

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-83::621.313.3

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ*

*Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов
г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет*

ELECTRIC DRIVES WITH SYNCHRONOUS FIELD REGULATED RELUCTANCE MACHINE FOR COLD ROLLING MILL

*Y.S. Usynin, S.P. Lokhov, M.A. Grigoryev, A.N. Shishkov, E.V. Belousov
Chelyabinsk, South Ural State University*

Предлагается многокритериальная оптимизация электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения стана холодной прокатки труб, которая проводится методом последовательной частной оптимизации.

Ключевые слова: станы холодной прокатки труб, последовательная оптимизация, электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Multicriteria optimization for the electric drive with synchronous field regulated reluctance machine of cold rolling mill, which is decided with sequential optimization method, is proposed in the article.

Keywords: cold rolling mills, sequential optimization, electric drive with synchronous field regulated reluctance machine.

Введение. Механизмы металлургического производства, как правило, работают в весьма напряжённом режиме, с большими перегрузками по моменту, с повышенными вибрациями и агрессивной окружающей средой. Эти обстоятельства накладывают очень жёсткие требования и к электроприводам. Здесь серьёзного внимания заслуживают электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ). Благодаря большим значениям отношения электромагнитного момента к моменту инерции ротора, более высокой, чем у серийных электрических машин механической и радиальной жёсткостью ротора, электропривод с СРМНВ является серьёзным конкурентом лучшим сегодняшним образцам регулируемых электроприводов переменного тока.

Особо жёсткие требования по быстродействию и точности движения предъявляются к электроприводам пилигримовой группы прокатных станов [1]. Из комплекса механизмов, взаимодействующих в процессе холодной прокатки трубы:

главного привода клетки, электропривода подачи трубы, механизмов поворота трубы и оправки, — следует выделить электропривод подачи.

Здесь задача увеличения быстродействия в электроприводе оказывается очень непростой из-за необходимости учёта целого ряда разных по своей физической природе и математическому описанию факторов (номинальный момент и скорость двигателя, его момент инерции, передаточное число редуктора, вид кинематической связи между электродвигателем и рабочим механизмом, структура системы управления, параметры настройки регуляторов и др.). В данном случае весьма продуктивным следует признать подход к решению задачи, получивший в научно-технической литературе название метода последовательной частной оптимизации [2], который при удачном применении позволяет разделить переменные и понизить порядок решаемой задачи. Кстати, он весьма удачно применялся в процессе разработки следящих электроприводов с предельным быстродействием [3].

* Работа проводится в рамках реализации гранта по договору с Министерством образования и науки РФ (договор № 16.120.11.6780-МК от 01 февраля 2012).

Структура управления. Современные позиционные электроприводы вспомогательных механизмов прокатных станов чаще всего выполнены как замкнутые системы подчинённого регулирования, в которых внутренним контуром является контур косвенного регулирования момента, средним – контур регулирования скорости с регулятором скорости (РС) и внешним – контур регулирования положения с регулятором положения (РП). Уровни ограничения статических характеристик регуляторов положения РП и РС задают при настройке электропривода максимальные значения скоростей рабочей машины (РМ) и момента (тока) электродвигателя [4].

В качестве электропривода механизма подачи предлагается электропривод с СРМНВ [5]. В схеме управления с независимым возбуждением статорные обмотки питаются от шести независимых источников тока ($UZ1, \dots, UZ6$) (рис. 1). Задание тока якорных обмоток подаётся с выходов регуляторов скорости AR и инвертора $И1$ через узел формирования фазных токов (УФФТ). УФФТ по сигналам датчика положения ротора BQ формирует задания на токи статора. Задание на ток возбуждения подаётся с выходов потенциометра RP и инвертора $И2$. Скорость поддерживается регулятором скорости AR . Допустимое значение электромагнитного момента устанавливается блоком ограничения $A1$.

В позиционном электроприводе, когда нужно минимизировать время перемещения рабочего механизма, целесообразно воспользоваться передаточной функцией отработки этого перемещения. Типовые осциллограммы тока якоря двигателя постоянного тока (или соответствующая ей осциллограмма тока статора синхронного двигателя в схеме векторного регулирования момента) и угловой скорости двигателя содержат ряд участков (рис. 2, а), на каждом из которых можно выделить

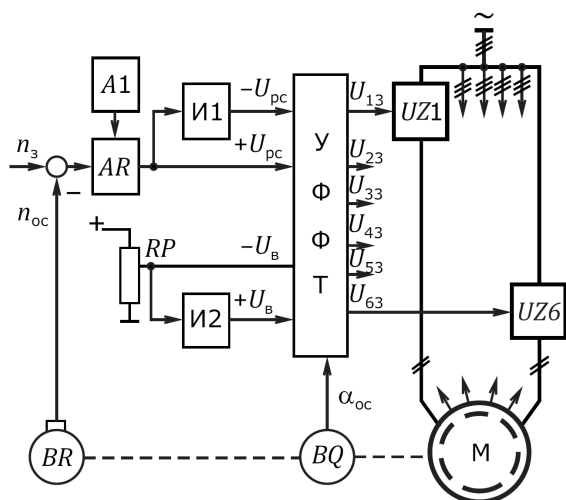


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения

факторы, оказывающие наибольшее влияние на длительность этого участка.

На участке 0...1 регуляторы положения и скорости насыщены избыточным сигналом рассогласования, поэтому происходит интенсивное нарастание тока якоря до заданного максимального значения. Время нарастания тока якоря определяется быстродействием контура регулирования тока, которое можно изменять, воздействуя на параметры регулятора тока. На участке 1...2 обеспечивается поддержание постоянства тока якоря двигателя, что достигается выбором ПИ-структуры регулятора тока. На отрезке времени 2...3 при отсутствии момента сопротивления ток якоря падает до нуля, так как двигатель разогнался до полной скорости. Темп спадания тока якоря определяется быстродействием контура регулирования скорости, который изменяется настройкой регулятора скорости. Отрезок 3...4 соответствует работе электропривода с постоянной максимальной скоростью (трапецидальная диаграмма скорости [4]). Отрезок времени 4...6 формируется изменением величины задания на входе регулятора скорости, поэтому время нарастания тока на отрезке времени 4...5 определяется быстродействием контура регулирования скорости. Наконец, спадание тока якоря до нуля в конце переходного процесса (участок 6...7) определяется быстродействием контура регулирования положения.

При таком расчленении осциллограмм переходных процессов отработки перемещения на отдельные отрезки можно решение всей сложной задачи заменить решением нескольких задач меньших объёма и размерности, сокращая, в первую очередь, продолжительность наиболее протяжённых участков.

Здесь следует указать на участки 1...2 (разгон) и 5...6 (торможение электропривода). Их протяжённость следует сократить в первую очередь.

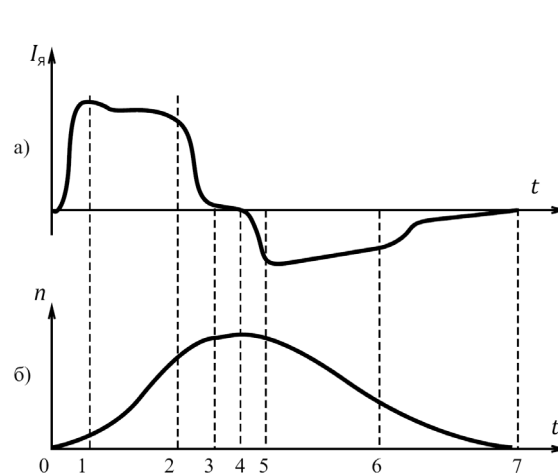


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов: а – тока якоря (статора); б – скорости электропривода

Известно [4], что время разгона и торможения электропривода можно оценить величиной механической постоянной времени

$$T_D = \frac{J_{\Sigma} n_H}{M_H} = \frac{(J_{PM} + J_{Я} i^2) n_{PM}}{M_{PM}},$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции; J_{PM} – момент инерции рабочей машины; $J_{Я}$ – момент инерции ротора; i – передаточное число; n_{PM} – скорость рабочей машины; M_{PM} – момент рабочей машины.

Постоянная T_D равна времени разгона электропривода от нуля до номинальной скорости n_H под действием постоянного динамического момента, равного номинальному значению M_H . Продолжительность рассмотренных участков в большей степени зависит от параметров силового механо- и электрооборудования и почти не зависит от настройки системы управления.

Для механизмов подач момент инерции электродвигателя, приведенный к валу РМ $J_{Я} i^2$, больше момента инерции J_{PM} РМ. Тогда можно принять $J_{\Sigma} \approx J_{Я} i^2$, а выражение для постоянной времени

$$T_D \approx \frac{J_{Я} i^2 n_{PM}}{M_{PM}} = \frac{J_{Я} n_H}{M_H},$$

где $n_H = n_{PM} i$ – номинальная скорость; $M_H = M_{PM} / i$ – номинальный момент двигателя. В рассматриваемом случае снижение T_D возможно только за счет выбора или конструирования двигателя с уменьшенными величинами $J_{Я}$ и n_H и увеличенным M_H . Уменьшение $J_{Я}$ достигается выполнением двигателя с удлиненным якорем.

Ротор СРМНВ выполняется из цельной (массивной) стальной заготовки, поэтому имеет несопоставимо большую величину радиальной механической жесткости ротора по сравнению с традиционными электрическими двигателями постоянного и переменного тока. Это позволяет резко (до 3–5 раз) увеличить отношение длины ротора к его диаметру, тем самым понизить момент инерции $J_{Я}$ и уменьшить T_D .

При обработке малых перемещений участки 2...5 могут отсутствовать (случай треугольной диаграммы скорости электрической машины). В этом случае достижение двигателем максимальной скорости становится неактуальным, что позволяет выполнить двигатель на пониженную частоту напряжения на статоре, сохранив стандартную величину напряжения на статоре и понизив тем самым ток и, следовательно, габариты регулируемого источника питания.

Время нарастания тока на участке 0...1 определяется полосой равномерного пропускания частот контура регулирования фазного тока, которая в современных тиристорных электроприво-

дах переменного тока доходит до 250...300 рад/с. Между тем на реальной осциллограмме переходного процесса это время значительно больше и превышает 0,1 с, что объясняется совокупным влиянием нескольких факторов. Во-первых, существующие реверсивные вентильные преобразователи выполняются с раздельным управлением тиристорными группами, поэтому при переключении этих групп вводится преднамеренная бестоковая пауза, обычно равная (3...5) мс. Наличие этой паузы ухудшает динамические показатели контура регулирования фазного тока. Во-вторых, наличие люфтов в механической передаче от двигателя к траверсе, которая сталкивает трубу с оправки, вызывает при крутых фронтах изменение тока, большие ударные нагрузки, что вызывает преждевременный износ механического оборудования. Чаще всего эти ударные нагрузки ослабляют, снижая крутизну переднего фронта кривой тока якоря (статора). Наконец, в-третьих, в конкретном электроприводе подачи крутизна переднего фронта дополнительно снижается из-за наличия между узлом формирования фазных токов и контурами регулирования этих токов аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые преобразуют аналоговый сигнал существующей схемы в цифру.

Названные неблагоприятные факторы, снижающие быстродействие электрического привода, можно ослабить следующим образом. Бестоковая пауза при переключении групп устраняется заменой реверсивного тиристорного преобразователя на транзисторный, который работает в режиме ШИМ с частотой квантования 2,5–16 кГц. Второе обстоятельство, учитывая, что траверса сталкивателя трубы с оправки приводится через два винтовых редуктора от двух электродвигателей, питающихся от двух индивидуальных преобразователей, целесообразно (как это делается в высокоточных многодвигательных следящих электроприводах [6]) создать предварительный натяг кинематической цепи с помощью электропривода, тем самым снизить ударные нагрузки из-за люфтов и, кроме того, резко улучшить условия устойчивости настраиваемой замкнутой системы регулирования подачи трубы. Наконец, третья причина решается естественным образом, когда вся система управления реализована в цифровом виде с использованием одного программируемого контроллера.

В идеальных линейных системах регулирования положения рабочего органа наиболее растянутым оказывается при работе регуляторов на линейных участках отрезок осциллограммы 6–7 (см. рис. 3). Это вызвано тем, что по условиям устойчивости линейных систем контур регулирования положения содержит больше инерционностей, чем контур регулирования скорости и тем более контур регулирования тока. Однако в конкретном случае эти опасения не подтверждаются, так как наличие относительно большого момента статической нагрузки (до 30 % от

номинального момента двигателя) «отсекает» на осциллограмме заключительный отрезок кривой спада тока на участке 6–7 и тем самым снижает его продолжительность.

Комплекс всех названных мероприятий позволил заметно снизить продолжительность обработки заданного перемещения в электроприводе подачи трубы стана 450.

Литература

1. Холодная прокатка труб / З.А. Кофф, П.М. Соловейчик, В.А. Алешин, М.И. Гриншпун. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 431 с.

2. Уайлд, Д. Оптимальное проектирование / Д. Уайлд; пер. с англ. В.С. Данилина и др.; под ред. В.Г. Арчегова. – М.: Мир, 1981. – 272 с.

3. Каган, В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений / В.Г. Каган. – М.: Энергия, 1975. – 240 с.

4. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие / Ю.С. Усынин. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 326 с.

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

6. Терехов, В.М. О точности силовых следящих электроприводов постоянного тока / В.М. Терехов // *Электротехника*. – 1974. – № 10.

Поступила в редакцию 15.02.2012 г.

Усынин Юрий Семёнович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизации промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

Usinin Yuriy Semenovich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Telephone: 8 (351) 267-93-21.

Лохов Сергей Прокопьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизации промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Lokhov Sergey Prokopievich is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University.

Григорьев Максим Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизации промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Grigoryev Maxim Anatolievich is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University.

Шишков Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизации промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Shishkov Alexander Nikolaevich is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk.

Белюсов Евгений Викторович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизации промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Belousov Evgeny is a postgraduate student of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk.