

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА СР72 ПРИ ЗАКЛИНИВАНИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

**Введение.** В 50% случаев отказы скребковых конвейеров происходят из-за порыва цепи вследствие действия нагрузок, превышающих разрывные и возникающих в основном при заклинивании. В [1] представлены результаты моделирования процесса аварийного заклинивания рабочего органа скребкового конвейера СР72, вызванного различными причинами, в том числе наиболее тяжелыми: падением породы и попаданием скребка в рештак. Сравнительная оценка динамических усилий в двух вышеуказанных случаях показала, что при попадании скребка в рештак практически по всей длине конвейера пиковые натяжения приводят к порыву цепи. Поэтому работа такого конвейера без принятия дополнительных мер по снижению нагрузок недопустима.

Для ограничения динамических нагрузок при пуске конвейера, а также избыточных по величине натяжений цепи при заклинивании традиционно применяется гидромuftа. Проведенное в [2] моделирование конвейера СР72 с учетом гидромuftы подтвердило факт смягчения пуска конвейера и, одновременно, показало, что гидромuftа не исключает порыв цепи от заклинивания, а лишь расширяет участок конвейера, на котором заклинивание аварийнобезопасно.

Поэтому для производителей скребковых конвейеров актуальной остается задача исключения гидромuftы из новых разработок конвейеров и замена ее альтернативным оборудованием.

**Цель работы.** Оценка возможности исключения гидромuftы из кинематической схемы скребкового конвейера по результатам компьютерного моделирования, а также сравнительный анализ эффективности предложенных технических решений для снижения динамических нагрузок в цепи конвейера при заклинивании по сравнению с гидромuftой.

**Материал и результаты исследования.** Исключение гидромuftы из конструкции скребкового конвейера требует решения следующих задач: - обеспечение плавного пуска конвейера; - автоматическое обнаружение момента заклинивания цепи конвейера; - аварийное торможение асинхронного двигателя конвейера по сигналу заклинивания.

Рассмотрим различные устройства и способы обнаружения момента заклинивания цепи и оценим их эффективность (запаздывание во времени) применительно к скребковому конвейеру СР72. Следует отметить, что описанные ниже технические решения известны и применяются в промышленности. Однако необходимо изучить эффективность их применения к скребковым конвейерам и сделать соответствующие выводы.

Первый способ – применение акустических датчиков транспортируемого материала. Акустический сенсор SITRANS AS 100 – промышленно выпускаемый фирмой SIEMENS ультразвуковой датчик (рис. 1) для контроля потока транспортируемого материала (горная промышленность и др.). Он регистрирует звуковые волны (75 кГц – 175 кГц) при движении материала и работе механизма, устойчив к низкочастотным вибрациям, реагирует на изменение потока материала или отказ механизма [3].

Сенсор ввинчивается в резьбовое отверстие контролируемого прибора (например, рештак конвейера) либо приваренную к нему монтажную шайбу. Совместно с контрольным блоком SITRANS CU 02 интегрируется в систему управления механизма и позволяет управлять релейно-контакторной аппаратурой. Кроме того, сенсор совместим с аналоговым входом программируемых логических контроллеров.

Покажем, как можно сконфигурировать систему обнаружения момента заклинивания цепи, состоящую из 4-х идентичных сенсоров SITRANS AS 100, расположенных на расстоянии 25 м друг от друга по длине конвейера  $L=100$  м (рис. 2). В такой схеме в самом неблагоприятном случае при заклинивании цепи посередине между соседними сенсорами расстояние прохождения звуковой волны к ближайшему из них будет равно 12,5 м. С учетом реальных значений скорости распространения звуковой волны по желобу конвейера ( $a \approx 3300-3700$  м/с), волна дойдет до ближайшего сенсора за 3-5 мс. Внутренняя задержка датчика лежит в пределах 5 мс. Тогда суммарное время задержки срабатывания такой системы будет находиться в пределах 10 мс от момента заклинивания цепи в худшем случае.



Рис. 1. Внешний вид датчика SITRANS AS 100

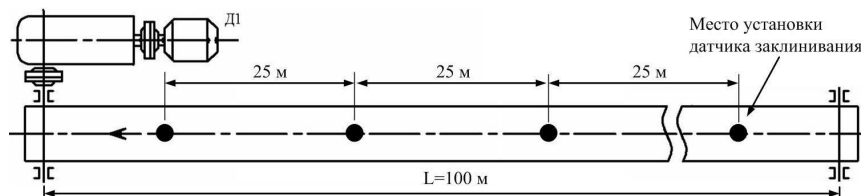


Рис. 2. Схема размещения датчиков SITRANS AS 100 по длине конвейера

Рассмотрим второй способ обнаружения момента заклинивания цепи конвейера: посредством оценки скорости нарастания тока статора асинхронного двигателя. Для этого на разработанной ранее модели скребкового конвейера [1] оценим скорость нарастания тока для двух случаев:

- при скачкообразном нагружении двигателя конвейера двукратным номинальным моментом (рис. 3, а);

- при заклинивании цепи конвейера от попадания скребка в рештак в конце рабочей ветви (рис. 3, б).

В первом случае ток начинает нарастать со скоростью  $d(I/I_{ном})/dt=280 I_{ном}/с$  практически сразу после двукратной загрузки конвейера. Во втором случае ток начинает нарастать только после того, как волна усилий достигнет приводной станции за 28-29 мс, и далее начинает нарастать со скоростью  $d(I/I_{ном})/dt=6800 I_{ном}/с$ .

Таким образом, для исключения ложного срабатывания защиты, выберем уставку по производной тока на уровне  $d(I/I_{ном})/dt=560 I_{ном}/с$ , что соответствует скачкообразной загрузке конвейера 4-х кратным моментом. Тогда задержка срабатывания защиты будет находиться в пределах 30 мс от момента заклинивания.

Далее рассмотрим эффективность применения в конвейере СР72 третьего общеизвестного способа обнаружения момента заклинивания цепи посредством оценки максимального значения тока статора асинхронного двигателя. Для удобства анализа получены ток одной фазы статора и его огибающая (пространственный вектор), представленные на рис. 4.

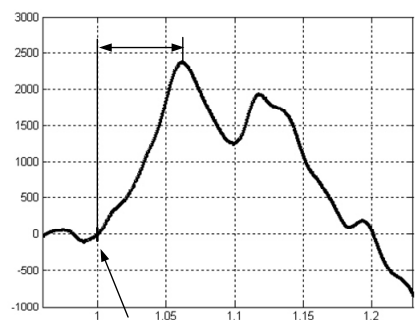
В первом случае (рис. 4, а) максимальное значение тока составляет 300А, а во втором случае (рис. 4, б) при заклинивании – 560А, что в среднем не превышает максимального значения пускового тока двигателя.

Выберем уставку срабатывания защиты на уровне  $i_{max}=300А$ , что соответствует скачкообразной загрузке конвейера 2-х кратным моментом. Тогда из рис. 4 (б) видно, что задержка срабатывания защиты будет находиться в пределах 50 мс от момента заклинивания.

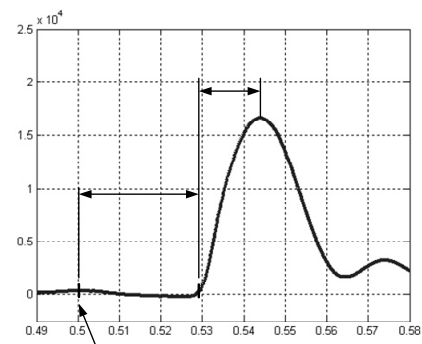
Таким образом, в результате анализа применения трех разных способов обнаружения момента заклинивания в конвейере СР72 установлено, что система из четырех ультразвуковых датчиков имеет задержку по времени около 10 мс, система с использованием производной от тока – около 30 мс, а система с контролем величины тока – около 50 мс.

В ходе дальнейшего моделирования было установлено, что защита эффективна в случае, когда задержка от момента заклинивания до окончания срабатывания аппаратуры аварийного торможения асинхронного двигателя не превышает 100 мс. Таким образом, рассмотренные выше способы обнаружения момента заклинивания удовлетворяют этому требованию и могут быть применены для конвейера СР72. Наибольшую эффективность имеет система на основе акустических сенсоров, время задержки которой при предложенном их количестве и схеме размещения не превышает 10 мс.

Проведенные ранее исследования [2] показали, что наличие гидромуфты мало влияет на величину усилий в цепи конвейера при ее заклинивании от падения пласта породы. Однако существенное снижение усилий за счет гидромуфты было выявлено при заклинивании цепи конвейера от попадания скребка в рештак (с 220 кН до 160 кН, что составляет около 26%). Заменяв гидромуфту альтернативными техническими решениями, оценим их эффективность по снижению усилий в цепи при аналогичных условиях эксперимента (заклинивание в конце рабочей ветви) по сравнению с гидромуфтой. Отметим, что предлагаемые способы просты, не требуют силовой преобразовательной техники и могут быть реализованы без существенных изменений релейно-контакторной схемы управления электропривода конвейера.

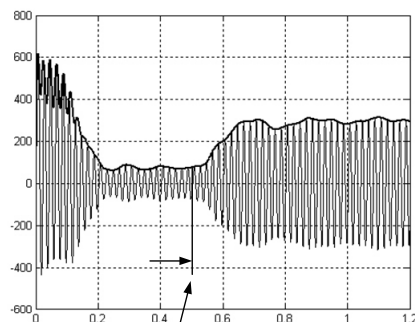


а)

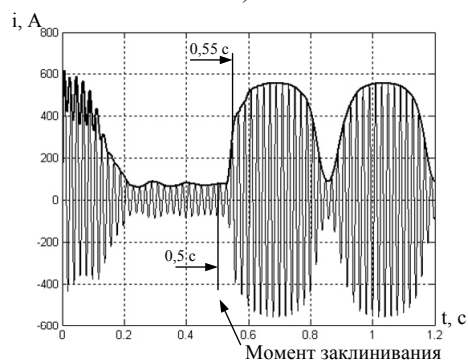


б)

Рис. 3. Скорость нарастания тока статора асинхронного двигателя при различных причинах заклинивания



а)



б)

Рис. 4. Ток статора асинхронного двигателя при различных причинах заклинивания

### Экстренное торможение конвейера отключением асинхронного двигателя от сети

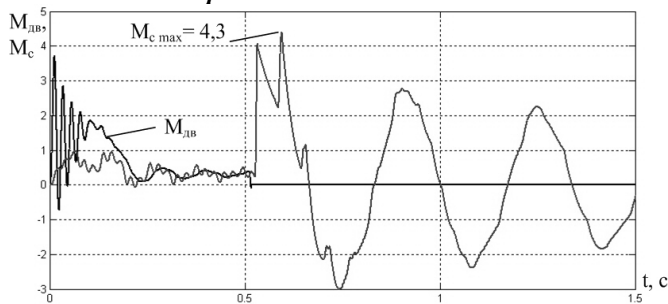


Рис. 5. Графики моментов  $M_{дв}$  и  $M_c$

Таблица 1. Результаты моделирования

| Система обнаружения заклинивания | датчик | $(dI/dt)_{max}$ | $i_{max}$ |
|----------------------------------|--------|-----------------|-----------|
| $t_{задержки}$ , мс              | 10     | 30              | 50        |
| $F_{max. дост. (x, t)}$ , кН     | 176    | 183             | 191       |
| Снижение усилий                  | 20%    | 17%             | 13%       |
| По сравнению с гидромuftой       | хуже   | хуже            | хуже      |

аппаратуры напряжение в цепи конвейера без гидромuftы выше, чем в конвейере с гидромuftой, то есть такой способ применять нельзя.

В ходе моделирования было установлено, что отключение асинхронного двигателя от сети с последующим замыканием фаз статора между собой способствует возникновению тормозного момента и снижению динамических нагрузок в цепи конвейера при заклинивании до 145 кН и 160 кН при  $t_{задержки}=10$  мс и 30 мс соответственно. Таким образом, с учетом времени срабатывания релейно-контакторной аппаратуры данное решение можно применять в конвейере без гидромuftы.

### Экстренное торможение конвейера периодическим реверсированием асинхронного двигателя с последующим отключением от сети

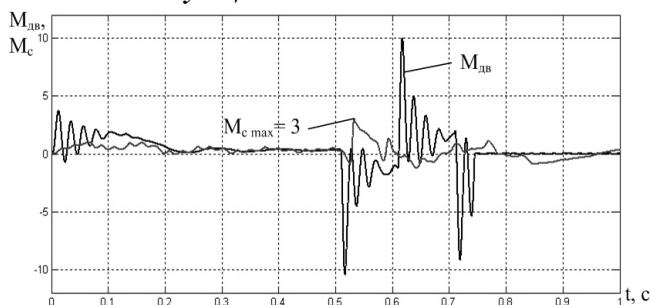


Рис. 6. Графики моментов  $M_{дв}$  и  $M_c$

Таблица 2. Результаты моделирования

| Система обнаружения заклинивания | датчик | $(dI/dt)_{max}$ | $i_{max}$ |
|----------------------------------|--------|-----------------|-----------|
| $t_{задержки}$ , мс              | 10     | 30              | 50        |
| $F_{max. дост. (x, t)}$ , кН     | 120    | 160             | 170       |
| Снижение усилий                  | 46%    | 26%             | 24%       |
| По сравнению с гидромuftой       | лучше  | наравне         | наравне   |

ния в пределах 20 мс [4] и в сочетании с системами обнаружения момента заклинивания при  $t_{задержки}=10$  мс и 30 мс должны обеспечить полученное в ходе моделирования снижение нагрузок в цепи конвейера наравне с гидромuftой.

Рассмотрим первый способ аварийного останова конвейера без гидромuftы отключением асинхронного двигателя от сети. На рис. 5 в относительных единицах представлены графики переходных процессов момента двигателя  $M_{дв}$  и момента сопротивления на валу двигателя  $M_c$ , который пропорционален усилию в звеньях цепи непосредственно возле приводной станции. По истечению 10 мс от момента заклинивания моделируется «мгновенное» отключение двигателя от сети. В этом случае возникшие от заклинивания при включенном двигателе автоколебания скоростей и усилий затухают, конвейер постепенно останавливается, а максимальное значение пика усилий в цепи возле приводной станции находится на уровне 176 кН. Данное решение менее эффективно по сравнению с гидромuftой, которая снижала нагрузку до 160 кН.

Серия аналогичных расчетов была выполнена при  $t_{задержки}=30$  мс и 50 мс (табл. 1) и показала, что для любого из рассмотренных выше трех способов обнаружения момента заклинивания даже без учета времени срабатывания релейно-контакторной

Рассмотрим второй способ аварийного останова конвейера: путем периодического реверсирования асинхронного двигателя с последующим его отключением от сети. Этот способ торможения двигателя не является общеизвестным, но моделирование такого способа останова конвейера показало, что он сопоставим по эффективности снижения пиковых динамических нагрузок в конвейере без гидромuftы по сравнению с конвейером с гидромuftой. Причем наибольшая эффективность достигается при периодическом реверсировании двигателя с частотой, которая в 2 раза превышает частоту вынужденных автоколебаний, либо при их отсутствии – частоту собственных колебаний цепи конвейера.

Как видно из рис. 6, тормозной момент асинхронного двигателя при реверсе больше пускового. За счет этого достигается большая эффективность снижения пиковых натяжений по сравнению с рассмотренным выше способом и гидромuftой при  $t_{задержки}=10$  мс. Однако реализация этого преимущества требует установки достаточно быстродействующей релейно-контакторной аппаратуры. Так, современные пускатели SIRIUS (производитель фирма SIEMENS), согласно их паспортным характеристикам, обеспечивают время отключе-

**Экстренное торможение конвейера динамическим торможением асинхронного двигателя**

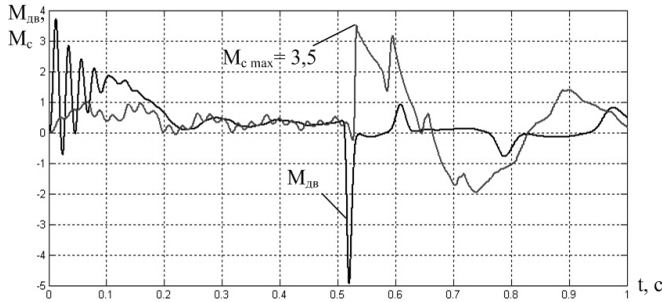


Рис. 7. Графики моментов  $M_{дв}$  и  $M_c$

Таблица 3. Результаты моделирования

| Система обнаружения заклинивания | датчик       | $(dI/dt)_{max}$ | $i_{max}$ |
|----------------------------------|--------------|-----------------|-----------|
| $t_{задержки}$ , мс              | 10           | 30              | 50        |
| $F_{max. дост. (x, t)}$ , кН     | 140          | 165             | 176       |
| Снижение усилий                  | 37%          | 25%             | 20%       |
| По сравнению с гидромuftой       | <b>лучше</b> | наравне         | хуже      |

**Экстренное торможение конвейера конденсаторным торможением асинхронного двигателя**

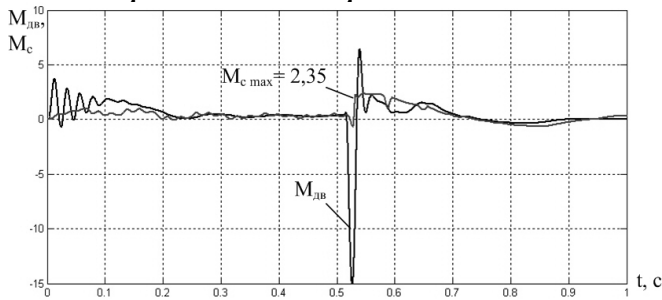


Рис. 8. Графики моментов  $M_{дв}$  и  $M_c$

Таблица 4. Результаты моделирования

| Система обнаружения заклинивания | датчик       | $(dI/dt)_{max}$ | $i_{max}$ |
|----------------------------------|--------------|-----------------|-----------|
| $t_{задержки}$ , мс              | 10           | 30              | 50        |
| $F_{max. дост. (x, t)}$ , кН     | 95           | 195             | 200       |
| Снижение усилий                  | 58%          | 12%             | 9%        |
| По сравнению с гидромuftой       | <b>лучше</b> | хуже            | хуже      |

го торможения асинхронного двигателя постоянным током или за счет отключения фаз статора от сети с последующим их замыканием между собой.

**ЛИТЕРАТУРА**

- Осичев А.В., Ткаченко А.А. Оценка динамических свойств электропривода скребкового конвейера CP72 при различных причинах заклинивания его рабочего органа. // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ» – Львів: ЕКОІнформ, 2009.- 516 с.– С. 148-150.
- Осичев А.В., Ткаченко А.А. Оценка влияния гидромuftы на динамические усилия в скребковом конвейере CP72 при заклинивании рабочего органа. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63) частина 3. 202 с.– С. 126-129.
- SIEMENS FI 01 2006 – Каталог по полевым приборам SITRANS.
- SIEMENS LV 10 2004 – Каталог по коммутационным аппаратам SIRIUS.

Рассмотрим третий способ – динамическое торможение асинхронного двигателя конвейера, осуществляемое путем отключения обмоток статора от сети трехфазного тока с последующим подсоединением двух из фаз к источнику напряжения постоянного тока.

На рис. 7 показаны графики такого процесса в модели конвейера при  $t_{задержки}=10$  мс. Из графиков видно, что первый пик тормозного момента способствует эффективному снижению нагрузок лучше гидромuftы, но несколько хуже предыдущего способа. С учетом времени срабатывания релейно-контакторной аппаратуры порядка 20 мс экстренное динамическое торможение постоянным током снижает динамические нагрузки при заклинивании цепи конвейера наравне с гидромuftой.

Рассмотрим четвертый способ – конденсаторное торможение асинхронного двигателя конвейера, параллельно обмотке статора которого глухо подключены конденсаторы по схеме треугольника. Данный способ применяется для быстрой остановки приводов. При отключении двигателя от сети во время разряда конденсаторов появляется большой тормозной момент, который с уменьшением частоты вращения падает.

Моделирование показало (рис. 8), что этот способ торможения действительно дает наилучшие результаты из рассмотренных, однако только при условии «мгновенного» срабатывания релейно-контакторной аппаратуры.

**Выводы.** Таким образом, в результате моделирования и анализа полученных результатов установлено, что экстренное торможение конвейера CP72 без гидромuftы может быть осуществлено с динамическими нагрузками, не превосходящими имеющиеся в конвейере с гидромuftой, если:

- Задержка от момента заклинивания до окончания срабатывания аппаратуры экстренного торможения находится в пределах 50 мс, а торможение конвейера осуществляется путем периодического реверсирования асинхронного двигателя с последующим его отключением от сети;
- Задержка от момента заклинивания до окончания срабатывания аппаратуры экстренного торможения находится в пределах 30 мс, а торможение конвейера осуществляется путем динамического