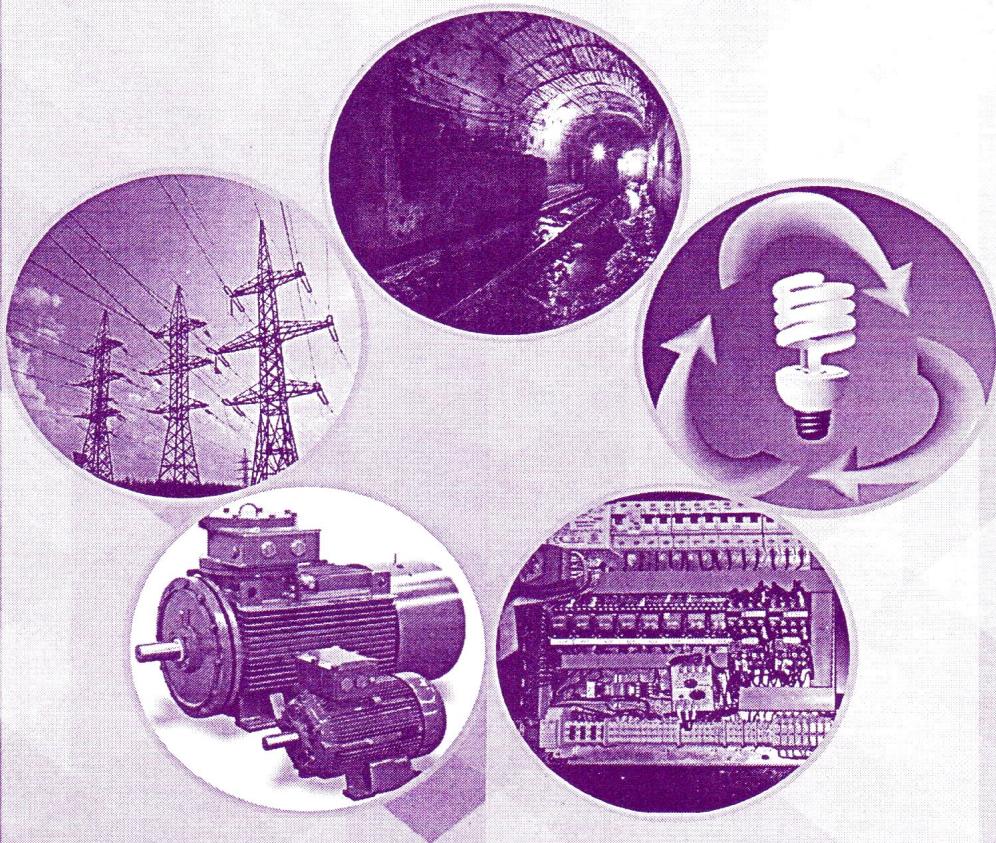


ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА АВТОМАТИКА



95

Дніпропетровськ
2015

ISSN 0201-7814

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРО- МЕХАНІКА та АВТОМАТИКА

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ
ЗБІРНИК**

Заснований у 1965 р.

95

**Дніпропетровськ
2015**

Засновник – Національний гірничий університет

*Рекомендовано до видання вченовою радою
Державного вищого навчального закладу
"Національний гірничий університет"*

(Протокол № 6 від 28 грудня 2015 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

– Півняк Г.Г., академік НАН України

Заступник головного редактора

– Шкребець Ф.П., д-р техн. наук

Відповідальний секретар

– Чипленков Д.В., канд. техн. наук

Члени: Бешта О.С., д-р техн. наук; Блохін С.Є., д-р техн. наук; Блюсс Б.О., д-р техн. наук; Вареник Є.О., канд. техн. наук; Випанасенко С.І., д-р техн. наук; Заїка В.Т., д-р техн. наук; Іванов О.Б., канд. техн. наук; Кириченко В.І., д-р техн. наук; Костін М.О., д-р техн. наук; Кузнєцов Г.В., д-р техн. наук; Маліновський А.А., д-р техн. наук; Разумний Ю.Т., д-р техн. наук; Самуся В.І., д-р техн. наук; Сіноліцький А.П., д-р техн. наук; Сивокобиленко В.Ф., д-р техн. наук; Слєсарєв В.В., д-р техн. наук; Ткачов В.В., д-р техн. наук; Франчук В.П., д-р техн. наук; Чермалих В.Ф., д-р техн. наук

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (постанова президії ВАК України від 10.02.2010, № 1-05/1), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

Адреса редакційної колегії:

Україна, 49005, м. Дніпропетровськ, просп. Д.Яворницького, 19.

Державний ВНЗ "Національний гірничий університет".

Тел. (056) 370-13-92, (056) 373-07-70, факс (056) 370-13-92

E-mail: ShcrabetsF@ntmu.org.ua. gea@ntmu.org.ua

Сайт: <http://gea.ntmu.org.ua>

Збірник зареєстрований у Міністерстві інформації України.
Реєстраційний номер КВ № 7498 від 03.07.2003.

© НГУ, 2015

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621-926

В.А. Бородай, канд. техн. наук, Р.А. Боровик, Е.В. Котлярова
(Україна, Дніпропетровськ, Національний горний університет)

ДЕМПФИРОВАННЯ УДАРНИХ НАГРУЗОК ГОРНО-МЕТАЛЛУРГІЧСКИХ МЕХАНИЗМОВ СРЕДСТВАМИ СИНХРОННОГО ПРИВОДА

Анотація. Обґрунтовано вибір факторів впливу на параметри системи синхронного приводу і розроблено метод компенсації ударних навантажень електричними та механічними засобами. Запропоновано функція мети і підхід до вибору інтервалів обмеження задачі оптимізації при визначенні параметрів електромеханічної системи. Отримано підтвердження принципової можливості компенсації ударних навантажень на прикладі конкретного приводу.

Ключові слова: потужні гірничо-металургійні механізми, ударне навантаження, синхронний електропривод, метод компенсації ударних навантажень, обґрунтування та оптимізація параметрів.

Аннотация. Обоснован выбор факторов влияния на параметры системы синхронного привода и разработан метод компенсации ударных нагрузок электрическими и механическими средствами. Предложена функция цели и подход к выбору интервалов ограничений задачи оптимизации при определении параметров электромеханической системы. Получено подтверждение принципиальной возможности демпфирования ударных нагрузок на примере конкретного привода.

Ключевые слова: мощные горно-металлургические механизмы, ударная нагрузка, синхронный электропривод, метод демпфирования ударных нагрузок, обоснование и оптимизация параметров.

Abstract. The objective of the study is the justification of choice of influence factors for the system parameters of synchronous electric drive and development of the method for impact load compensation by electrical and mechanical means. The objective function and the approach to the choice of interval constraints for the optimization problem in the parameters of electromechanical system determining were proposed. The evidences for possibility in principle of impact load compensation for the specific drive were obtained.

Keywords: high-capacity mining and smelting mechanisms, impact load, synchronous electric drive, method for impact load compensation, parameters justification and optimization.

Известно, что в горно-металлургической промышленности используются уникальные механизмы, мощности которых могут колебаться от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт. Среди них следует выделить щековые, конусные и валковые дробилки крупного дробления и оборудование механизмов прокатных валков, где особенно проявляются ударные нагрузки.

Традиционно перечисленное оборудование комплектовалось асинхронным приводом с большим скольжением и маховиковым накопителем кинетической энергии. Несмотря на достаточно эффективную технологическую работу асинхронной системы электропривода, его энергетические характеристики сегодня не отвечают современным требованиям. Принимая во внимание постоянный рост стоимости электроэнергии и то, что доля эксплуатационных расходов данного оборудования достигает 60% от общего объема потребления, вопрос энергосбережения, безусловно, является весьма актуальным.

Альтернативой асинхронному приводу механизмов с ударной нагрузкой может стать синхронный привод. Такие преимущества, как высокая надежность, из-за большого воздушного зазора, возможность компенсации реактивной мощности, высокий КПД, значительная жесткость механической характеристики и, наконец, применение тихоходных двигателей, допускающих исключить редукторы из состава кинематических схем, делают этот тип двигателей вне конкуренции. Однако помимо преимуществ ему присущи и недостатки. При технологически правильной эксплуатации синхронного привода прокатных валков стана цельнотянутых труб в нем возникают аварийные ситуации, вызванные механическим износом изоляции лобовых частей индукторной обмотки в зоне выхода активных проводников из магнито-

проводи. Авторами работы [1] установлено, что причиной аварийных ситуаций являются значительные динамические броски тока индуктора, которые сопровождаются механическим дребезгом лобовых частей обмотки. Обычно действие таких динамических ударов компенсируют механическими или электрическими способами. К ним следует отнести наличие маховикового механизма, регулирование жесткости упругих муфт и использование автоматической системы возбуждения с возможностью форсировки напряжения.

Высокая жесткость механической характеристики синхронного двигателя не позволяет применять в качестве демпфера ударного приложения нагрузки маховиковых механизмов. Так, опыт, полученный в результате применения маховика в составе синхронного привода, показал его нецелесообразность ввиду неспособности отдавать накопленную энергию из-за низкого проседания скорости двигателя.

Еще один способ компенсации ударных нагрузок – введение в кинематическую схему упругих муфт. Следует отметить, что случай применения абсолютно жесткой связи выявил неработоспособность системы по причине значительного роста ее колебательности [1]. Таким образом, при исследованиях необходимо определить такой уровень жесткости упругих связей, который позволил бы при одновременном получении положительного эффекта демпфирования обеспечить удовлетворительную работоспособность привода.

Помимо механических подходов решения проблемы работы синхронного электропривода, не следует забывать о применении автоматической системы управления возбуждением. Однако в этом случае необходимо сформулировать закон регулирования или определить фиксированные параметры настройки системы. Как показано в публикации [1], в начальный момент приложения ударной нагрузки электродвигатель работает с ослабленным полем, что может стать причиной значительных бросков индукторного тока. Поэтому для его снижения, возможно, следует осуществлять заблаговременное форсирование напряжения возбуждения заранее известного уровня.

Из анализа возникновения аварий видно, что для реализации мероприятий компенсации ударных нагрузок может быть задействовано два метода. Это метод регулирования жесткости упругих элементов в пределах, не вызывающих значительных механических колебаний, и метод заблаговременной форсировки возбуждения заданного уровня. Для решения этой проблемы следует сформулировать оптимизационную задачу, которая позволит определить параметры системы при обозначенных условиях работы привода.

Путем математического моделирования определим параметры системы привода с двигателем СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 при наборе номинальной нагрузки из состояния холостого хода. Экспериментальным путем установлены пределы регулирования факторов оптимизации:

- кратность форсировки возбуждения 1...1,75 номинального, ограниченная возможностью возбудителя;
- пределы кратности жесткости муфты 1...4, лимитируемой максимумом колебательности системы;
- возможный интервал времени заблаговременного включения форсировки 0...3 секунды до начала нагрузления, определяемого пятью постоянными временем обмотки возбуждения. В качестве функции цели предложено использовать минимум среднеквадратического отклонения от установившегося значения тока статора при наборе номинальной нагрузки [2].

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(I_i - I_{\text{уст}})^2}{n-1}},$$

где $I_i, I_{\text{уст}}$ – мгновенное и установившееся значение тока индуктора, n – число дискрет. Решение задачи предлагается выполнить с помощью встроенной функции Minimize пакета MathCAD, где используют градиентный способ поиска оптимального решения.

Традиционно динамику пуска синхронного привода оценивают с учетом электромагнитных переходных процессов. При моделировании двигателя использованы уравнения Парка – Горева [3]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = U_d + \psi_q \omega_o - r_a i_d; & \frac{d\psi_q}{dt} = U_q - \psi_d \omega_o - r_a i_q; \\ \frac{d\psi_f}{dt} = U_f - r_f i_f; \\ \frac{d\psi_{kd}}{dt} = -r_{kd} i_{kd}; & \frac{d\psi_{kq}}{dt} = -r_{kq} i_{kq}; \\ \frac{d\omega_o}{dt} = \frac{M_o - \beta(\omega_o - \omega_m) - C_o \frac{(\phi_o - \phi_m)}{p}}{T_{Mo}}; & \frac{d\phi_o}{dt} = \omega_o; \quad \frac{d\theta}{dt} = 1 - \phi_o, \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\beta(\omega_o - \omega_m) + C_o \frac{(\phi_o - \phi_m)}{p} - M_m}{T_{Mm}}; \\ \frac{d\phi_m}{dt} = \omega_m \end{cases}$$

Мгновенные значения токов и момента определены с учетом сверхпереходных параметров синхронного двигателя:

$$\begin{aligned} x_d'' &= \frac{D}{x_f x_{kd} - x_{ad}^2}; & x_q'' &= \frac{x_q x_{kq} - x_{ad}^2}{x_{kq}}; & x_f'' &= \frac{D}{x_d x_{kd} - x_{ad}^2}; \\ x_{kd}'' &= \frac{D}{x_f x_d - x_{ad}^2}; & x_{dkd}'' &= \frac{D}{x_f x_{ad} - x_{ad}^2}; & x_{fkd}'' &= \frac{D}{x_d x_{ad} - x_{ad}^2}; \\ x_{fd}'' &= \frac{D}{x_{kd} x_{ad} - x_{ad}^2}; & x_{qkq}'' &= \frac{x_q x_{kq} - x_{ad}^2}{x_{ad}}, \end{aligned}$$

где $D = x_d x_f x_{kd} - x_{ad}^2 (x_d + x_f + x_{kd}) + 2x_{ad}^3$.

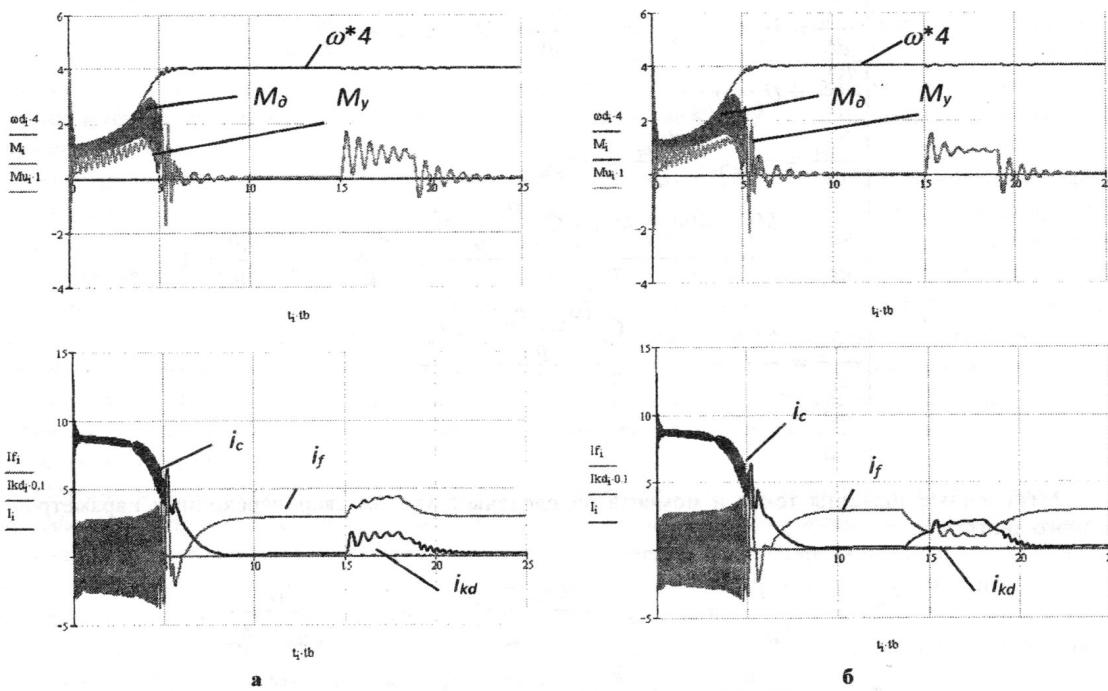
Решение приведенной системы дифференциальных уравнений выполняется с учетом выражений для определения токов и электромагнитного момента:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\psi_d}{x_d''} - \frac{\psi_f}{x_{fd}''} - \frac{\psi_{kd}}{x_{dkd}''}; & i_q &= \frac{\psi_q}{x_q''} - \frac{\psi_{kq}}{x_{qkq}''}; & i_f &= \frac{\psi_f}{x_f''} - \frac{\psi_d}{x_{fd}''} - \frac{\psi_{kd}}{x_{fkd}''}; \\ i_{kd} &= \frac{\psi_{kd}}{x_{kd}''} - \frac{\psi_f}{x_{fkd}''} - \frac{\psi_d}{x_{dkd}''}; & i_{kq} &= \frac{\psi_{kq}}{x_{kq}''} - \frac{\psi_q}{x_{qkq}''}; \\ M_o &= (\psi_d i_q - \psi_q i_d); & i_c &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \end{aligned}$$

где i_c – ток индуктора, о.е.

Результат моделирования показан на рисунке, где i_c , i_f , i_{kd} – токи индуктора, возбуждения и демпферной обмотки, о.е.; M_o , M_y – электромагнитный и упругий момент, о.е.; ω – угловая скорость вращения двигателя; о.е.

Размер показателя среднеквадратического отклонения $\sigma = 0,002707$, кратность форсировки и жесткости соответственно 0,178012 и 1,436994 при времени заблаговременного включения напряжения возбуждения 1,5 секунды. Колебательность системы особенно увеличилась для участка синхронизации. Однако в целом качество переходных процессов улучшилось. При ограничении нижнего предела кратности возбуждения на уровне 1 оптимизационная задача также имеет решение. К тому же в этом случае форсировка и время заблаговременного включения возбуждения становятся больше, нежели чем на рисунке, а качество переходных процессов хуже. Критерием принятия решения выбора нижнего предела форсировки больше или меньше 1 должен быть минимум, выделяемой в индукторной обмотке мощности, которая определяется площадью под кривой тока индуктора участка наброса нагрузки, а это как раз характерно для случая показанного на рисунке, б. Если сравнивать мощность потерь управления для классической системы возбуждения (рисунок, а) и оптимизированной (рисунок, б), то можно наблюдать, что площадь под кривой тока индуктора увеличилась незначительно. Этот факт подтверждает возможность сбережения теплового нагружения электрической машины на уровне, который приближенно равен паспортному.



Ілюстрація к розв'язанню оптимізаційної задачі з використанням стандартних (а) і оптимізованых (б) параметрів

Виконаний комплекс дослідженій дозволяє зробити наступні висновки:

- для синхронного привода без маховика компенсація ударних навантажень можлива при регулюванні жесткості упругих зв'язків і кратності форсировки возбудження;
- задачу оптимізації целесообразно розв'язувати з використанням градієнтного метода і функції цілі мінімуму середнеквадратичного відхилення мгновенного тока статора від його установившогося значення при наборі навантаження;
- обмеження факторів оптимізації визначається технічною можливістю возбудителя, до-пустимою амплітудою коливань системи і постійною часу обмотки возбудження;
- отримано принципальне підтвердження можливості компенсації ударних навантажень синхронного привода. Вперше на примері привода СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 установлено, що ісключити аварійні ситуації на приводах такого типу можливо зниженням кратності напруження возбудження до рівня 0,18, при цьому час початку зниження становить 1,5 сек., а кратність жесткості упругої муфти слід відтримувати рівною 1,44;
- параметри оптимізації забезпечують значительне зниження динаміческих бросков токов обмоток двигуна з одночасним улучшенням якості переходних процесів;
- параметри настройки системи створюють умови для незначального підвищення потерь управління, при яких зберігаються допустимі теплові режими синхронного двигуна.

Список літератури

1. Розробка рекомендацій по експлуатації синхронного двигуна головного приводу автомат-стана прокатки труб ОOO “ИНТЕРПАЙП НІКО ТЮБ”: Отчет о НИР (заключ.) / Государственный ВУЗ «НГУ»; Научно-исследовательская работа выполнена согласно договору №1120/030383 от 04.12.2012 г. - Днепропетровск, 2013. — 34 с. ил.
2. Бородай В.А. Метод та критерій оптимізації пускових характеристик синхронних двигунів з важкими умовами пуску / В.А. Бородай, М.О. Несторенко. – Дніпр-ськ: Гірнича електромеханіка та автоматика, Наук. – техн. зб. – Вип. 85. – 2010 – С. 180 – 183.
3. Павлюк Д.П. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей / Д.П. Павлюк, С. Биднарік – Москва: Енергія, 1971. – 271 с.
4. Півняк, Г.Г. Електромеханічні системи енергонапруженіх барабанних млинів / Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко: Монографія. Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.
5. Півняк, Г.Г. Повышение надежности и экономичности мощных синхронных приводов с тяжелым пуском. [Текст.] / Г.Г. Півняк, В.В. Кириченко, В.А. Бородай // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2007 – С. 553–555.

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, проф. Івановим О.Б.