втором случае, например, когда время пуска $t_{\text{п}} = 4/3$ с, время торможения $t_{\text{т}} = 2/3$ с, т. е. сумма $t_{\text{п}} + t_{\text{т}}$ также равна 2 с:

$$\begin{aligned} \overline{M_{\text{ср.кв.2}}} &= \sqrt{M_{\text{п}}^2 t_{\text{п}} + M_{\text{т}}^2 t_{\text{т}}} \\ &= \sqrt{\left(\frac{3}{4}\right)^2 \cdot \frac{4}{3} + \left(\frac{3}{2}\right)^2 \cdot \frac{2}{3}} = \frac{3}{2}. \end{aligned}$$

Перемещение s трубы в системе с бесконечной жесткостью винта C , которую в общем случае можно считать одномассовой, будет равно

$$s = \int_0^{T_{\text{п.п}}} \omega_1(t) dt.$$

В случае идеально быстродействующего контура момента график скорости во времени будет иметь треугольную форму. Тогда перемещение можно рассчитать как площадь данного треугольника. Очевидно, что она не будет зависеть от доли времени разгона, так как

$$\bar{s} = \frac{1}{2} T_{\text{п.п}} \overline{\omega} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 1 = 1.$$

При наличии люфта, равного в пределе $1/8$ s, перемещение в обоих случаях будет равно $\bar{s}_1 = \bar{s}_2 = 7/8$.

Сравнивая два данных случая, можно убедиться, что

$$\frac{\overline{M_{\text{ср.кв.1}}}}{\bar{s}_1} < \frac{\overline{M_{\text{ср.кв.2}}}}{\bar{s}_2}.$$

Далее была выдвинута гипотеза о том, что оптимальная доля времени разгона зависит от жесткости винта. Тогда график скорости будет иметь криволинейный характер. Перемещение трубы можно рассчитать как

$$s = \int_0^{T_{\text{п.п}}} \omega_2(t) dt,$$

где ω_2 – приведенная угловая скорость трубы.

Обе гипотезы проверялись на математической модели в пакете Matlab [8]. Электропривод был представлен в виде двухмассовой модели. Справедливость такого математического описания доказывается методом декомпозиции. На рис. 3 и 4 приведены результаты исследований [9]. Из графиков становится понятным, что при любой упругости винта и наличии максимального возможного люфта оптимальным остается соотношение $t_{\text{п}}:t_{\text{т}} = 1:1$. Кроме того, на рис. 4 можно заметить, что при значительном уменьшении жесткости винта система становится чрезмерно податливой, и при том же моменте перемещение трубы будет стремиться к нулю, как и показатель M/s . При увеличении жесткости выше $\bar{C} = 120$ показатель $M/s = \text{const}$, и система в этом случае вырождается в одномассовую [10–12]. Однако данные исследования проводились при $M_c = 0$ и не учитывают реального характера нагрузки.

Позиционный электропривод подачи, работающий на участке разгона, преодолевает момент сопротивления, создаваемый перемещаемой трубой, а на участке торможения к этому моменту добавляется усилие, обусловленное влиянием главного привода. Наилучшее использование электропривода по нагреву идет при постоянном графике электромагнитного момента и при изменяющейся во времени кривой момента сопротивления, динамический момент на участке торможения существенно превышает момент на участке разгона электропривода.

Очевидно, что при попадании трубы в валки на последнем этапе позиционирования изменяется вид графика момента сопротивления во времени с постоянного на ступенчатобразный. Это обстоятельство заставляет задуматься о необходимости

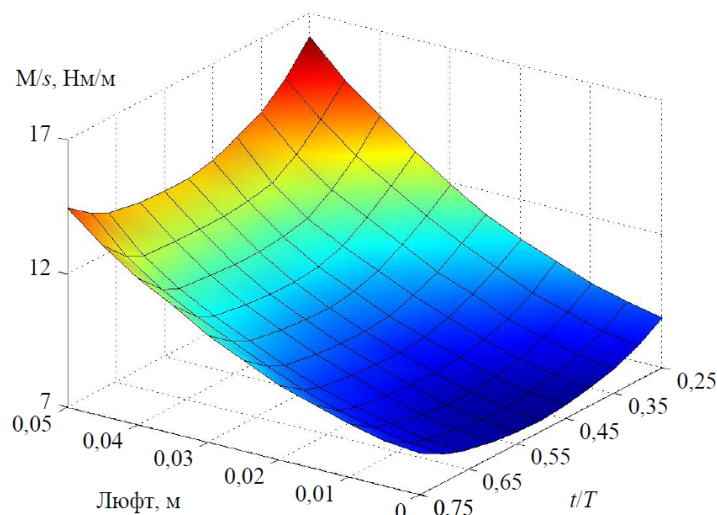


Рис. 3. Зависимость отношения момента двигателя M к перемещению трубы s от люфта и доли времени разгона в общем времени позиционирования

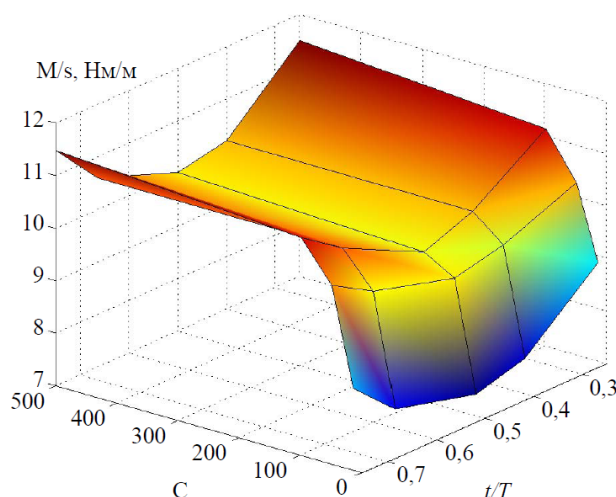


Рис. 4. Зависимость отношения момента двигателя M к перемещению трубы s от жесткости винта C и доли времени разгона в общем времени позиционирования

оптимизации доли времени разгона во времени всего переходного процесса [13].

Данная задача в вариационном исчислении относится к классу изопериметрических. Расчет оптимальной формы кривой скорости выполнялся методом наискорейшего спуска, который представляет собой усовершенствованный градиентный метод. Его отличительной особенностью его является отсутствие необходимости частого вычисления производной от исследуемой функции за счет применения переменного шага H поиска экстремума по направлению. Классический градиентный метод требует вычисления градиента с постоянным шагом [14]. Таким образом, применение метода наискорейшего спуска вдали от оптимума дает значительный эффект, поиск оптимума производится гораздо быстрее. В окрестностях точки

экстремума время его поиска обоими методами практически совпадает.

Алгоритм поиска минимума функции потерь Q при фиксированной форме нагрузочных диаграмм состоял из следующих этапов.

В начальной точке определялся градиент

$$\bar{S}_0 = \nabla Q = \frac{\partial Q}{\partial t_n},$$

где $Q = f(t_n)$. Далее вычислялись координаты следующей точки:

$$t_{n1} = t_{n0} + H\bar{S}_0.$$

В данном случае величина шага H была переменной и при каждом цикле расчета уточнялась из условия

$$F_{k(H_k)} = \min_{H>0} F_{k(H)},$$

где $F_{k(H)} = f[t_n^{(k)} - Hf'(t_n^{(k)})]$.

Величина же скачка, обусловленного попаданием трубы в валки прокатной клетки, может варьироваться, что в существенной мере повлияет на среднеквадратичный момент двигателя за время переходного процесса и в конечном итоге на его нагрев [15]. На рис. 5 представлена зависимость значения оптимального времени пуска $t_n/t_{ц}$ от момента наброса нагрузки t_{Mc} и амплитуды момента сопротивления A_{Mc} . Как и ожидалось, при отсутствии неравномерности момента ($A_{Mc} = 0$) оптимальным соотношением является 0,5. При увеличении A_{Mc} оптимум сдвигается в сторону увеличения. На рис. 6 показана зависимость отношения среднеквадратичного момента при оптимальной траектории к моменту при равенстве участков пуска и торможения от времени и амплитуды скачка момента нагрузки, обусловленного попаданием трубы в валки клетки.

Осциллограммы скорости, полученные на работающем объекте, были обработаны статистически. Поскольку реальной возможности зафиксиро-

вать изменение момента сопротивления не было, точка срыва трубы определялась косвенно по диаграмме скорости [16]. Таким образом, удалось определить среднестатистическое время наброса нагрузки, обусловленное попаданием трубы в валки. Учитывая, что квантиль Стьюдента получился $t_c < 2,26$ для выборки из 10 экспериментов, с вероятностью 95 % можно утверждать, что момент срыва трубы с оправки будет составлять $0,67t_{ц}$. Доверительный интервал для данной выборки будет составлять 0,07. Тогда на основании статистической обработки можно утверждать, что время дискретного увеличения момента нагрузки будет лежать в диапазоне $(0,6...0,74)t_{ц}$ (см. таблицу) [17]. Вертикальными границами на рис. 6 обозначена область предполагаемого времени наброса нагрузки. Полученная выгода в среднеквадратичном моменте считалась для оптимального соотношения времени $t_n/t_{т}$ в сравнении со среднеквадратичным моментом, полученным для соотношения $t_n/t_{т} = 1:1$. Известно, что мощность активных потерь в элек-

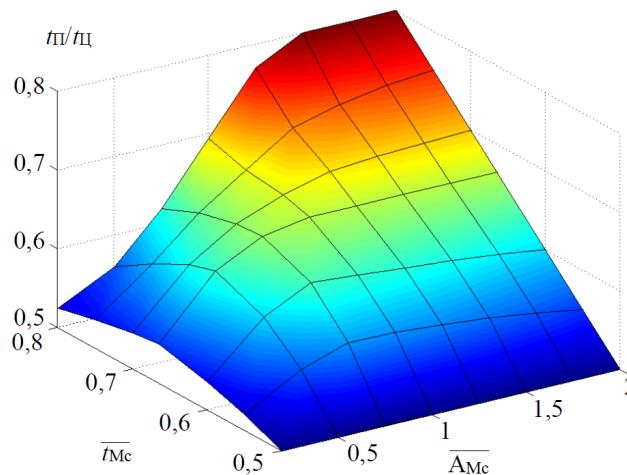


Рис. 5. Оптимальное соотношение $t_n/t_{ц}$ в зависимости от момента срыва трубы с оправки t_{Mc} и амплитуды момента сопротивления A_{Mc}

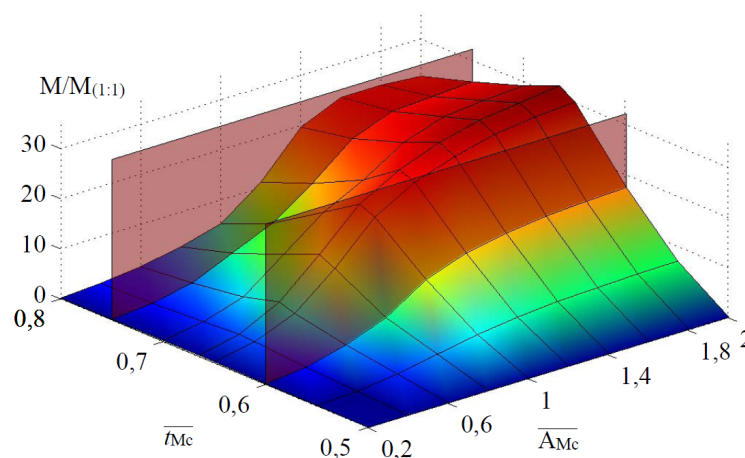


Рис. 6. Зависимость отношения среднеквадратичного момента $M_{ср.кв}$ при оптимальной траектории к моменту при равенстве участков пуска и торможения от времени t_{Mc} и амплитуды A_{Mc} скачка момента нагрузки

Статистическая обработка времени наброса нагрузки

Номер эксперимента	t_n	$t_{н.ср}$	d	d^2
1	0,6	0,67	-0,07	0,0049
2	0,65	0,67	-0,02	0,0004
3	0,68	0,67	0,01	0,0001
4	0,62	0,67	-0,05	0,0025
...				
10	0,73	0,67	0,06	0,0036
$s_d = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}}$	0,07			
$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$	2,13			
$t_{крит}$	2,26			
$E = t \frac{s_d}{\sqrt{n}}$	0,6 < 0,67 < 0,74			

троприводе определяется как $P = I^2 r$. Приближенно можно считать, что $P \approx M^2 r$. Тогда снижаться данные потери будут пропорционально квадрату от выгоды в моменте.

С учетом неравномерного характера нагрузки по критерию минимума $M_{ср.кв}/s$ оптимальное соотношение времени пуска к времени торможения электропривода может варьироваться [18–20]. Рекомендуемым соотношением, исходя из зависимости, представленной на рис. 6 для электропривода подачи стана ХПТ-450, является 2:1.

Литература

1. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 106–113.
2. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения и с другими типами двигателей / М.А. Григорьев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – № 34 (167). – С. 51–55.
3. Тяговый электропривод активного прицепа трубовоза / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, А.Н. Горжанкин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 137–143.
4. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 30–33.
5. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горжанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – № 11 (111). – С. 52–53.
6. New Brushless Synchronous Machine for Vehicle Application / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev,

K.M. Vinogradov, S.P. Gladyshev // SAE Technical Papers. – 2007. – № 1.

7. Григорьев, М.А. Математическая модель синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев, С.И. Кинас // Электротехника. – 2014. – № 10. – С. 60–66.

8. Тяговый электропривод трактора ДЭТ-400 / А.Н. Шишков, Д.А. Сычев, А.Е. Бычков, Н.Ю. Сидоренко // Электротехника. – 2014. – № 10. – С. 24–26.

9. Усынин, Ю.С. Силовые цепи синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, Н.Ю. Сидоренко // Электротехнические системы и комплексы. – 2014. – № 2 (23). – С. 13–16.

10. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев, С.И. Кинас // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 66–70.

11. Журавлев, А.М. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев // Фундаментальные проблемы технических наук: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 58–63.

12. Сычев, Д.А. Улучшение удельных показателей синхронных реактивных электроприводов / Д.А. Сычев, С.И. Кинас, А.М. Журавлев // Достижения и перспективы технических наук: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: Научный центр «Аэтерна», 2014. – С. 38–45.

13. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

14. Усынин, Ю.С. *Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 21–26.

15. Бычков, А.Е. *Оптимизация новых типов электромеханических преобразователей в электротехнических комплексах* / А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Т. 15, № 15 – С. 62–66.

16. *The Electric Drive of a Tram with an Average Floor* / Y.S. Usinin, M.A. Grigorjev, K.M. Vinogradov, A.N. Gorozhankin, S.P. Gladyshev // *SAETechnical Papers*. – 2008. – № 1.

17. Григорьев, М.А. *Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого воз-*

буждения / М.А. Григорьев // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2013. – № 4. – С. 32–36.

18. Пат. 2346376 Российская Федерация. *Синхронная реактивная машина* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. – Заявл. 12.07.2007; опубл. 10.02.2009.

19. Пат. 2408972 Российская Федерация. *Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. – Заявл. 24.12.2009; опубл. 10.01.2011.

20. Пат. 2012143554 Российская Федерация. *Электропривод с синхронной реактивной машиной* / Ю.С. Усынин, А.Н. Горозжанкин, А.Е. Бычков и др. – Заявл. 11.10.2012; опубл. 20.04.2014.

Шишков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Виноградов Константин Михайлович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электромеханика», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Усть-Катаве, г. Усть-Катав; 9191236713@mail.ru.

Бычков Антон Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Белюсов Евгений Викторович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Сычев Дмитрий Александрович, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Наумович Никита Игоревич, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Хаятов Евгений Сергеевич, студент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Поступила в редакцию 12 февраля 2015 г.

DOI: 10.14529/power150311

THE OPTIMUM PATH OF POSITION ELECTRIC DRIVE

A.N. Shishkov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

K.M. Vinogradov, South Ural State University, Ust'-Katav Branch, Ust'-Katav, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

A.E. Bychkov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

E.V. Belousov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

D.A. Sychev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

N.I. Naumovich, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru,

E.S. Khayatov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, 9191236713@mail.ru

The article identifies the optimal path of position electric drive on the example of the pipe cold rolling mill feeding mechanism. It is shown that the optimum speed curve has a triangle form, and its aspect ratio depends on the load diagram, in particular on the influence of roll mill main drive and doesn't depend on the yawn and system elasticity presence. This analytically proved thesis is verified by the results of the mathematical modeling with consideration of the main drive influence on the feeding drive. Statistical analysis of the waveforms

taken on the real object allowed to recommend the optimal mill HPT-450 feeding mechanism electric drive control. On the assumption of the obtained data that load-on torque caused by the pipe encounter to the rolling mill rolls, takes place in the interval of $(0.6...0.75)t_{cycle}$, recommended starting time for the deceleration time ratio is 2:1. Path optimization carried on allows to get up to 25 % more rms torque during the feeding cycle, so increasing the productivity of the mill.

Keywords: optimum speed path, position electric drive.

References

1. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Shishkov A.N., Gorozhankin A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V., Zhuravlev A.M., Sychev D.A. [Active Trailer Electric Drive Modelling]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 106–113. (in Russ.)
2. Grigorew M.A. [Extreme Performance of Electric Drives with Field Regulated Reluctance Machine and with Other Motor Types]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2009, no. 34 (167), pp. 51–55. (in Russ.)
3. Usynin Yu.S., Shishkov A.N., Gorozhankin A.N., Belousov E.V., Zhuravlev A.M., Bychkov A.E., Sychev D.A. [Pipe Carrier Active Trailer Electric Traction Drive]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol.13, no.1, pp. 137–143. (in Russ.)
4. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Shishkov A.N., Lokhov S.P., Zhuravlev A.M. [Parametric Optimization of Variable Speed Drives]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, no. 37 (296), pp. 30–33. (in Russ.)
5. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N. [Specific Indicators of Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2008, no.11 (111), pp. 52–53. (in Russ.)
6. Usinin Y.S., Grigorjev M.A., Vinogradov K.M., Gladyshev S.P. [New Brushless Synchronous Machine for Vehicle Application]. *SAE Technical Papers*, 2007, no. 1.
7. Grigorew M.A., Kinas S.I. A Mathematical Model of the Synchronous Reluctance Machine with Independent Control Along the Excitation Line. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 10, pp. 645–648. DOI: 10.3103/S1068371214100095.
8. Shishkov A.N., Sychev D.A., Bychkov A.E., Sidorenko N.Yu. The DET-400 Tractor Traction Electric Drive. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 10, pp. 610–612. DOI: 10.3103/S1068371214100113.
9. Usinin Y.S., Grigorew M.A., Sidorenko N.Yu. [Power Circuits of Electric Drives with Field Regulated Reluctance Machine]. *Elektricheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes], 2014, no. 2 (23), pp. 13–16. (in Russ.)
10. Zhuravlev A.M., Belousov E.V., Sychev D.A., Kinas S.I. [Mathematical Model of the Field Regulated Reluctance Machine Electric Drive]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 66–70. (in Russ.)
11. Zhuravlev A.M., Belousov E.V., Sychev D.A. [Mathematical Model of the Field Regulated Reluctance Machine Electric Drive]. *Fundamental'nye problemy tekhnicheskikh nauk: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fundamental Problems of Technical Sciences Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference]. Ufa, Aeterna Publ., 2014, pp. 58–63. (in Russ.)
12. Sychev D.A., Kinas S.I., Zhuravlev A.M. [Improvement of Specific Indicators of Synchronous Reluctance Drives]. *Dostizheniya i Perspektivy Tekhnicheskikh Nauk* [Achievements and Prospects of Technical Sciences. Collection of Articles of the International Scientific and Practical Conference]. Ufa, Aeterna Publ., 2014, pp. 38–45. (in Russ.)
13. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Shishkov A.N. [Frequency-Response Data of the Torque Control Channel in Synchronous Electric Drives]. *Electrical Technology Russia*, 2012, no. 4, pp. 54–59. (in Russ.)
14. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Vinogradov K.M. [Electric Drives and Generators with Field Regulated Reluctance Machine]. *Electrical Technology Russia*, 2007, no. 3, pp. 21–26. (in Russ.)
15. Bychkov A.E., Kashaev D.I., Moskov T.T. [Optimization of New Types of Electromechanical Converters in Electrotechnical Complexes]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2011, vol. 15, no.15, pp. 62–66. (in Russ.)
16. Usinin, Y.S., Grigorjev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Gladyshev S.P. The Electric Drive of a Tram with an Average Floor. *SAE Technical Papers*, 2008, no. 1.
17. Grigorew M.A. [Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine]. *Russian Electromechanics*, 2013, no. 4, pp. 32–36. (in Russ.)
18. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Vinogradov K.M. et al. *Sinkhronnaya reaktivnaya mashina*. [Synchronous Reluctance Machine]. Patent RF, no. 2346376. 2009.

19. Usynin Yu.S., Grigorew M.A., Vinogradov K.M. et al. *Elektroprivod s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy i sposob upravleniya im* [Electric Drive with Synchronous Reluctance Machine and Its Control Method]. Patent RF, no. 2408972. 2011.

20. Usynin Yu.S., Gorozhankin A.N., Bychkov A.E. et al. *Elektroprivod s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy* [Electric Drive with Synchronous Reluctance Machine]. PatentRF, no. 2012143554. 2014.

Received 12 February 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Оптимальная траектория движения позиционного электропривода / А.Н. Шишков, К.М. Виноградов, А.Е. Бычков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 82–89. DOI: 10.14529/power150311

FOR CITATION

Shishkov A.N., Vinogradov K.M., Bychkov A.E., Belousov E.V., Sychev D.A., Naumovich N.I., Khayatov E.S. The Optimum Path of Position Electric Drive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 82–89. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150311