

ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621-926

*В.А. Бородай, канд. техн. наук, Р.А. Боровик, Е.В. Котлярова
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)*

ДЕМПФИРОВАНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ СРЕДСТВАМИ СИНХРОННОГО ПРИВОДА

***Анотація.** Обґрунтовано вибір факторів впливу на параметри системи синхронного приводу і розроблено метод компенсації ударних навантажень електричними та механічними засобами. Запропонована 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 електродпривод, 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 ограниченной 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 электродпривод, 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-

провода. 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 набросе 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 нагружения, определяемого пятью постоянными времени обмотки возбуждения. В качестве функции цели предложено использовать минимум среднеквадратического отклонения от установившегося значения тока статора при набросе номинальной нагрузки [2].

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

где $I_i, I_{уст}$ – 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]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_d}{dt} = U_d + \psi_q \omega_\delta - r_a i_d; \quad \frac{d\psi_q}{dt} = U_q - \psi_d \omega_\delta - r_a i_q; \\ \frac{d\psi_f}{dt} = U_f - r_f i_f; \\ \frac{d\psi_{kd}}{dt} = -r_{kd} i_{kd}; \quad \frac{d\psi_{kq}}{dt} = -r_{kq} i_{kq}; \\ \frac{d\omega_\delta}{dt} = \frac{M_\delta - \beta(\omega_\delta - \omega_m) - C_o \frac{(\phi_\delta - \phi_m)}{p}}{T_{M_\delta}}; \quad \frac{d\phi_\delta}{dt} = \omega_\delta; \quad \frac{d\theta}{dt} = 1 - \phi_\delta, \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\beta(\omega_\delta - \omega_m) + C_o \frac{(\phi_\delta - \phi_m)}{p} - M_m}{T_{M_m}}; \\ \frac{d\phi_m}{dt} = \omega_m \end{array} \right.$$

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

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

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:

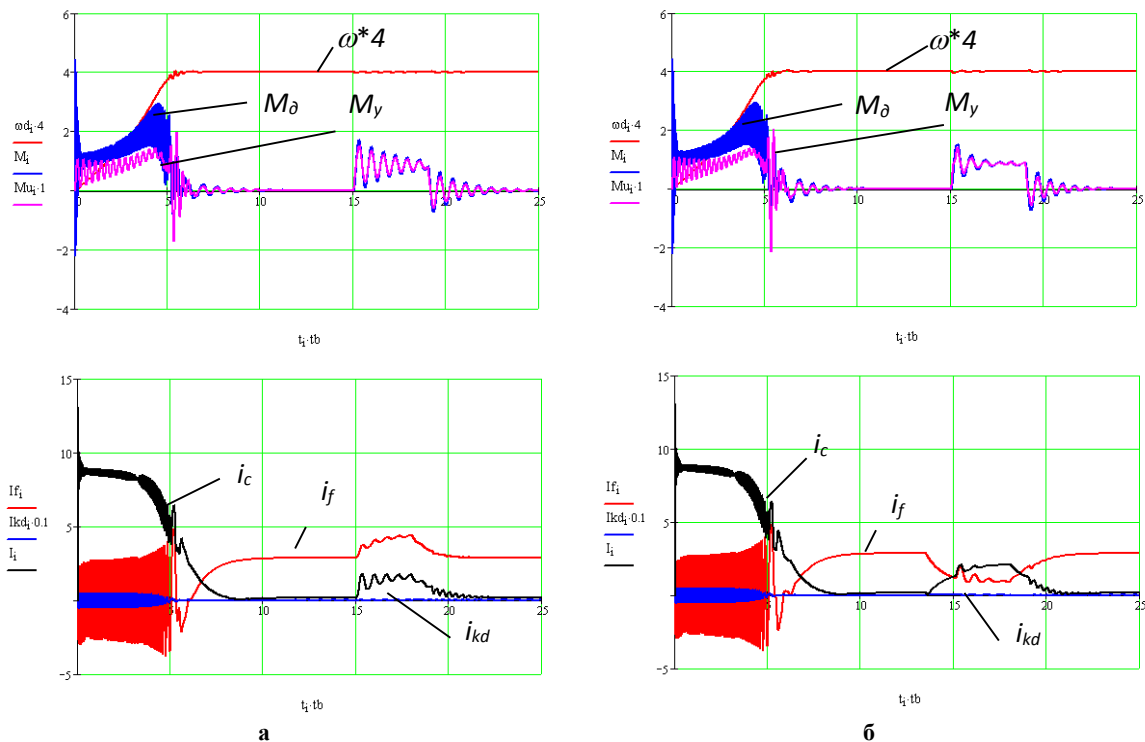
$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\psi_d}{x_d''} - \frac{\psi_f}{x_{fd}''} - \frac{\psi_{kd}}{x_{dkd}''}; \quad i_q = \frac{\psi_q}{x_q''} - \frac{\psi_{kq}}{x_{qkq}''}; \quad i_f = \frac{\psi_f}{x_f''} - \frac{\psi_d}{x_{fd}''} - \frac{\psi_{kd}}{x_{fd}''}; \\ i_{kd} &= \frac{\psi_{kd}}{x_{kd}''} - \frac{\psi_f}{x_{fd}''} - \frac{\psi_d}{x_{dkd}''}; \quad i_{kq} = \frac{\psi_{kq}}{x_{kq}''} - \frac{\psi_q}{x_{qkq}''}; \end{aligned}$$

$$M_\delta = (\psi_d i_q - \psi_q i_d); \quad i_c = \sqrt{i_d^2 + i_q^2},$$

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_δ, M_u – 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 решению оптимизационной задачи с использованием стандартных (а) и оптимизированных (б) параметров

Выполненный комплекс исследований позволяет сделать следующие выводы:

- для синхронного привода без маховика компенсация ударных нагрузок возможна при регулировании жесткости упругих связей и кратности форсировки возбуждения;
- задачу оптимизации целесообразно решать с использованием градиентного метода и функции цели минимума среднеквадратического отклонение мгновенного тока статора от его установившегося значения при набросе нагрузки;
- ограничение факторов оптимизации определяется технической возможностью возбудителя, допустимой амплитудой колебаний системы и постоянной времени обмотки возбуждения;
- получено принципиальное подтверждение возможности компенсации ударных нагрузок средствами синхронного привода. Впервые на примере привода СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4 установлено, что исключить аварийные ситуации на приводах такого типа возможно снижением кратности напряжения возбуждения до уровня 0,18, при этом время начала его уменьшения составляет 1,5 сек., а кратность жесткости упругой муфты следует выдерживать равной 1,44;
- параметры оптимизации обеспечивают значительное снижение динамических бросков токов обмоток двигателя с одновременным улучшением качества переходных процессов;
- параметры настройки системы создают условия для незначительного роста мощности потерь управления, при которых сохраняются допустимые тепловые режимы синхронного двигателя.

Список литературы

1. Разработка рекомендаций по эксплуатации синхронного двигателя главного привода автомат-стана прокатки труб ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЪЮБ»: 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: Гірничя 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. Биднарник – Москва: Энергия, 1971. – 271 с.
4. Півняк, Г.Г. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів / Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко: Монографія. Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 166 с.
5. Пивняк, Г.Г. Повышение надежности и экономичности мощных синхронных приводов с тяжелым пуском. [Текст.] / Г.Г. Пивняк, 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.