

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ШАХТНЫХ ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ****Федоров М. М., Грудачев А. Я., Ткаченко А. А.**

Рассмотрены методы расчета и оценки токовых перегрузок в асинхронных двигателях электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей в рабочем цикле при переменных моментах сопротивления и инерции. Предложенная методика позволяет дать оценку характеристикам динамических режимов электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей путем математического моделирования в системе MatLab Simulink. Предложенная методика анализа динамики электромеханических процессов электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей позволяет судить о величине и длительности токовых перегрузок, имеющих место в рабочем цикле. Расчет выполнен для вагоноопрокидывателей шахт производственного объединения «Донецкуголь», результаты подтверждены экспериментально.

Розглянуті методи розрахунку та оцінки струмових перевантажень в асинхронних двигунах електроприводів шахтних вагоноперекидачів в робочому циклі при змінних моментах опору та інерції. Запропонована методика дозволяє дати оцінку характеристикам динамічних режимів електроприводів шахтних вагоноперекидачів шляхом математичного моделювання в системі MatLab Simulink. Запропонована методика аналізу динаміки електромеханічних процесів електроприводів шахтних вагоноперекидачів дозволяє судити про величину і тривалості струмових перевантажень, що мають місце в робочому циклі. Розрахунок виконаний для вагоноперекидачів шахт виробничого об'єднання «Донецьквугілля», результати підтверджені експериментально.

The work is devoted to methods of calculation and assessment of current overload in induction motors electric mine dumpers in the working cycle with variable moments of inertia and resistance. A technique which allows to evaluate the performance of dynamic processes of electric mine dumpers by mathematical modeling in MatLab Simulink. The proposed method for analyzing the dynamics of electromechanical processes of electric mine car dumpers to judge the magnitude and duration of the current overload taking place in the cycle. The calculation is made for mine dumpers of production association «Donetskugol», the results are confirmed experimentally.

Федоров М. М.

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДонНТУ

Грудачев А. Я.

канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой ДонНТУ

Ткаченко А. А.

канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ЭСА ДГМА

Tkachenko.aat@gmail.com

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

УДК 621.313-57

Федоров М. М., Грудачев А. Я., Ткаченко А. А.

### ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ШАХТНЫХ ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЕЙ

Значительная часть грузопотока в шахтах осуществляется рельсовым транспортом, а наиболее распространенным средством разгрузки вагонеток являются круговые опрокидыватели с электрическим приводом. Электроприводы вагонеепрокидывателей работают в повторно-кратковременных режимах с высокой частотой включения (30–80 в час) и большими моментами инерции.

Тяжелые условия работы и некорректный выбор двигателей на этапе проектирования электропривода становятся причиной высокой аварийности. Средний срок службы электродвигателей недопустимо мал и составляет порядка 0,5–2 лет. Основной причиной выхода двигателей из строя являются токовые перегрузки, приводящие к перегреву и выходу из строя изоляции обмоток статора.

Задача снижения аварийности, продления срока службы электродвигателей и снижения эксплуатационных затрат может быть решена путем подробного анализа электромеханических и тепловых процессов, протекающих при эксплуатации электроприводов шахтных вагонеепрокидывателей.

Особенностью рабочего цикла опрокидывателя являются переменные момент инерции и момент сопротивления. Методики определения функциональных зависимостей моментов инерции и сопротивления описаны в работе [1]. Анализ электромеханических процессов в приводе с использованием указанных зависимостей [2] показал, что время пуска электропривода вагонеепрокидывателя составляет 5–10 % времени цикла. При этом средний пусковой момент многократно превышает номинальный. Это говорит о том, что электромеханические процессы при пуске должны учитываться при выборе электродвигателя по мощности. В связи с этим представляет интерес исследование динамики электромеханических процессов электроприводов вагонеепрокидывателей.

Целью работы является исследование динамики электромеханических процессов электроприводов шахтных вагонеепрокидывателей, результаты которого могут быть использованы при обосновании выбора электродвигателей по мощности и его режима работы для обеспечения номинального срока службы и снижения аварийности.

Исследования динамики электромеханических процессов шахтных вагонеепрокидывателей выполнено методом математического моделирования в среде MatLab Simulink. Исходными данными для моделирования являются зависимости момента сопротивления  $M_c(\alpha)$ , суммарного приведенного к валу двигателя момента инерции  $J(\alpha)$  и параметры электродвигателя. Методика расчета параметров приведена в [2]. Структурные схемы моделей электропривода вагонеепрокидывателя показаны на рис. 1–3.

На рис. 1 приведена общая схема математической модели в системе MatLab Simulink. Для удобства описания структурная модель разделена на три основных группы элементов. Группа 1 предназначена для вычисления момента сопротивления, а так же динамического момента вагонеепрокидывателя и включает в себя следующие элементы. Блоки  $J(\text{Alfa})$ ,  $M(\text{Alfa})$  предназначены для вычисления величин моментов сопротивления и инерции по углу поворота вагонеепрокидывателя. Блоки реализованы с использованием стандартного элемента «Lookup Table», выполняющего линейную интерполяцию зависимостей  $M_c(\alpha)$  и  $J(\alpha)$ , приведенных в [2]. Звено  $\text{Alfa}(\text{Phi})$  необходимо для расчета угла поворота вагонеепрокидывателя по известному углу поворота двигателя. С этой целью использован блок «Gain», реализующий зависимость

$\alpha = 360^\circ \cdot \frac{\omega_p}{2 \cdot \pi}$ . Вычисленный с помощью звена  $J(\text{Alfa})$  суммарный

приведенный к валу двигателя момент инерции вагоноопрокидывателя домножается на угловое ускорение вращения вала двигателя, вычисляемое с помощью блока «Derivative». В результате формируется сигнал динамического момента механической части электропривода вагоноопрокидывателя. Блок  $1/U_p$  предназначен для расчета момента сопротивления на валу двигателя по величине полного передаточного отношения механической части системы  $U_p$ .

Группа элементов 2 включает в себя математическую модель асинхронного электродвигателя АД, реализованную с помощью блока «Asynchronous Machine» библиотеки «SimPowerSystems» MatLab Simulink и блока, задающего сигнал системы трехфазных напряжений статора.

Блок «Asynchronous Machine» представляет собой динамическую математическую модель обобщенной двухфазной электрической машины [3].

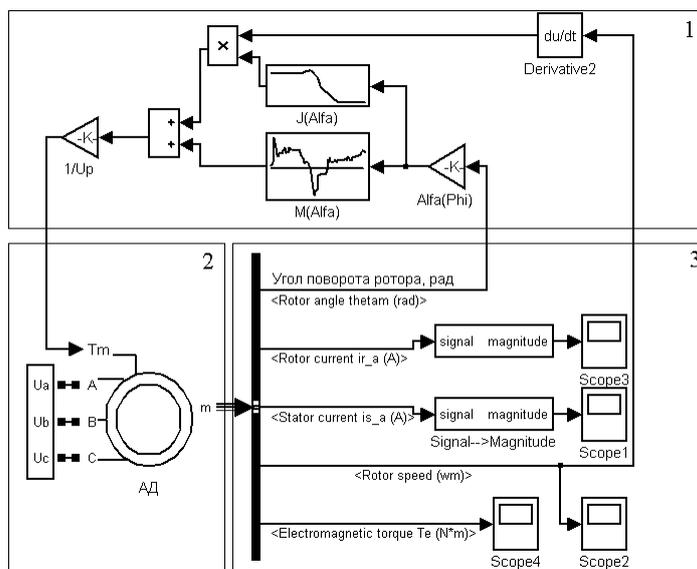


Рис. 1. Структурная схема модели электропривода вагоноопрокидывателя в системе MatLab Simulink

Математическая модель машины имеет следующие особенности: система координат преобразована в неподвижную и совмещена со статорной обмоткой. Все величины приведены к статорным обмоткам. Параметры двигателя рассчитаны в соответствии с методикой [4].

Блок АД имеет входы для сигналов напряжений фазных обмоток статора (входы А, В, С) и величины момента сопротивления (вход  $T_m$ ). Выход модели «m» представляет собой мультиплицированный сигнал, содержащий информацию о величинах, характеризующих динамические режимы работы электродвигателя.

Группа элементов 3 предназначена для обработки и сохранения результатов измерений. Из мультиплицированного сигнала, выхода «m» асинхронной машины, с помощью элемента «Bus Selector» выделяются необходимые для дальнейшего анализа величины: угла поворота вала двигателя (Rotor angle thetam (rad), фазных токов ротора (Rotor current ir\_a (A) и статора (Stator current is\_a (A), угловой скорости вращения вала двигателя (Rotor speed (wm) и электромагнитного момента двигателя (Electromagnetic torque Te (N\*m)). Для наглядности и упрощения анализа величины токов представлялись в виде действующих значений. Вычисление действующих значений по мгновенным выполнялось с использованием блока «Signal->Magnitude».

Структурная модель электропривода вагоноопрокидывателя (рис. 1) позволяет выполнить расчет переходных процессов токов статора и ротора, угловой скорости вращения, электромагнитному моменту и углу поворота вала двигателя по величине момента сопротивления, величине и частоте напряжений фазных обмоток статора.

Известно, что величины токовых перегрузок при пуске асинхронных двигателей могут быть снижены путем использования устройств плавного пуска. В настоящее время применяются пускатели с плавным изменением величины подаваемого на двигатель напряжения, плавным изменением частоты и напряжения на двигателе (частотный пуск).

При запуске приводных двигателей с изменением величины питающего напряжения сокращаются ударные динамические воздействия на механизм и токовые перегрузки в обмотках [5]. Частотный пуск приводных двигателей позволяет более эффективно управлять электроприводом, однако использование преобразователя частоты только для пусковых режимов нецелесообразно ввиду заметно большей стоимости.

Устройство плавного пуска с регулированием напряжения статорных обмоток представляет собой нереверсивный трехфазный тиристорный коммутатор с системой управления на базе микропроцессорного контроллера. Основным силовым элементом устройства является тиристорный ключ, представляющий собой два встречно-параллельно включенных тиристора. Такой ключ помещается в каждую из трех фаз. Изменяя угол управления (включения) тириستоров, можно менять подводимое к статорной обмотке двигателя напряжение и, соответственно, ток.

С целью исследования динамики электромеханических процессов при работе с устройством мягкого пуска использовалась упрощенная математическая модель, показанная на рис. 2, а и состоящая из модели системы широтно-импульсной модуляции напряжения и звена задания величины напряжения ЗВН. Формирование сигнала, задающего величины фазных напряжений статорных обмоток, выполнялось с использованием модели задатчика интенсивности, показанной на рис. 2, б и включающей в себя звено с линейно нарастающим сигналом «Ramp» и звено насыщения «Saturation», ограничивающее величину напряжения номинальной величиной.

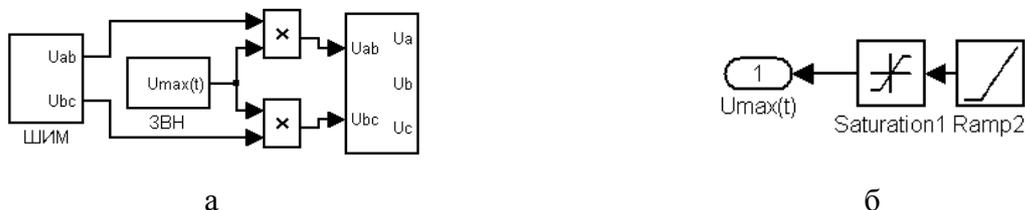


Рис. 2. Структурные модели:  
а – устройства мягкого пуска; б – блока задания величины напряжения ЗВН

Структурная модель широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения в развернутом виде представлена на рис. 3. Более подробно структура математической модели и назначение звеньев описаны в [6].

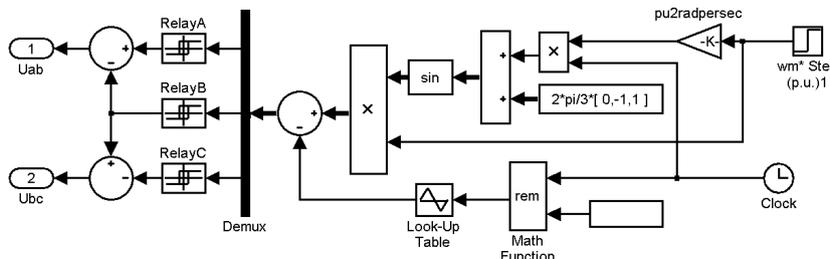


Рис. 3. Структурная модель ШИМ

На рис. 4, а приведены графики переходных процессов момента сопротивления  $M(t)$  в относительных единицах и момента инерции механизма  $J(t)$ , на рис. 4, б – графики зависимостей относительных тока и скорости вращения вала двигателя.

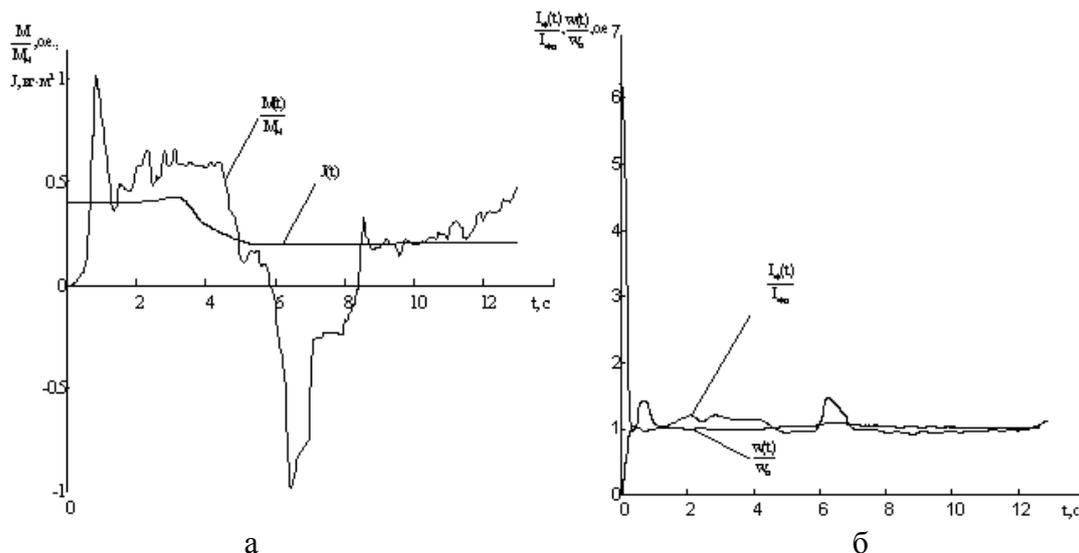


Рис. 4. Графики зависимостей:

а –  $M/M_c(t)$  относительного момента сопротивления и  $J(t)$  момента инерции механизма вагонопрокидывателя за один полный оборот; б – относительных  $I_\phi(t)/I_{\phi n}$  тока фазы статора и скорости вращения вала двигателя  $\omega(t)/\omega_n$  момента инерции механизма вагонопрокидывателя за один полный оборот

Из анализа рис. 4, а следует, что при работе с переменными моментом сопротивления и моментом инерции, имеет место средняя пусковая перегрузка по току в  $4,5I_H$ , средний ток за время работы составляет  $1,1I_H$ . Многократное превышение током номинальной величины при пуске вызывает значительный рост тепловых потерь при ухудшении условий теплоотвода, связанном с пониженной частотой вращения. Значительная токовая перегрузка при пуске и превышение средним за время работы током номинальной величины могут стать причиной превышения температурой обмоток максимально допустимой величины, интенсивному расходу ресурса изоляционных материалов и выходу двигателя из строя.

На рис. 5 показаны графики мгновенного значения тока ротора и относительных тока статора и скорости вращения при пуске от устройства плавного пуска с плавным изменением напряжения питания фазы двигателя 90–220 В на протяжении 1 с.

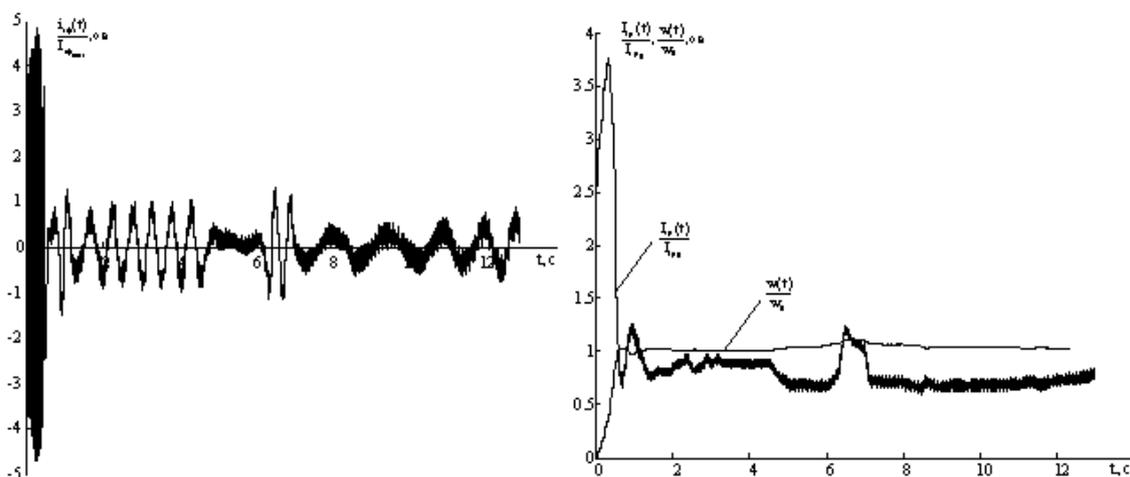


Рис. 5. Графики зависимостей:

а – мгновенного значения тока ротора за время работы вагонопрокидывателя; б – относительных  $I_\phi(t)/I_{\phi n}$  тока фазы статора и скорости вращения вала двигателя  $\omega(t)/\omega_n$  момента инерции механизма вагонопрокидывателя за один полный оборот при пуске двигателя с устройством плавного пуска

Из анализа рис. 5, б следует, что применение устройства плавного пуска позволяет сократить среднюю токовую перегрузку по току до  $3,2I_H$  при увеличении времени работы на 0,7 с, при времени опрокидывания в 13 с.

Результаты анализа динамики переходных процессов могут быть использованы для расчета мощностей источников тепла, анализа динамики тепловых процессов и обоснования выбора электродвигателя.

Особенностью графиков рис. 5 является искажение формы токов статора и ротора, связанное с тем, что при моделировании устройства мягкого пуска не использовались сглаживающие дроссели. Наличие высших гармоник в токах статора и ротора может привести к дополнительным тепловым потерям, что следует учитывать при расчете тепловых процессов.

В табл. 1 приведены расчетные и экспериментально определенные характеристики рабочего цикла вагоноопрокидывателя. Экспериментально определенные величины получены для вагоноопрокидывателей шахт производственного объединения «Донецкуголь».

Таблица 1

Характеристики рабочего цикла вагоноопрокидывателя, ОН2П, тип вагонетки УВГ-1, расчетные и экспериментальные данные

	Продолжительность разгрузки, с	Средний пусковой ток, А	Время пуска двигателя с нагруженной вагонеткой	Относительная продолжительность пускового периода ко времени цикла
Расчет	13,1	54	1,2–1,65	9,1–12,7 %
Эксперимент	13	59,4	1,1	8,5 %

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных следует, что их расхождение не превышает 10 %.

### ВЫВОДЫ

Предложенная методика анализа динамики электромеханических процессов электроприводов шахтных вагоноопрокидывателей позволяет судить о величине и длительности токовых перегрузок, имеющих место в рабочем цикле. Полученные результаты позволяют провести дальнейший анализ динамики тепловых процессов и разработать рекомендации по выбору мощности и режима работы электродвигателей с целью обеспечения номинального срока службы и снижения аварийности.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будишевский В. А. Характеристики моментов инерции и сопротивления электроприводов шахтных вагонеток / В. А. Будишевский, А. И. Резников // *Материалы VIII международной научно-технической конференции «Механика жидкости и газа»*. – Донецк; ДонНТУ, 2009. – С. 192–198.
2. Электромеханические характеристики электроприводов с переменными моментами инерции и сопротивления / Федоров М. М., Будишевский В. А., Резников А. А. Ткаченко А. А. // *Сборник научных трудов УкрНИИВЭ: Взрывозащищенное электрооборудование*. – Донецк : Юго–Восток, Лтд, 2010. – С. 223–230.
3. Krause P. C. *Simulation of symmetrical induction machinery* / P. C. Krause // *IEEE Trans. Power apparatus Systems*. – 1965. – Vol. PAS-84. – No. 11. – P. 1038–1053.
4. Моцинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю. А. Моцинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // *Электричество*. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
5. Тиристорные коммутаторы с плавным пуском и приборы контроля изоляции разработки и производства НПП «Сатурн» / Ерошкин А. В., Шейкин Ю. И., Рачковский А. С., Черножуков С. И., Белоглазов А.А. // *Нефтьгазпром*. – 2008. – № 2. – С. 28–29.
6. Mohan N. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins // *John Wiley & Sons, Inc.* – New York, 1995. – Section 8.4.1.