Таким образом, **использование дифференциальной эволюции упрощает применение методов оптимального управления [2-5] при построении систем управления асинхронными электродвигателями.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Янг Л.* Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления. – М.: Мир, 1974. -488 с.

2. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1976. -392 с.

3. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления.- М.: Наука, 1968. -408 с.

4. *Кротов В.Ф., Гурман В.И.* Методы и задачи оптимального управления. - М.: Наука,1973. -446 с.

5. *Кротов В.Ф., Букреев В.З., Гурман В.И.* Новые методы вариационного исчисления в динамике полета. -М.:Машиностроение,1969. -288 с.

6. *Kenneth V. Price, Rainer M. Storn, Jouni A.* Lampinen. Differential Evolution**.** A Practical Approach to Global Optimization. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. -537 pages.

7. *Vitaliy Feoktistov.* Differential evolution. In Search of Solutions. Springer Science+Business Media, LLC, 2006. - 200 pages.

8. *Bidyadhar Subudhi, Debashisha Jena.* Differential evolution computation applied to parameter estimation of induction motor / Archives of Control Sciences, Volume 19(LV) No. 1, 2009. P. 5–26.

9. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. -284 с.

□ Автор статьи:

Ещин
Евгений Константинович,
докт. техн.наук,
профессор каф. прикладных
информационных
технологий КузГТУ.
Email: eke@kuzstu.ru

УДК 621.867:621.313

Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Д.С. Аниканов

КОНТРОЛЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА ПОСРЕДСТВОМ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Конвейерно-транспортные машины различной мощности, производительности и протяженности являются одним из основных видов грузового транспорта на угольных шахтах и предприятиях по переработке полезных ископаемых (угольных и рудных обогатительных фабриках, металлургических заводах и др.). От надежной, ритмичной и безотказной работы этих механизмов напрямую зависят производительность и экономические показатели работы предприятия в целом.

Работа узлов и агрегатов конвейерных линий сопровождается воздействием значительных механических нагрузок. В большинстве случаев эти нагрузки являются расчетными, но даже в этом случае их постоянное воздействие приводит к постепенному износу и в конечном итоге выходу механизма из строя по тем или иным причинам. Сами эти причины весьма разнообразны. Сложность и тяжесть повреждения определяет продолжительность простоя оборудования, затраты на ремонт, размер ущерба. В этой связи защита механизмов от опасных режимов работы и своевременная диагностика возникающих неисправностей является одним из условий бесперебойной работы агрегатов и предприятия в целом.[1]

Важно отметить, что во многих случаях конвейерные механизмы в течение эксплуатационных периодов работают без наблюдения персонала, либо его количество мало по сравнению с количеством обслуживаемого оборудования. По этой причине сами аварии выявляются несвоевременно, а их характер определяется зачастую неверно, что увеличивает потери производства. Поэтому своевременное и точное определение места и характера повреждения технологического оборудования является актуальной задачей. В условиях

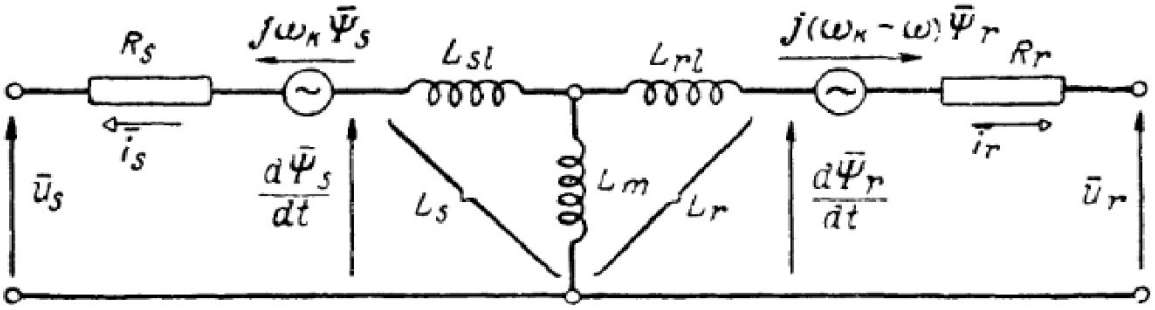

Рис. 2. Схема замещения асинхронной машины в переходных режимах

отсутствия постоянного обслуживающего персонала, для определения неисправностей и аварийных ситуаций важно задействовать все имеющиеся возможности, в том числе и косвенные.

Стандартная технологическая схема конвейерной линии представлена на рис. 1. Все перечисленные здесь элементы в процессе эксплуатации подвержены износу и поломкам. Отказ любого из них может привести к остановке конвейера в целом, и, как следствие, всей технологической цепочки.

На практике контроль состояния механизма осуществляется следующими датчиками:

- контроля станции натяжения ленты;
- температуры смазки редуктора**;**
- застревания горной массы (заштыбовки);
- скорости вращения головного барабана;
- контроля схода ленты;
- уровня горной массы в бункере приема и отгрузки.

Перечисленные выше датчики не могут в полной мере охватить весь спектр аварийных ситуаций, присущих конвейерным установкам (расцепление передаточных муфт редуктора, обратный ход груженой ленты, неисправность опорных подшипников редуктора и барабанов, заклинивание или обрыв ленточного полотна, и пр.). Поэтому весьма желательна разработка дополнительных методик контроля, действующих в комплексе со стандартными защитами.

Решить поставленную задачу можно путем контроля электрических параметров приводного электродвигателя сопряженного с механической частью конвейера.

Известно, что в электроприводе большинства конвейерных механизмов используются асинхронные электродвигатели, которые преобразуют электрическую энергию питающей сети в механическую энергию на валу. Неисправности механической части конвейера приводят к отклонениям величины момента на валу электродвигателя от нормальных для данного режима значений. Следовательно, контролируя электрические параметры приводного двигателя можно судить о состоянии механической части конвейерного механизма.[4,6]

Теоретической основой методики контроля являются известные описания переходных и энергетических процессов в асинхронном электродвигателе.[2]

Упрощенная схема замещения асинхронной машины, представлена на рис. 2 [4].

Опираясь на методику описания асинхронной машины в координатной системе, вращающейся с угловой скоростью $\omega_к$ уравнения состояния электрических параметров, выразятся [4]:

$$u_s = i_s R_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \qquad (1)$$

$$u_r = i_r R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - w)\Psi_r \qquad (2)$$

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \qquad (3)$$

$$\Psi_r = L_m i_s + L_r i_r \qquad (4)$$

$$M = 3/2\ \Psi_s \times i_s = -3/2\ \Psi_r \times i_r \qquad (5)$$

где u_s, u_r - напряжения статора и ротора;

Ψ_s , Ψ_r - потокосцепления статора, ротора;

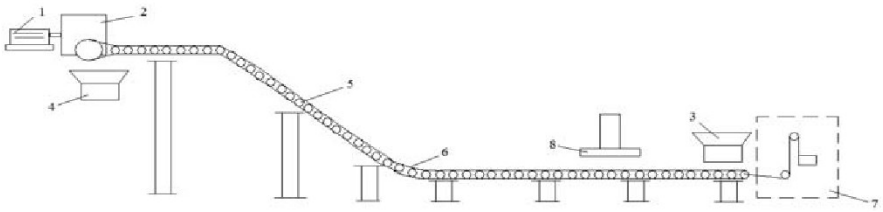

Рис. 1. Технологическая схема конвейерной линии: 1 - электродвигатель; 2 - редуктор; 3 - питатель; 4 - бункер; 5 - опорные и поддерживающие ролики; 6 - конвейерная лента; 7 - станция натяжения ленты; 8 - железоуловитель и железоотделитель.

R_s , R_r - сопротивления статора и ротора;

L_m - взаимная индуктивность статора и ротора;

ω_k - угловая скорость системы координат;

w - угловая скорость ротора;

L_s , L_r - индуктивности статора и ротора;

M – момент на валу двигателя;

i_s, i_r - токи статора и ротора.

Численная величина момента на валу описывается выражением [5]:

$$M = \frac{m_2 p}{\omega_1} E_{2н} I_2 \cos\Psi_2, \qquad (6)$$

где p - число пар полюсов;

ω_2 - синхронная скорость поля статора;

Ψ_2 - угол сдвига фаз тока ротора и ЭДС;

$E_{2н}$ - ЭДС неподвижного ротора;

I_2 - фазный ток обмотки ротора.

Если в это уравнение подставить величину ЭДС , то получим следующее выражение момента:

$$M = \frac{m_2 p}{\omega_1} \cdot 4.44 \cdot f \cdot w_2 k_2 \Phi I_2 \cos\Psi_2 \qquad (7)$$

где Ф - постоянный магнитный поток в зазоре;

f - частота напряжения сети;

w_2 - количество витков обмотки ротора;

k_2 - обмоточный коэффициент ротора.

Векторная диаграмма работающего асинхронного двигателя изображена на рис. 3 [5]:

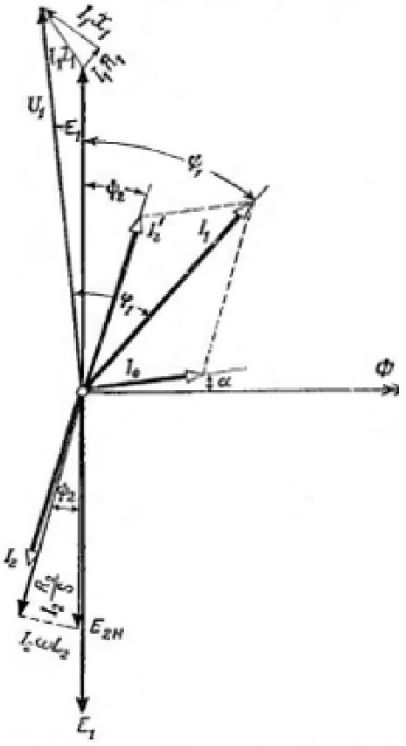

Рис. 3.Векторная диаграмма вращающегося асинхронного двигателя

Активную составляющую первичного напряжения машины согласно рис.3 можно выразить:

$$U_1 \cos\varphi_1 = I_1 R_1 + U \cos\Psi_1 \qquad (8)$$

где U - модуль вектора Э.Д.С. статора;

φ_1 - угол сдвига фаз между током (I_1) и напряжением (U_1) статора;

Ψ_1 - угол сдвига фаз между ЭДС и током статора;

R_1 - активное сопротивление статора;

U_1 - напряжения статора.

Умножив левую и правую части уравнения (8) на I_1, получим выражение мощности, потребляемой одной фазой двигателя, через потери в меди обмотки статора и через мощность, передаваемую одной фазой вращающемуся полю:

$$U_1 I_1 \cos\varphi_1 = I_1^2 R_1 + U I_1 \cos\Psi_1 \qquad (9)$$

Значение $I_1 \cos\Psi_1$ можно заменить через соответствующие составляющие намагничивающего тока и приведенного тока ротора согласно диаграмме, изображенной на рис. 4 [5]:

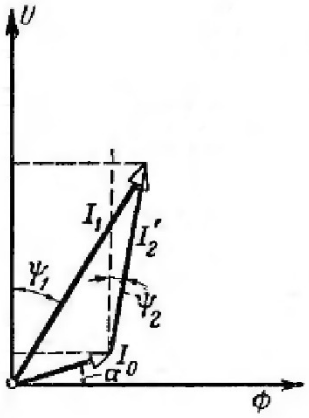

Рис. 4. Векторная диаграмма тока статора

Из приведенной диаграммы следует:

$$I_1 \cos\varphi_1 = I_0 \sin\alpha + I_2' \cos\Psi_2 , \qquad (10)$$

где I_0 -ток ветви намагничивания;

α - угол магнитных потерь;

I_2' -приведенный ток ротора.

С учетом (10) выражение (9) преобразуется:

$$U_1 I_1 \cos\varphi_1 = I_1^2 R_1 + U I_0 \sin\alpha + U I_2' \cos\Psi_2 \qquad (11)$$

Из выражения (11) следует:

$$I_2' \cos\Psi_2 = \frac{U_1}{U} I_1 \cos\varphi_1 - \frac{I_1^2 R_1}{U} - I_0 \sin\alpha \qquad (12)$$

где $I_0 \sin\alpha$ -произведение тока ветви намагничивания и синуса угла магнитных потерь (величина незначительная и в процессе работы остающаяся практически неизменной).

Реальный ток ротора I_2 при известном значении приведенного тока I_2' определится выражением:

$$I_2 = I_2^{'} \frac{3 w_1 k_1}{m_2 w_2 k_2} \qquad (13)$$

где w_1 - количество витков статора;

k_1 - обмоточный коэффициент статора;

m_2 - число фаз обмотки ротора;

w_2 - количество витков обмотки ротора;

k_2 - обмоточный коэффициент ротора.

С учётом (12,13) выражение момента на валу двигателя будет иметь вид:

$$M = 4.44 \cdot f \cdot w_2 k_2 \Phi I_2 \cos\Psi_2 = \\ = \frac{13.32 f w_1 k_1}{\omega_1} \left(\frac{U_1}{U} I_1 \cos\varphi_1 - \frac{I_1^2 R_1}{U} - I_0 \sin\alpha \right) \qquad (14)$$

Таким образом, зная значения R_1, w_1, k_1, Φ, ω_1 и учитывая постоянную составляющую $I_0 \sin\alpha$, измерение величин U_1, I_1, $\cos\varphi_1$ можно считать косвенным измерением величины момента на валу.

Вместе с тем использование полученного выражения для построения защиты конвейерной линии затруднено по следующим причинам:

- величины магнитного потока Φ, числа витков обмотки статора w_1, активного сопротивления обмотки статора R_1 как правило не указываются в паспортных данных и сопроводительных данных на электрическую машину;

- полученное выражение (14) пригодно для описания момента двигателя только в установившихся режимах с постоянной нагрузкой. В режимах пуска, изменения загрузки механизма или по какой-либо аварийной ситуации возникают переходные процессы, как в механической, так и в электрической частях электропривода;

- значение питающего напряжения U_1 нельзя принимать постоянным, так как оно зависит от конструктивных параметров сети электроснабжения [3].

Однако, известны способы вычисления значений параметров указанных в выражении (14):

- величины магнитного потока Φ, числа витков обмотки статора w_1, активного сопротивления обмотки статора R_1, относятся к так называемым **наблюдаемым** параметрам электрической машины, значения которых можно определить, используя методику, изложенную в [3];

- математическая модель механизма и сопряженной с ним асинхронной машины в переходных режимах представлена системой дифференциальных уравнений, решение которой позволяет получить зависимость момента валу двигателя в периоды протекания динамических процессов. По данным [3] как правило получается колебательный переходный процесс заканчивающийся в течение 0,4…0,6 секунды, что позволяет применять предложенную методику определения момента, так как время протекания механических переходных процессов существенно больше;

- влияние на величину напряжения конструктивных параметров сети электроснабжения можно оценивать по методикам, изложенным в [3]. При этом необходим замер текущего значения напряжения на зажимах двигателя.

Таким образом, контролируя указанные в уравнении (14) параметры и учитывая, что их изменения при смене режимов работы технологиче-

Таблица 1. Значения параметров в различных режимах работы механизма.

Режим работы, вид неисправности, степень загруженности механизма (%).	Величина тока статора	Коэф. мощности *Cos φ*	Изменение величины тока статора относительно нормального режима со 100% загрузкой	Изменение коэф. мощности относительно нормального режима со 100% загрузкой
Режим холостого хода, неисправностей отсутствуют, 0%.	235	0,53	-45 %	-37 %
Режим работы с ½ нагрузки, неисправностей нет, 50%.	375	0,71	-12 %	-15 %
Работа с полной нагрузкой, неисправностей нет, 100%.	428	0,84	-	-
Появление излишнего груза, перегруз конвейера, 120%.	458	0,87	7 %	4 %
Заклинивание ленты горной массой, остановка движения ленты, 100% (ограничено уставками защиты)	540	0,89	26 %	6 %
Сход ленты и частичное задевание става роликовых опор, 100%.	440-460	0,85-0,87	3-7 %	1-4 %
Отслоение вулканизированного шва ленты конвейера, 100%	440-460	0,85-0,87	3-7 %	1-4 %
Поломка опорного подшипника в двигателе, 100%	440-470	0,85-0,88	3-10 %	1- 5 %

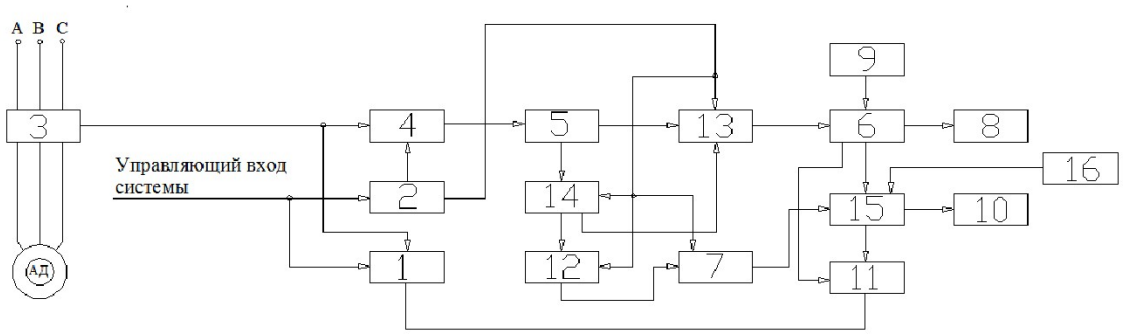

Рис. 5.Функциональная схема защиты конвейера: 1,2,14 - блоки задержки, 3 - измерительное устройство, 4,12,13 - ключи, 5 - блок снятия значения, 6,15 - блоки сравнения, 7 - блок памяти, 8 - блок регистрации, 9 - блок задания уставки, 10 - блок индикации, 11 - блок управления АД, 16 - блок задания

ского объекта и появление неисправностей механической части происходят значительно быстрее по сравнению с изменением величин скольжения и скорости, можно фиксировать возникновение нештатных режимов работы механизма в самый начальный момент их появления.

Изложенная методика для конкретного технологического агрегата позволяет оценить величины изменения момента на валу, тока статора и коэффициента мощности приводного электродвигателя при изменения вида нагрузок, причинами которых служат разного рода механические неисправности, отклонение масс перевозимого груза и др.

Например, для механизма конвейера углеподачи ЦОФ «Краснобродская-Коксовая» (приводной электродвигатель ВАО2-315L6, $P_н$=200 кВТ, $n_н$= 965 об/мин, номинальный ток статора $I_н$=437 А) получены величины отклонения параметров в различных режимах работы, в том числе и нештатных (таблица 1).

Полученные данные подтверждают, что контролируя электрические параметры асинхронного электродвигателя можно идентифицировать аварийные режимы и техническое состояние механизма. Устройства контроля можно реализовать на базе микропроцессорных устройств, предусмотренных в штатных системах автоматики. Фрагмент функциональной схемы защиты, содержащий канал контроля величины тока статора представлен на рис. 5.

Таким образом, контроль энергетических параметров технологического объекта в целом на наиболее доступном для точных замеров участке, позволяет распознавать и предупреждать аварийные режимы работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков А.С.* Углеобогатительные и брикетные фабрики – Л. : Углеметтехиздат, 1982. – 240 с.
2. *Ковач К.П., Рац И.* Переходные процессы в машинах переменного тока: учебник для вузов. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
3. *Ещин Е.К.* Динамические процессы электромеханических систем горных машин в режимах пуска и стопорения. Дисс. док. тех. наук. – Кемерово, 1996. – 270с.
4. *Кипервассер М.В., Инжелевская О.В. Пугачев Е.В.* Методика автоматического распознавания аварийных ситуаций оборудования компрессорной станции //Вестник КузГТУ, 2011, №4. С. 51-55.
5. *Касаткин А.С., Перекалин М.А.* Электротехника. Учебник для вузов.-М.: Государственное энергетическое издательство, 1955. - 376 с., ил.
6. *Кипервассер М.В.* Методика автоматического распознавания аварийных ситуаций механического оборудования, сопряженного с электрической машиной - сборник трудов IV Всерос. науч. практ. конф. СибГИУ, Новокузнецк, 2010. С. 245-247.

Авторы статьи :

Пугачев
Емельян Васильевич,
д.т.н., профессор, зав. каф. электромеханики (Сибирский государственный индустриальный университет)
тел: (3843) 74-86-37

Кипервассер
Михаил Вениаминович.
канд.техн. наук, доцент, зав. каф. электротехники и электрооборудования (Сибирский государственный индустриальный университет)
тел: (3843) 46-23-88

Аниканов
Дмитрий Сергеевич,
инженер ООО «ПНУ» ОК «Сибшахтострой»