

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ»

11-12 апреля 2011 г.

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 62-83

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

ХАЗИЕВ В. В.

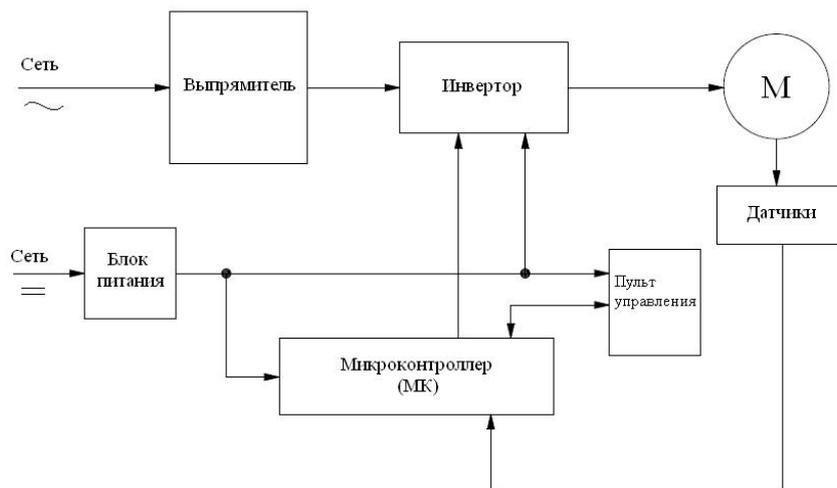
ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Данная работа посвящена созданию экспериментального стенда для изучения алгоритмов управления электрическими двигателями.

В общем случае структурная схема управления электроприводом состоит из следующих блоков: выпрямитель, инвертор, микроконтроллер, пульт управления, датчики и источник вторичного питания.

Проблема эффективного энергопользования напрямую связана с повышением КПД электродвигателя и силовой преобразовательной техники за счет усовершенствования алгоритмов управления.

Таким образом, разрабатываемый стенд (см. рисунок) должен соответствовать современным тенденциям развития электропривода и алгоритмов управления. Основными функциональными модулями, влияющими на качество управления электродвигателем, являются силовая часть инвертора и микроконтроллер.



Структурная схема стенда

В настоящее время в качестве силовой части инвертора широко применяются так называемые интеллектуальные силовые модули (IPM) на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Лидерами мирового рынка в сфере силовой электроники являются такие фирмы, как International Rectifier, Semikron, Mitsubishi Electric, Infineon и др.

Для данного проекта был выбран интеллектуальный силовой модуль фирмы Mitsubishi Electric PS12018-A. Модуль представляет собой конструктивно законченное изделие, которое нуждается в минимальном количестве дополнительных элементов и состоит из семи силовых IGBT ключей с защитными обратными диодами. Также в корпусе реализована защита по току и напряжению и оптическая развязка, что облегчает разработку стенда и монтаж. Модуль позволяет использовать динамическое и рекуперативное торможения. Рабочий диапазон температур модуля составляет $-20\dots+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Высококачественное регулирование электроприводов связано с использованием сложных алгоритмов цифрового управления в режиме реального времени, высокой точностью и скоростью обработки сигналов. Задача может усложниться при введении сопутствующих задач защиты, сигнализации или управления несколькими электродвигателями. Специально для решения задач, связанных с электроприводом, многие ведущие производители, такие как Intel, Texas Instruments, Motorola, Analog Devices и др. разработали специализированные серии микроконтроллеров под названием Motor Control или Motion Control. Однако при дальнейшем развитии микропроцессорной техники стали использовать сигнальные процессоры (DSP), на кристалл которых интегрировали специализированную периферию Motor Control, что позволило сделать резкий скачок в производительности.

Рассмотрев предложения на рынке, был выбран 32-разрядный микроконтроллер серии TMS320C28xx Piccolo™ от компании Texas Instruments*. Общими достоинствами всей серии являются:

- исключение функциональной избыточности и гибкая адаптация к конкретной задаче пользователя, реализуется за счет широкой номенклатуры изделий с различными объемами памяти и наборами периферийных устройств (более 30 конфигураций микроконтроллеров);
- рост интеграции элементов в серии Piccolo™ привел к снижению количества выводов на корпусе микроконтроллера со 144 (минимальное 64) до 80 (минимальное 38), как следствие, упрощение платы микроконтроллера (появляется возможность реализации двухслойных печатных плат вместо сложных многослойных);
- широкий рабочий диапазон температур ($-40\dots105/125\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- использование сопроцессора с плавающей точкой, названного акселератором задач управления реальным временем, работающего независимо и автономно от центрального процессора с фиксированной точкой и имеющего собственную память команд и данных, а также свою собственную систему команд;
- тактовая частота снижена по сравнению с предыдущими сериями со 150 до 60/40 МГц;
- универсальный ШИМ-генератор ан 14 каналов, с возможностью как скалярного, так и векторного ШИМ регулирования;
- питание микроконтроллера может осуществляться за счет одного внешнего источника питания 3,3 В;
- микроконтроллеры серии TMS320C28xx поддерживают язык программирования C++ (в отличие от предыдущих 16-ти разрядных микроконтроллеров), что в итоге упрощает отладку и настройку микроконтроллера.

Высокая производительность серии TMS320C28xx позволяет реализовать даже на одном микроконтроллере управление двумя электродвигателями. В общем, структура микроконтроллера объединяет в себе 32-разрядный ЦПУ, 12-разрядное АЦП (до 4,6 млн выборок в секунду), два встроенных тактовых генератора, которые исключают необходимость подключения внешних кварцевых резонаторов, ОЗУ, flash-память, компаратор, ШИМ-контроллер, устройства ввода вывода.

Учебный стенд, спроектированный с учетом современных разработок и тенденций в области регулируемого электропривода, позволит освоить возможности высокоточного управления электромеханическими системами.

* TI's Piccolo™ MCUs <http://www.ti.com/corp/docs/landing/f280xx-piccolo>.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА КАК ЦЕПИ МАРКОВА

КОРЮКОВ А. А., КАРЯКИН А. Л.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Идентификация технологических состояний экскаватора актуальна для построения адаптивных и интеллектуальных систем управления электромеханическими комплексами экскаватора и технической реализации информационных систем. Такая идентификация осуществляется на основе анализа значений выходных координат взаимосвязанных электромеханических систем главных электроприводов экскаватора. Задача распознавания заключается в том, чтобы правильно отнести наблюдаемый на входе системы распознавания образ ω , представленный вектором признаков x_ω к одному классу из конечного множества $\Omega = \{\Omega_1, \dots, \Omega_M\}$, называемого алфавитом классов. В данном случае алфавит классов будут составлять технологические состояния экскаватора, которые должна идентифицировать система распознавания.

Построение алгоритмов распознавания может быть основано на результатах теории статистических решений. Идея этого подхода заключается в минимизации риска, связанного с решением задачи распознавания. Для вычисления риска задаются платежной матрицей C размерами $M \times M$, элемент c_{mn} которой равен потерям, связанным с тем, что наблюдаемый образ отнесен к классу Ω_n , а в действительности принадлежит классу Ω_m . В нашем случае система идентификации осуществляет многократное распознавание образов в условиях неизменного признакового пространства и неизменной платежной матрицы, поэтому целесообразно применение критерия Байеса [1]. В соответствии с этой стратегией, признаковое пространство необходимо разбить таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение среднего риска. На практике, с этой целью, для каждого класса из алфавита классов Ω вычисляют значение риска, связанного с отнесением наблюдаемого образа ω к этому классу

$$R(\omega \in \Omega_n | x_\omega) = \sum_{m=1}^M c_{mn} P(\omega \in \Omega_m | x_\omega), \quad (1)$$

где M – мощность алфавита классов; c_{mn} – элемент платежной матрицы C ; $P(\omega \in \Omega_m | x_\omega)$ – апостериорная вероятность того, что ω принадлежит к классу Ω_m для соответствующего набора признаков x_ω .

Решение об отнесении распознаваемого образа к некоторому классу формулируется следующим образом:

$$\omega \in \Omega_n \Leftrightarrow R(\omega \in \Omega_n | x_\omega) = \min_{\Omega_m \in \Omega} R(\omega \in \Omega_m | x_\omega). \quad (2)$$

Чтобы вычислить апостериорную вероятность для каждого класса, входящую в выражение (1), необходимо описать классы условными плотностями распределения вероятностей значений элементов вектора признаков для каждого класса из алфавита Ω , а также априорными вероятностями появления объектов соответствующего класса. В этом случае, апостериорная вероятность принадлежности наблюдаемого образа некоторому классу для соответствующего вектора признаков определяется по формуле Байеса [4]:

$$P(\omega \in \Omega_n | x_\omega) = P(\Omega_n) f_n(x_\omega) / \sum_{m=1}^M P(\Omega_m) f_m(x_\omega), \quad (3)$$

где $P(\Omega_m)$, $P(\Omega_n)$ – априорные вероятности появления образов из классов Ω_m и Ω_n соответственно; $f_m(x_\omega)$, $f_n(x_\omega)$ – функции плотности распределения вероятностей значений вектора признаков x_ω для классов Ω_m и Ω_n соответственно.

Оценку функций плотности распределения вероятностей получают непараметрическими методами оценивания [2]. Априорную вероятность появления образа из соответствующего класса обычно рассматривают как частоту появления этих классов, т. е. как вероятность того,

что случайно выбранный образ относится к этому классу. Однако следует заметить, что технологические состояния экскаватора сменяют друг друга в определенном порядке. Это обстоятельство говорит о том, что точность идентификации можно повысить, учитывая предысторию событий. Поэтому работу одноковшового экскаватора следует рассмотреть как цепь Маркова.

Определение технологического состояния экскаватора может определяться через равные промежутки времени, в таком случае работу одноковшового экскаватора следует рассматривать как цепь Маркова с дискретным временем. Состояния цепи Маркова в рассматриваемом случае соответствуют классам из алфавита Ω , более того, множество всех состояний цепи также равно Ω . Такая цепь описывается двумя параметрами: вероятностным распределением λ и матрицей перехода P [3].

Распределение λ представляет собой стохастический вектор размерами $1 \times M$, элементами которого являются вероятности того, что цепь находится в соответствующем состоянии. В силу того, что множество состояний есть Ω , элементы начального вектора вероятностного распределения равны апостериорным вероятностям принадлежности наблюдаемого образа соответствующему классу, вычисленным на последнем шаге:

$$\lambda_t = [P(\omega \in \Omega_1 | x_{\omega_t}) \dots P(\omega \in \Omega_M | x_{\omega_t})]. \quad (4)$$

Переходная матрица P имеет размеры $M \times M$ и также является стохастической (каждая строка представляет собой стохастический вектор). Элемент переходной матрицы P_{mn} равен условной вероятности того, что система перейдет из состояния Ω_n в состояние Ω_m . Эти вероятности можно определить как частоту соответствующих переходов цепи. Согласно [3], вероятность того, что на следующем шаге система перейдет в состояние Ω_m равна соответствующему элементу вектора произведения начального вектора вероятностного распределения λ_t и переходной матрицы P :

$$P(\omega_{t+1} \in \Omega_m) = (\lambda_t P)_m. \quad (5)$$

Эта величина и есть априорная вероятность того, что на следующем шаге система перейдет в состояние Ω_m . Таким образом, с учетом формулы (5) выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$P(\omega \in \Omega_n | x_{\omega_t}) = (\lambda_{t-1} P)_n \cdot f_n(x_{\omega_t}) / \sum_{m=1}^M (\lambda_{t-1} P)_m \cdot f_m(x_{\omega_t}). \quad (6)$$

Чтобы окончательно перейти к векторно-матричной форме описания, введем функциональную диагональную матрицу F размерами $M \times M$, на главной диагонали которой записаны функции распределения плотности вероятности вектора признаков x_{ω} для каждого класса из алфавита Ω . Тогда, объединяя выражения (4) и (6), найдем вектор вероятностного распределения классов на текущем шаге:

$$\lambda_t = \lambda_{t-1} P F(x_{\omega_t}) / \sum_{m=1}^M (\lambda_{t-1} P F(x_{\omega_t}))_m. \quad (7)$$

В результате получаем систему распознавания образов, учитывающую вероятности принадлежности наблюдаемого на предыдущем шаге образа к рассматриваемым классам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1989.
2. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
3. Кельберт М. Я., Сухов В. М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. – М.: МЦНМО, 2009.
4. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 2: Пер. с англ. / под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, С. А. Айвазяна, Ю. Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1990.

АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

ОСИПОВ П. А., КАРЯКИН А. Л.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Идентификация вектора состояния электропривода карьерного экскаватора производится с целью измерения веса горной массы в ковше. Информация о весе горной массы повышает точность загрузки горного транспорта и исключает операцию контрольного взвешивания. Электропривод подъема выполнен на основе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АД), питаемого от автономного инвертора напряжения (АИН), управляемого током, с векторной системой управления по потокосцеплению ротора. Данная схема электропривода подъема является наиболее перспективной для карьерного экскаватора, благодаря высоким показателям точности регулирования и надёжности.

Для измерения веса горной массы решаются задачи вычисления электромагнитного момента электропривода подъема, создания расчётной схемы рабочего оборудования карьерного экскаватора и выделения статической составляющей электромагнитного момента электропривода подъема.

Задача вычисления электромагнитного момента сводится к выбору математического описания электромагнитных процессов, происходящих в электрической машине. Математическое описание в виде схемы замещения не учитывает электромагнитные переходные процессы, в отличие от способа представления трехфазной системы в виде пространственного вектора в различных системах координат. Поэтому, в целях повышения точности вычисления электромагнитного момента, математическое описание асинхронного двигателя выполняется в пространственных векторах. Вводятся допущения о симметричности трёхфазной системы, синусоидальности распределения по окружности воздушного зазора магнитодвижущих сил обмоток и линейности характеристики намагничивания машины.

При ориентации оси вещественных чисел α по вектору потокосцепления ротора выражение для расчёта электромагнитного момента упрощается, так как $\psi_{2\beta} = 0$. Наличие перекрёстных связей усложняет вычисление проекций тока статора на оси α - β . Питание АД от АИН, управляемого током, является эффективным способом исключения влияния перекрёстных связей [3].

В таком случае, электромагнитный момент рассчитывается следующим способом:

$$\begin{aligned} i_{1x} &= \frac{2}{3} \left[i_{1A} - \frac{1}{2} (i_{1B} - i_{1C}) \right] = i_{1A} ; & i_{1y} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{1B} - i_{1C}) ; \\ i_{1\alpha} &= i_{1x} \cos \theta_C + i_{1y} \sin \theta_C ; & i_{1\beta} &= -i_{1x} \sin \theta_C + i_{1y} \cos \theta_C ; \\ \psi_2 &= \frac{L_m}{T_2 p + 1} i_{1\alpha} ; & \omega_p &= \frac{k_2 R_2 i_{1\beta}}{\psi_2} = \frac{L_m i_{1\beta}}{T_2 \psi_2} ; \\ \theta_C &= \int_0^t \omega_{0\text{эл.}} dt = \int_0^t (\omega_{p\Pi} + \omega_p) dt ; & M_{\text{ЭМ}} &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{T_2 p + 1} p_{\Pi} k_2 i_{1\alpha} i_{1\beta}, \end{aligned}$$

где $T_2 = L_2/R_2$ и $k_2 = L_m/L_2$.

В итоге получен способ расчёта электромагнитного момента АД с векторной системой управления по потокосцеплению ротора и компенсации перекрёстных связей, в котором используются только измерительные каналы системы управления.

Рассмотрим расчётную схему механического оборудования карьерного экскаватора прямой механической лопаты с речным напором. Выражение для расчета веса горной массы в ковше экскаватора состоит из двух слагаемых и может быть представлено в виде [2] $G_{por} = k_1(l_p, l_r)F - k_2(l_p, l_r, G_r, G_p, G_k)$, где k_1, k_2 – коэффициенты, учитывающие изменение усилия в подъемном канате в зависимости от координат ковша в плоскости стрелы экскаватора.

Следовательно, вес породы в ковше можно измерить, вычислив натяжение подъёмного каната, пропорциональное статической составляющей электромагнитного момента электропривода подъема.

Рассмотрим один из возможных методов решения задачи выделения статической составляющей электромагнитного момента электропривода подъема. Механическая часть электропривода представляется в виде одномассовой системы, и принимается допущение о постоянной скорости изменения момента нагрузки на интервале измерения. Согласно [1], интервал оценки разбивается на три равных подынтервала, в течение которых вычисляются средние значения электромагнитных моментов ($M_{эм12}$, $M_{эм23}$, $M_{эм34}$) и мгновенные значения скорости на границах подынтервалов (ω_{r1} , ω_{r2} , ω_{r3}). Производится проверка условия идентифицируемости J на интервале измерения $|\omega_{r3} - 2\omega_{r2} + \omega_{r1}| > \omega_{r\min}$, где $\omega_{r\min}$ – минимальное значение скорости, регистрируемое с заданной точностью (относительная погрешность измерения 3-5 %).

Вычисляется оценка момента инерции, момента статического сопротивления, скорости в конце третьего подынтервала и обобщенного показателя точности вычислений:

$$a_1 = \omega_{r3} - \omega_{r2}; \quad a_2 = \omega_{r2} - \omega_{r1}; \quad a = a_1 - a_2; \quad b = M_{эм23} - M_{эм12}; \quad c = \frac{b}{a};$$

$$\hat{J} = c \cdot T; \quad \hat{M}_c = M_{эм2} - c \cdot a_1; \quad \hat{\omega}_{r4} = \omega_{r3} + \frac{(M_{эм34} - \hat{M}_c)}{c};$$

$$\delta\omega = \begin{cases} \left| \frac{\hat{\omega}_{r4} - \omega_{r4}}{\omega_{r4} - \omega_{r3}} \right|, & \text{если } \omega_{r4} - \omega_{r3} \neq 0; \\ \delta\omega_{\max}, & \text{если } \omega_{r4} - \omega_{r3} = 0, \end{cases}$$

где T – продолжительность подынтервала оценки момента инерции.

Полученная оценка момента инерции ограничивается в пределах минимального и максимального значений и фильтруется с помощью дискретного фильтра Калмана первого порядка $\hat{J}_f = (1 - k_f)\hat{J}_{f0} + k_f\hat{J}$, где \hat{J}_f , \hat{J}_{f0} – выходные сигналы фильтра на текущем и предыдущем циклах вычисления; $k_f \in [0..1]$ – весовой коэффициент фильтра, являющийся функцией обобщенного показателя точности вычислений. Ограничение относительной ошибки фильтра может быть достигнуто применением обратно пропорциональной зависимости между k_f и $\delta\omega$ и выбором значения константы $k_f \cdot \delta\omega$ в диапазоне от [0,002...0,02] для любого типа привода [1].

Рассмотренный алгоритм оценки момента нагрузки работает без использования тестового сигнала и позволяет идентифицировать момент нагрузки в динамических режимах работы привода, вызванных изменением задания по скорости.

В результате, решение поставленных задач позволяет идентифицировать вектор состояния электропривода переменного тока подъема ковша и измерить вес горной массы в ковше. При этом возникает ряд задач выбора настроек фильтров каналов измерения скорости, электромагнитного момента и статической составляющей электромагнитного момента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
2. Карякин А. Л. Определение усилий в элементах рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов // 9 Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сборник научных трудов, г. Нижний Новгород, 22-28 августа 2006 г. – Н. Новгород, 2006. С. 245.
3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ГИЗАТУЛЛИН А. Х., САФИН Н. Р.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Почти вся электроэнергия на Земле – это энергия, вырабатываемая на электростанциях синхронными генераторами. В конструктивном исполнении синхронные машины делятся на явно- и неявнополюсные. Быстроходные машины выполняются с неявнополюсным ротором, а тихоходные – с явнополюсным. Синхронные машины могут работать в режимах генератора, двигателя и синхронного компенсатора. Наиболее распространенный режим работы синхронной машины – генераторный. В синхронных машинах в установившихся режимах частота вращения ротора ω_p равняется частоте вращения поля ω_c . При $\omega_p = \omega_c$ частота тока в роторе $f_2 = 0$. В обмотке возбуждения, обычно расположенной на роторе, протекает постоянный ток.

Модель синхронной машины на основе векторной формы. В синхронной машине возможны качания, когда угловая скорость при постоянной нагрузке и постоянном напряжении колеблется относительно установившейся скорости. Обычно частота качаний на порядок или два порядка ниже частоты сети и определяется параметрами синхронной машины, чтобы уменьшить амплитуду и частоту качаний, в синхронные машины вводят демпферную обмотку. При анализе процессов преобразования энергии в синхронных машинах, как и в других ЭП, рассматривают заторможенную машину с приведенными обмотками. Если машина симметричная, то целесообразно для снижения числа уравнений трехфазную машину привести к двухфазной. Синхронные явно- и неявнополюсные машины при анализе следует рассматривать как многообмоточные и учитывать наличие обмоток якоря, возбуждения и демпферной обмотки. В простейшем случае синхронная машина – трехобмоточная машина. Уравнения синхронной машины принято записывать для системы координат d, q , связанной с обмотками ротора. Для машины с приведенными обмотками записываются следующие уравнения [2]:

$$\begin{aligned} u_d &= d\Psi_d / dt + \Psi_q \omega_r + r_a i_d; \\ u_q &= d\Psi_q / dt - \Psi_d \omega_r + r_a i_q; \\ u_f &= d\Psi_f / dt + r_f i_f; \\ 0 &= d\Psi_{Dd} / dt + r_{Dd} i_{Dd}; \\ 0 &= d\Psi_{Dq} / dt + r_{Dq} i_{Dq}. \end{aligned} \quad (1)$$

где r_a, r_f, r_{Dd} и r_{Dq} – активные сопротивления соответственно обмоток якоря, возбуждения, а также демпферной обмотки в продольной и поперечной осях; u_d, u_q, u_f – соответственно напряжение обмотки якоря в продольной и поперечной осях и обмотки возбуждения. Потокосцепления обмоток [2]:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_f + M_{ad} i_{Dd}; \\ \Psi_q &= L_q i_q + M_{aq} i_{Dq}; \\ \Psi_f &= L_f i_f + M_{ad} i_d + M_{ad} i_{Dd}; \\ \Psi_{Dd} &= L_{Dd} i_{Dd} + M_{ad} i_d + M_{ad} i_f; \\ \Psi_{Dq} &= L_{Dq} i_{Dq} + M_{aq} i_q. \end{aligned} \quad (2)$$

где $L_d, L_q, L_f, L_{Dd}, L_{Dq}$ – соответственно индуктивности обмоток якоря, обмотки возбуждения и демпферной обмотки по осям d и q ; M_{ad} и M_{aq} – взаимные индуктивности обмоток по осям d и q . При этом предполагается, что взаимные индуктивности обмоток, расположенных в одной оси, одинаково, а индуктивности рассеяния обмоток – различны.

Электромагнитный момент определяется через токи и потокосцепления или через токи [2]

$$M_{\vartheta} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d,$$

$$M_{\vartheta} = M(i_f i_q + i_q i_{Dd} - i_d i_{Dq}).$$

Последнее равенство составлено для неявнополюсной машины. Для явнополюсной машины добавляется составляющая, учитывающая различие проводимостей по осям d и q .

В установившемся режиме электромагнитная мощность явнополюсной машины [2] $P_{\vartheta} = UE / X_d \sin \theta + U^2 / 2(1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta$, где θ – угол нагрузки.

При анализе статической и динамической устойчивости параллельной работы синхронных машин широко используется линеаризация уравнений. При этом рассматриваются режимы малых колебаний, приращения переменных считаются линейными. Исследование статической устойчивости на основе малых гармонических возмущений оправдано, так как в таких задачах необходимо учитывать параметры линии и других электрических машин и трансформаторов, работающих в одной сети с рассматриваемой синхронной машиной. Для анализа динамики синхронных машин имеет важное значение исследование сложных переходных процессов при неправильной синхронизации, повторном включении, исследование крутильных колебаний валопроводов мощных агрегатов.

Модели на основе передаточных функций. Динамика синхронной машины в первом приближении описывается системой [1]:

$$(1 + T_{\vartheta} p)M = \beta(\omega_0 - \omega_1);$$

$$M - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c1} = J_1 p \omega_1;$$

$$c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c2} = J_2 p \omega_2.$$

Передаточная функция электропривода, где выходной параметр – скорость, а входной – момент нагрузки M_c [1]:

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = - \frac{p}{\beta(T_M p^2 + p + T_M \Omega_{CB}^2)}.$$

Передаточная функция генератора для вращающего момента [1]:

$$W_M(p) = M(p) / M_{BP}(p) = -(p + T_M \Omega_{CB}^2) / (T_M p^2 + p + T_M \Omega_{CB}^2).$$

С учетом электромагнитной инерции имеет место более сложная форма характеристик динамической жесткости. Основные особенности динамического взаимодействия синхронного двигателя с приводимой механической системой можно проанализировать с помощью коэффициента $\beta = -(\beta + b/p)$.

Передаточная функция для скорости по возмущающему воздействию [1]

$$W_{\omega}(p) = - \frac{p(T_{\vartheta} p + 1)}{T_{\vartheta} J_{\Sigma} p^3 + J_{\Sigma} p^2 + (\beta + b T_{\vartheta}) p + b}.$$

В работе определены основные методы моделирования синхронных генераторов. Получены основные уравнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
2. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

САФИН Н. Р., ГИЗАТУЛЛИН А. Х.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Все множество электроприемников предприятий и организаций по своему функциональному назначению принято делить на четыре группы: электропривод, электротехнологические установки, электрическое освещение, устройства управления и обработки информации. Первые две группы принято называть силовыми электроприемниками.

При расчетах режимных параметров сетей в первую очередь составляются схемы замещения и определяются их параметры. При этом магнитные связи заменяются электрическими. Существуют следующие виды схем замещения: а) с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, принимаемой за основную или базисную ступень; б) с сохранением трансформаторных связей между различными ступенями напряжения.

В зависимости от рассматриваемого режима, источники электроэнергии, в качестве которых выступают синхронные генераторы, в схемы замещения вводятся с соответствующими значениями их электродвижущих сил и сопротивления. При рассмотрении установившихся режимов синхронные генераторы и компенсаторы учитывают в схемах их замещения с помощью электродвижущих сил холостого хода E_{q0} и синхронной реактивности по продольной оси X_d [2]:

$$E_{q0} = \sqrt{(U_{Г0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{Г0} \cdot \sin \varphi_0 + I_0 \cdot X_d)^2}, \quad (1)$$

где φ_0 – угол между векторами напряжения $U_{Г0}$ и тока I_0 , который находится по формуле:

$$\varphi_0 = \arctg (Q_{\text{нар}} / P_{\text{нар}}). \quad (2)$$

В общем случае кабельные и воздушные линии, а также токопроводы в схемах замещений часто представляют в виде П-образных четырехполюсников. Активные проводимости $G_{\text{л}}$ обусловлены несовершенством изоляции фаз, а емкостные $B_{\text{л}}$ тем, что фазный провод и земля (оболочка кабеля) представляют собой обкладки конденсатора. Численные значения элементов схемы замещения вычисляются по формулам [2]:

$$X_{\text{л}} = X_{\text{уд}} \cdot l; \quad R_{\text{л}} = R_{\text{уд}} \cdot l; \quad B_{\text{л}} = B_{\text{уд}} \cdot l; \quad G_{\text{л}} = G_{\text{уд}} \cdot l, \quad (3)$$

где $R_{\text{уд}}$ и $X_{\text{уд}}$ – удельная активная и реактивная сопротивления линии, Ом/км; $G_{\text{уд}}$ и $B_{\text{уд}}$ – удельная активная и емкостная проводимости линии, 1/Ом·км; l – длина линии, км. Значения удельных сопротивлений и проводимостей приводятся в справочной литературе в зависимости от материала проводника и конструктивных параметров линии.

Рассмотрим математические модели нагрузки. Нагрузки являются нелинейными и динамичными элементами. Нелинейность выражается в том, что мощность нагрузки в установившемся режиме зависит от тока и напряжения во второй степени; динамика выражается в том, что новое установившееся состояние нагрузки наступает после определенного времени, что может иметь существенное влияние на протекание неустановившегося режима в энергосистеме. К динамическим характеристикам нагрузки относят электродвигатели (прежде всего, асинхронные), они обычно составляют большую часть мощности нагрузки узла энергосистемы. Изменение напряжения и частоты вызывают изменение скольжения этих электродвигателей и частоты вращения их роторов и приводимых ими в движение механизмов. В соответствии с моментной характеристикой новый стационарный режим устанавливается только через определенное время. Семейства характеристик $p(U)$, $q(U)$, $p(\varphi)$, $q(\varphi)$, параметром которых является время, называются динамическими характеристиками нагрузки.

Математическая модель асинхронного двигателя для системных расчетов. Неустановившиеся режимы в цепях двигателя описывает система дифференциальных и

алгебраических уравнений. Если активные сопротивления обмоток статора перенести во внешнюю сеть, то получится система уравнений [1]

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\psi_q; \quad u_q = \psi_d; \\ R_r i_D + \frac{d}{dt} \psi_D + s \psi_Q &= 0; \\ R_r i_Q + \frac{d}{dt} \psi_Q - s \psi_D &= 0; \\ \psi_d &= X_S i_d + X_\mu i_D; \\ \psi_q &= X_r i_q + X_\mu i_Q; \\ \psi_D &= X_\mu i_d + X_r i_D; \\ \psi_Q &= X_\mu i_q + X_r i_Q, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $X_{aq}=X_{ad}=X_\mu$; $X_D=X_Q=X_r$; $s=\Delta\omega/\omega$ – скольжение вращающегося поля относительно ротора, следовательно, $s>0$; направление токов и напряжений отдельных контуров соответствует двигательному режиму работы.

Вводя обозначение $e_q = \psi_D X_\mu X_r^{-1}$, $e_d = -\psi_Q X_\mu X_r^{-1}$ и исключая токи i_D, i_Q ротора, получаем [1] $\frac{d}{dt} e_q = a e_q + s e_d + b i_d$; $\frac{d}{dt} e_d = a e_d - s e_q - b i_q$.

Перейдем к переходным электродвижущим силам и токам статора с частотой сети E_d, E_q, I_d, I_q . Поскольку их действительные и мнимые составляющие E', E'', I', I'' с учетом направления осей приведения сети равны им, так как система осей d, q связана с вращающимся полем, а не с ротором, то уравнения можно записать сразу в сетевых координатах [1]:

$$\frac{d}{dt} E' = a E' + s E'' + b I''; \quad \frac{d}{dt} E'' = s E'' + a E' - b I', \quad (5)$$

где $E = E' + j E''$; $a = -R_r/X_r$; $b = R_r X_\mu^2/X_r^2$; все величины – в номинальных относительных единицах электродвигателя. Время t здесь также выражено в относительных единицах, $t_0 = \omega^{-1}_{ном}$; при численном интегрировании правые стороны следует умножать на $\omega_{ном} = 314$.

Исключение ψ_d и ψ_q из двух первых уравнений (4) дает зависимости [1]: $E' - U' = -X' I''$; $E'' - U'' = X' I'$; $X' = X_S - X_\mu^2 X_r^{-1}$ – сопротивления рассеяния двигателя. Поскольку система уравнений (5) не содержит напряжения U , сопротивление X можно включить в модель сети. Уравнения (5) дополняются уравнением движения ротора электродвигателя и приводимого им механизма с учетом изменения момента последнего в функции угловой скорости [1] $\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} [P^* - P_0^* (1 + \varphi + s_0 - s)^{\beta+1}]$, где t – время, с; T – механическая постоянная времени ротора электродвигателя и приводимого механизма, с; P^*, P_0^* – электрическая мощность в относительных единицах, потребляемая электродвигателем в произвольный момент времени и в режиме перед повреждением, при $P_0^* = P_{ном}$ электродвигателя; s_0, s – скольжение магнитного поля ротора электродвигателя в исходном и аварийном режимах $s>0$; β – показатель степени зависимости тормозного момента от частоты вращения; φ – относительное изменение частоты.

Таким образом, описаны основные модели электрических нагрузок и математическое описание, которые позволяют решать задачи выбора элементов системы электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернас С., Цёк З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польского Э. В. Турского, Н. Н. Шелухина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с., ил.
2. Электротехника: учеб. пособие для вузов. – В 3-х книгах. Книга III. Электроприводы. Электроснабжение / под ред. П. А. Бутырина и др. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 639 с.

АЛГОРИТМ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ РУД

КОПЫТОВ К. О., КИРИЛЛОВ Р. С.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Основной проблемой в обогащении кварцевых руд является повышение качества минерального сырья и уменьшение затрат на единицу конечной продукции. Наиболее перспективным направлением в этой области является введение в цепочку «добыча – переработка» стадии предварительной концентрации с применением фотометрических методов обогащения.

С развитием цифровой фототехники и компьютерных технологий эта задача стала технически выполнима: наличие скоростных видеокамер, возможность передачи данных в масштабе реального времени, мощные компьютеры – все это делает возможным усовершенствование процесса обогащения. Пожалуй, единственное затруднение возникает с разработкой «быстрых» алгоритмов распознавания.

В наибольшей степени исследованы следующие методы распознавания образов [1]: детерминистские, вероятностные, логические, структурные и комбинированные.

Данную задачу распознавания можно решить с помощью быстрых алгоритмов классификации и распознавания образов на основе цифровых согласованных фильтров [2] или используя критерий Байеса [1] для построения алгоритмов. Или используя такие же алгоритмы, как для распознавания текста [3]. Но не один из этих методов не может обеспечить необходимого быстродействия для решения данной задачи.

Разработанный нами алгоритм распознавания должен обеспечить необходимое быстродействие и эффективное распознавание частиц.

Условно алгоритм можно разделить на пять частей:

- Предварительная обработка изображения;
- Корректировка сжатого изображения;
- Перевод изображения в матрицу;
- Проверка на наличие ошибки;
- Анализ полученной информации и принятие решения.

Предварительная обработка изображения и его корректировка. Монохромное изображение с разрешением 1 пиксель на 1 мм сжимается с помощью решетки. Размер каждой ячейки решетки для сжатия – 3×3 пикселя. Такой размер ячейки является оптимальным для класса крупности +5 мм, из соображения, что частица любой формы этого класса крупности обязательно перекроет собой хотя бы одну ячейку более чем на $3/4$, это наглядно видно на рис. 1. Если частица меньше ячейки (соответственно, ее размер меньше чем 3×3 мм), и ячейка будет перекрыта меньше чем на $3/4$, то такая частица будет проигнорирована.

Проблема нечеткости и размытости частиц, решается заполнением ячеек решетки по выше описанному признаку. Ясно что частица находится в нижней части рис. 2, а это значит, что верхняя заполненная ячейка будет ошибкой. Но с выдержкой исходного изображения $1/200$ с (паспортные данные видеокамеры) изображение пролетающей частицы будет достаточно четким, следовательно, и ошибка распознавания будет мало вероятной.

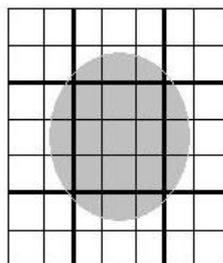


Рис. 1. Часть изображения

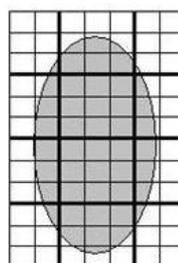


Рис. 2. Нечеткость изображения

Перевод изображения в матрицу и проверка на ошибку. После сжатия изображения с помощью решетки производится перевод монохромного изображения в матрицу, в которой каждому элементу, в зависимости от цвета ячейки сжатого изображения, присваивается значение либо 0, либо 1. Нулю соответствуют белые ячейки, а единице темные, так как при сепарации кварцевых руд основным цветом поступающей руды является белый (кварц), а темные породы (пустая порода) встречаются реже и требуют удаления из поступающей на переработку руды.

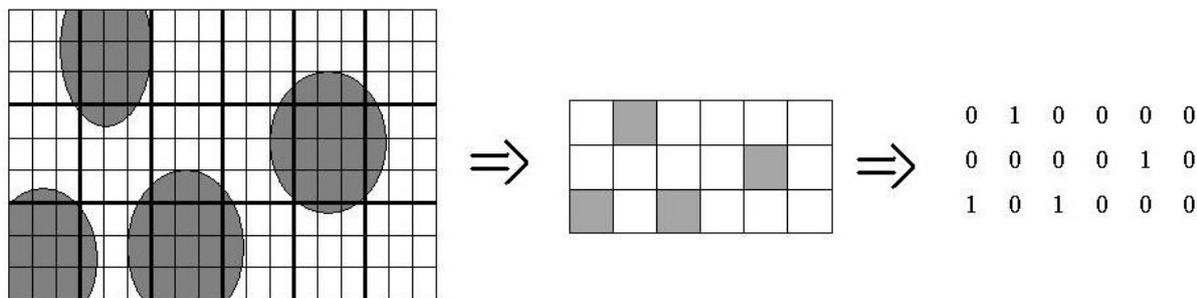


Рис. 3. Перевод изображения в матрицу

Проверка на ошибку осуществляется с помощью сравнения двух матриц А и В, где матрица А – матрица, полученная с первой фотографии каждого нового цикла, матрица В – матрица, полученная с *n*-й фотографии в том же цикле, что и матрица А, путем подведения ее к времени матрицы А. После сравнения, образуя матрицу С, совпавшие элементы остаются без изменения, а элементы с разными значениями приравниваются к нулю.

Анализ полученной информации и принятие решения. Итоговая матрица С, состоящая из единиц и нулей, обрабатывается так, что столбец, в котором находится единица, отвечает за открытие необходимого пневмоклапана, а строка, в которой находится единица, отвечает за время, в которое должен открыться пневмоклапан. Для каждой строки имеется массив таймингов, в соответствии с которым для каждой строки записано свое расчетное время полета частицы до пневмоклапана.

В дальнейшем планируется провести опыты на проверку быстродействия и эффективность данного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1989. – 232 с.
2. Доклады 10-й Всероссийской конференции. ММРО-10. – М., 2001.
3. Фомин Я. А., Савич А. В. Оптимизация распознающих систем. – М.: Машиностроение, 1993. – 288 с.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СЕПАРАЦИИ КВАРЦЕВЫХ РУД

КИРИЛЛОВ Р. С., КОПЫТОВ К. О.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Впервые фотометрические сепараторы появились за рубежом в 60-х годах 20-го столетия. Занималась выпуском фотометрических сепараторов британская фирма «Ganson Sortex Ltd».

Первые фотометрические сепараторы были основаны на базе аналоговой техники. Луч лазера отражался от крутящегося барабана с зеркалами и попадал на ленту конвейера. Отраженный луч шел обратно на барабан с зеркалами и через оптическую систему попадал на фотоприемник. Принятый сигнал обрабатывался аналоговым блоком и через систему задержки воздействовал на отсекаТЕЛЬ [1].

Развитие научно-технического прогресса привело к созданию принципиально новых фотометрических сепараторов. Лента конвейера освещается направленным светом, отраженный свет через оптическую систему попадает на фоточувствительную матрицу (на матрицу фотокамеры). Изображение с фотокамеры поступает на вычислительный блок, в котором производится обработка изображения и принятие решения. В новых сепараторах произошел качественный переход с аналоговой техники на цифровую технику.

Методы проектирования систем фотометрической сортировки разрабатываются дисциплиной технического зрения. В свою очередь, решение задачи технического зрения связано с множеством подзадач: выбор технических средств, обработка изображений, фильтрация, распознавание образов, оптимизация алгоритмов и т. д.

На данный момент нет какой-либо универсальной методики выбора оптимальных технических средств, и для каждой системы оборудование выбирается индивидуально. Для оптимального выбора технических средств необходимо задаться определенными параметрами системы технического зрения.

Исследуемая часть системы фотометрической сортировки руды состоит из пяти основных частей: фотокамера, плата видеозахвата, вычислительный блок, плата дискретного ввода-вывода и исполнительного устройства (отсекателя). Все устройства выбирают, исходя из предъявляемых технических требований к ним. При выборе устройств необходимо также учесть, что они имеют общие интерфейсы передачи данных.

Для определения требований, предъявляемых к фотокамере, необходимо задаться начальными условиями: скорость движения ленты $V_0 = 3$ м/с, ширина лотка питателя $b_n = 0,6$ м, высота установки фотокамеры относительно нижней кромки лотка питателя $h_\phi = 0,3$ м, зададимся минимальной крупностью $d = +5$ мм. Такие характеристики имеют фотометрические сепараторы ведущих западных фирм.

Рассчитаем скорость движения частиц на высоте установки фотокамеры. Скорость движения в произвольный момент времени определяется по формуле $V = V_0 + a \cdot t$, где V_0 – начальная скорость, скорость движения конвейера, м/с; a – ускорение частицы, скорость свободного падения, $9,8$ м/с²; t – момент времени, в который необходимо знать скорость частицы, с.

Запишем формулу определения пройденного пути $S = V \cdot t^{-1}$, где S – путь, пройденный точкой, $S = h_\phi$, м.

Решим систему уравнений

$$\begin{cases} S = \frac{V}{t}, \\ V = V_0 + a \cdot t. \end{cases}$$

Отсюда

$$V^2 - V_0 \cdot V - S \cdot g = 0,$$

$$V = \left(V_0 + \sqrt{V^2 + 4 \cdot S \cdot g} \right) / 2 = \left(3 + \sqrt{3^2 + 4 \cdot 0,3 \cdot 9,81} \right) / 2 = 3,779 \text{ м/с.}$$

Для гарантированного обнаружения полезных частиц необходимо, чтобы размеры одной частицы были не менее $x \times y = 4 \times 4$ пикселей. Для заданных условий найдем связь между пикселем и соответствующим ему физическим размером частицы (пространственное разрешение): $d/3 = 5/3 = 1,7$ мм.

При ширине лотка питателя 600 мм необходимо, чтобы фотокамера имела разрешение не менее $600/1,7=353$ пикселя по горизонтали. В соответствии с этим требованием выбираем ближайшую по разрешению фотокамеру DalsaSpyder 3 1k, которая имеет разрешение 1024 пикселя по горизонтали. При этом один пиксель будет равен $p=600/1024=0,586$ мм. При использовании данной фотокамеры минимальная крупность распознаваемой частицы составит $p \cdot x = 0,586 \cdot 4 = 2,3$ мм.

Для получения непрерывной картинки необходимо сканировать фотокамеру со скоростью $V/p = 3779/0,586 = 6448$ линий в секунду или 6,448 кГц.

Были рассмотрены следующие интерфейсы: Gigabit Ethernet, Wi-Fi (беспроводной интерфейс), Camera Link, FireWire 800 и различные виды аналоговых интерфейсов. Основное требование к интерфейсу – это работа в режиме реального времени. Этому требованию соответствуют два из перечисленных интерфейсов Camera Link и некоторые виды аналоговых интерфейсов.

Был выбран интерфейс Camera Link. Для данного интерфейса существуют специально разработанные платы видеозахвата. Плата вставляется в слот PCI Express, имеет способ подключения «точка-точка», расстояние передачи – не более 10 метров и скорость передачи данных со скоростью до 2,38 Гбит/с (297,5 Мб/с) [2].

Фотокамера имеет 8-битную градацию серого цвета, что соответствует одному байту. При горизонтальном разрешении в 1024 пикселя и при сканировании 6448 линий в секунду получим $1024 \times 6448 \times 1 = 6,6$ Мб/с. Выбранный интерфейс полностью удовлетворяет требованиям.

Оптимально выбрать вычислительный блок довольно сложно. Необходимая производительность вычислительного блока полностью зависит от выбранного алгоритма обработки изображения. Алгоритм обработки изображения включает в себя: прием изображения в буфер, морфологическое фильтрование (расширение), сегментацию, описание и распознавание. Наиболее ресурсоемкими задачами являются задачи сегментации и распознавания. Для гарантированной отработки управляющих сигналов и своевременного расчета алгоритма, производительность вычислительного будет определена экспериментально.

После распознавания объектов сигнал управления, через плату дискретного ввода-вывода, поступает на электропневмоклапаны (отсекатель). Для дискретного ввода-вывода используются платы фирмы «Advantage». Сигналы с платы ввода-вывода поступают через силовые усилители на электропневмоклапаны, которые, в свою очередь, осуществляют механическое воздействие воздухом на отсеиваемые частицы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оператор фотометрических сортировочных установок: справочник рабочего / Б. Н. Кравец, А. В. Белокрылецкий, Ю. Н. Волков и др. – М.: Недра, 1988. – 151 с.
2. National Semiconductor interface Channel-link. TIA/EIA-644 LVDS standart.