

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

**К.М. Виноградов¹, Е.В. Белоусов², Д.А. Сычев², А.М. Журавлев²,
Н.В. Савостеенко², Е.С. Хаятов²**

¹ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Усть-Катаве,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассмотрены различные способы повышения энергоэффективности электроприводов станов холодной прокатки труб. Методами математического моделирования проведены исследования, в ходе которых получены количественные оценки экономии электроэнергии. На примере стана холодной прокатки труб ХПТ-450 построена зависимость среднеквадратичного тока якоря двигателя главного электропривода клетки от частоты среза контура скорости. Рассмотрена возможность экономии электроэнергии за счет предварительного ослабления поля двигателя перед рабочим циклом прокатки. Определены оптимальные с позиции энергосбережения моменты подачи и прекращения импульса на ослабление поля. Выявлены условия, позволяющие обосновать соотношения параметров динамических звеньев и добиться изменения графика работы электропривода, что обеспечивает наибольшее снижение потерь в главном электроприводе клетки стана холодной прокатки труб. Рассмотренные мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности электроприводов станов данной группы, позволяют снизить расход электроэнергии за цикл прокатки на 20–25 %.

Ключевые слова: стан холодной прокатки труб, повышение энергоэффективности, снижение среднеквадратичного тока.

Введение

Главный электропривод клеток станов холодной прокатки бесшовных труб имеет неравномерный периодический график нагрузки рабочего органа. Это обстоятельство приводит к завышению установленной мощности силового оборудования. Электроприводы станов рассматриваемой группы реализованы на базе электроприводов постоянного тока, в которых значительная часть электрических потерь связана с переменными потерями в двигателе. Актуальность вопроса модернизации, учитывающая значительную производимость и мощность силового оборудования, диктуется тем обстоятельством, что большинство станов работают со старыми схемами управления. За счет прогресса элементов электропривода, способов и систем управления становится возможным оценить ресурсы энергосбережения в электроприводе для данных типов станов.

Обзор литературы. Постановка задачи повышения энергоэффективности

На станах рассматриваемой группы главные электроприводы клеток на сегодняшний день реализованы на базе электроприводов постоянного тока, построенных по принципу подчиненного регулирования. Среди смежных исследований, направленных на повышение энергоэффективности прокатных станов, можно выделить работу [1], основанную на снижении запаса выпрямленной

ЭДС тиристорного преобразователя за счет автоматической коррекции ЭДС двигателя при отклонениях напряжения сети и как следствие снижение потребления реактивной мощности. Объектом в данном случае выступал широкополосный стан горячей прокатки.

Исторически сложилось так, что вопросы экономии электроэнергии и снижения затрат на силовое оборудование решались в рамках разомкнутых систем электропривода установкой маховика. В [2] приводится методика типовых расчетов выбора маховика электроприводов прокатных станов разного типа, имеющих периодическую нагрузку. Вместе с тем на ряде предприятий имеются электроприводы станов холодной прокатки бесшовных труб, не имеющие маховиков, установленных в кинематической цепи электродвигателя.

В качестве еще одного варианта решения данного вопроса можно привести искусственное смягчение механической характеристики в электроприводах мощных реверсивных станов горячей прокатки, где применялась система генератор-двигатель, а для вращения генератора использовался асинхронный двигатель с фазным ротором (агрегаты Ильгнера). Таким образом обеспечивалось снижение импульсов нагрузки на питающую сеть в моменты нахождения металла в валках [3].

Прокатка на станах холодной прокатки труб носит периодический характер, обеспечивающий неравномерность момента нагрузки для электро-

привода в течение цикла. Технологический процесс, требующий подачи и поворота заготовки, предполагает отсутствие металла в валках, поэтому прокатный инструмент изготавливается таким образом, что в начальном (I) и конечном (II) положениях при прокатке образуется зев между валками (рис. 1) [4].

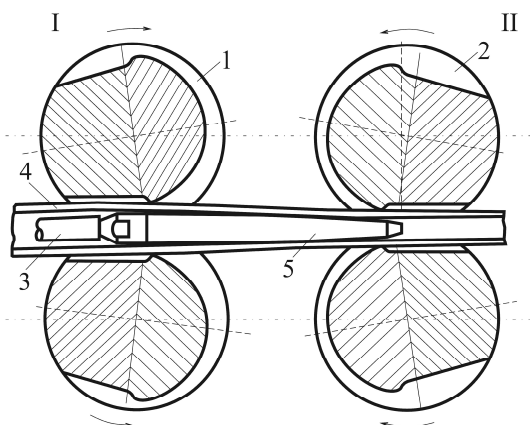


Рис. 1. Кинематическая схема стана холодной прокатки труб: 1 – калибр с ручьем переменного сечения; 2 – зев калибра; 3 – стержень; 4 – труба; 5 – коническая оправка

С точки зрения экономии электроэнергии, особенно с учетом достижений силовой электроники, вычислительной техники, систем и способов управления становится возможным оценить ресурсы энергосбережения в электроприводе для данных типов станов. Задачу повышения энергоэффективности электроприводов станов холодной прокатки труб предлагается решать снижением среднеквадратичного тока в якорной цепи [5], что в рамках существующего электропривода можно выполнить смягчением механической характеристики замкнутой системы электропривода; предварительным ослаблением поля двигателя, чтобы увеличить начальную скорость холостого хода перед прокаткой.

Смягчение механической характеристики замкнутой системы электропривода

Идея первого способа заключается в том, чтобы обеспечить возможность часть энергии, затрачиваемой на деформацию металла, взять от маховых масс привода, тем самым повысить равномерность тока якоря в течение цикла прокатки и снизить величину потерь [6].

На рис. 2 приведены упрощенные осциллограммы скорости двигателя и тока якоря. Энергия маховых масс привода может быть определена как

$$W_{\max} = J \frac{n_0^2 - n_d^2}{2},$$

где W_{\max} – энергия маховых масс; n_0 – скорость идеального холостого хода двигателя; n_d – величина динамического падения скорости; J – момент инерции привода [7]. Экономия электроэнергии

будет тем значительнее, чем большую часть энергии $W_{\text{пр}}$, необходимой для прокатки, удастся покрыть за счет энергии маховых масс привода. Упрощенные осциллограммы (рис. 2, (1)) тока и скорости соответствуют исходному случаю механической характеристики замкнутой системы электропривода. Смягчение этой характеристики позволяет приблизить среднеквадратичный ток якоря к среднему значению (рис. 2 (2)), тем самым снизить величину электрических потерь в якорной цепи.

Оценка снижения среднеквадратичного тока проводилась на математической модели «Электропривод – прокатная клет» стана холодной прокатки бесшовных труб ХПТ-450, которая включала в себя: главный электропривод прокатной клетки, выполненный по схеме подчиненного регулирования; механическую часть, учитывающую механические передачи в системе; блок приведения моментов прокатки к валу двигателя. Номинальные данные двигателя:

$$U_{\text{ном}} = 620 \text{ В}, I_{\text{ном}} = 2340 \text{ А}, M_{\text{ном}} = 310,2 \text{ кН} \cdot \text{м}, \\ \omega_{\text{ном}} = 4,2 \text{ рад/с}, J = 19875 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Смягчение механической характеристики производилось снижением коэффициента усиления пропорционального регулятора скорости $K_{\text{РС}}$. На рис. 3 приведена зависимость среднеквадратичного тока якоря от частоты среза контура регулирования скорости. Если выбрать частоту среза

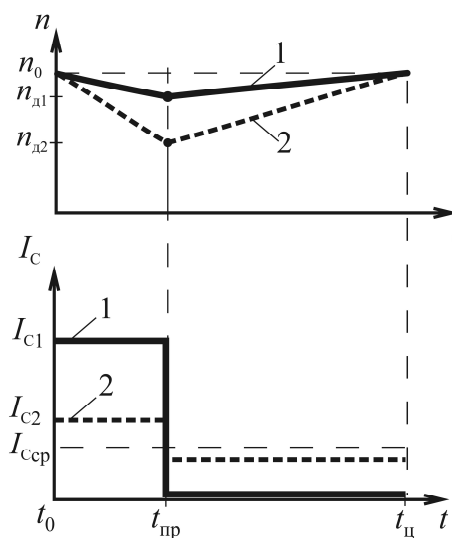


Рис. 2. Упрощенные осциллограммы скорости двигателя и тока якоря

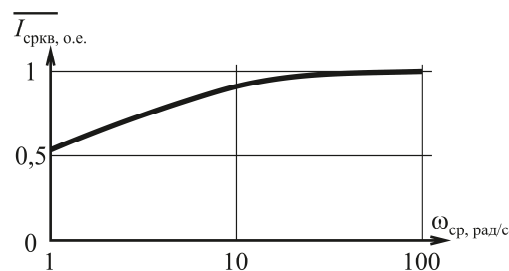


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного тока якоря от частоты среза контура регулирования скорости

10 рад/с, то величина среднеквадратичного тока снижается на 12 %. Заметное снижение среднеквадратичного тока (до 50 %) достигается только при малых частотах среза и значительных просадках скорости, которые в реальных системах допускать нельзя. В результате на единицу продукции из-за снижения производительности стана экономия электроэнергии получается незначительной. Данное обстоятельство применительно к стану ХПТ-450 связано с тем, что время прокатки $t_{пр}$ относительно большое, порядка 40 % от всего цикла $t_{ц}$. Маховые массы привода будут работать лучше, если время прокатки будет значительно меньше времени всего цикла [8].

Предварительное ослабление поля перед рабочим ходом

Идея второго способа экономии электроэнергии заключается в том, чтобы, используя большой перепад скорости Δn_d на этапе приложения момента нагрузки, не допустить существенного снижения средней скорости прокатки. Это возможно, если на участке цикла, когда металла в валках нет, поднять скорость электропривода заметно выше скорости идеального холостого хода двигателя при номинальном значении напряжения на якоре, т. е. ценой предварительного ослабления поля в начале рабочего хода [9].

Перед каждым циклом прокатки скорость привода искусственно увеличивается до n_{01} ослаблением поля двигателя, тем самым достигается увеличение среднего значения скорости за цикл. В работе на примере стана ХПТ-450 рассматривалось влияние степени ослабления потока двигателя Φ (начального превышения скорости n_{01}) на среднеквадратичный ток якоря и производительность стана. При этом предельное значение скорости должно устанавливаться прокатчиками, исходя из условий ограничения ударных нагрузок в механическом оборудовании при захвате металла. Так как процесс ослабления поля происходит в динамике, то важно также выбрать моменты подачи и прекращения импульса на ослабление поля. Задача разворачивалась в функции угла поворота валков, так как все переменные состояния удобнее и нагляднее привязывать именно к этому параметру. На рис. 5 приведена зависимость среднеквадратичного тока якоря от угла поворота валков $\alpha_{нач}$, соответствующего началу подачи импульса на ослабление поля. Наибольший эффект экономии электроэнергии для стана холодной прокатки труб ХПТ-450 получен при потоке двигателя $\Phi = 78\%$ от номинального значения, $\alpha_{нач} = 0,75$ рад и составил порядка 25 % [10].

Заключение

Рассмотрены способы повышения энергоэффективности электроприводов станков холодной прокатки труб. В результате решения задачи выяв-

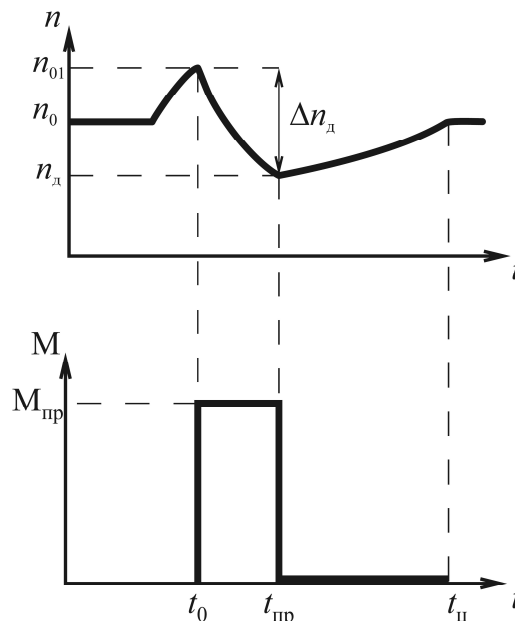


Рис. 4. Упрощенные осциллограммы тока якоря и момента прокатки

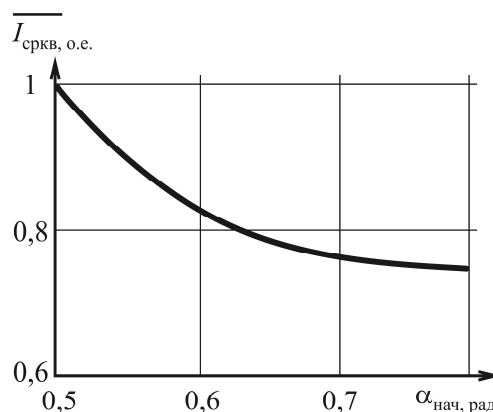


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичного тока якоря от угла поворота валков, соответствующего началу подачи импульса на ослабление поля

лены условия, позволяющие обосновать соотношения параметров динамических звеньев и добиться изменения графика работы электропривода, что обеспечивает наибольшее снижение потерь в электроприводе прокатной клетки стана холодной прокатки труб.

Литература

1. Храмин, В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис. ... д-ра техн. наук / В.Р. Храмин. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2013. – 360 с.
2. Бурьянов, В.Ф. Расчет мощности двигателей главных приводов прокатных станков / В.Ф. Бурьянов, Е.С. Рокотян, А.Е. Гуревич. – М.: Металлургиздат, 1962. – 360 с.

3. Дружинин, Н.Н. Электрооборудование прокатных станов / Н.Н. Дружинин. – М.: Металлургиздат, 1956. – 456 с.
4. Юдин, В.А. Теория механизмов и машин / В.А. Юдин, Л.В. Петрокас. – М.: Высш. шк., 1977. – 527 с.
5. Дралюк, Б.Н. Двухдиапазонное управление электродвигателем моталки стана рулонной прокатки листа / Б.Н. Дралюк, А.Е. Тикоцкий // Электричество. – 1969. – № 5. – С. 41–45.
6. Морозов, Д.П. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки / Д.П. Морозов // Вестник электропромышленности. – 1944. – № 3. – С. 16–19.
7. Остроухов, В.В. Электропривод стана холодной прокатки труб: дис. канд. техн. наук / В.В. Остроухов. – Челябинск, 2012. – 153 с.
8. 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.
9. 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., г. Уфа. – Уфа, 2014. – С. 58–63.
10. 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. Научный центр «Аэтерна», г. Уфа. – Уфа, 2014. – С. 38–45.

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

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

Сычев Дмитрий Александрович, ассистент, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Журавлев Артем Михайлович, старший преподаватель, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 9191236713@mail.ru.

Савостеенко Никита Вадимович, студент, 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 декабря 2015 г.

DOI: 10.14529/power160107

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE ELECTRIC DRIVE OF COLD ROLLING-MILL

**K.M. Vinogradov¹, E.V. Belousov², D.A. Sychev², A.M. Zhuravlev²,
N.V. Savosteenko², E.S. Khayatov², 9191236713@mail.ru**

¹ South Ural State University, Ust-Katav Branch, Ust-Katav, Chelyabinsk Region, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Different ways to improve energy efficiency of electric drives of cold reducing mill are considered. Studies based on mathematical modelling result in quantitative evaluation of the energy saving. With the example of the KhPT-450 cold reducing mill, the dependence of the root-mean-square current of the motor armature of the main stand drive on the cutoff frequency of the speed loop has been obtained. The paper considers possible energy savings by means of preliminary motor field reduction before the rolling duty cycle. It defines points of field-reduction pulse supply and termination that are optimal for power saving. The paper specifies conditions for substantiation of correlated parameters of the dynamic units and changing operation schedule of

the electric drive, thus, providing the greatest reduction of losses in the main drive of the cold reducing mill. These measures under consideration are aimed to improve energy efficiency of electric drives of these mills and reduce power consumption for a rolling cycle by 20–25 %.

Keywords: cold reducing mill, energy efficiency improvement, decrease of root-mean-square current.

References

1. Hramshin V.R. *Razrabotka ehlektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoj gruppy stana goryachej prokatki pri rasshirenii sortamenta polos. Dokt. dis.* [Development of Electrical Systems, Continuous Hot Rolling Mill Groups in Expanding the Assortment of Bands. Doct. diss.]. Magnitogorsk, 2013. 360 p.
2. Bur'yanov V.F., Rokotyan E.S., Gurevich A.E. *Raschet moshchnosti dvigateley glavnykh privodov prokatnykh stanov* [Calculation of Engine Power the Main Drives of Rolling Mills]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. 360 p.
3. Druzhinin N.N. *Elektrooborudovanie prokatnykh stanov* [Electric Equipment of Rolling Mill]. Metallurgizdat Publ., 1956. 456 p.
4. Yudin V.A., Petrokas L.V. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1977. 527 p.
5. Dralyuk B.N., Tikockij A.E. [Double-range Control of the Electric Motor Winder Rolling Mill Roll Sheet]. *Electrical Technology Russia*, no. 5, 1969, pp. 41–45. (in Russ.).
6. Morozov D.P. [On the Theory of Electromechanical Processes of Cold Rolling Mills]. *Bulletin of Industry*, no. 3, 1944, pp. 16–19.
7. Ostrouhov V.V. *Elektroprivod stana holodnoj prokatki trub. Dokt. diss.* [Electric Drive of Tubes Cold Rolling Mill. Doct. diss.]. Chelyabinsk, 2012, 153 p.
8. 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.).
9. 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.).
10. 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.).

Received 12 December 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Способы повышения энергоэффективности электропривода стана холодной прокатки труб / К.М. Виноградов, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 42–46. DOI: 10.14529/power160107

FOR CITATION

Vinogradov K.M., Belousov E.V., Sychev D.A., Zhuravlev A.M., Savosteenko N.V., Khayatov E.S. Ways to Improve the Efficiency of the Electric Drive of Cold Rolling-Mill. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 42–46. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160107
