

Применение микропроцессоров для автоматизации диагностики и управления техническим состоянием горнопроходческих машин

И.А. Носенко, Ю.С. Курников, С.А. Морозова

Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова

Аннотация: В статье рассмотрен метод автоматизированной диагностики и управления техническим состоянием электропривода горнопроходческих машин, заключающийся в мониторинге тока с последующим спектральным анализом полученного сигнала. Метод позволяет с достаточной точностью определять текущее техническое состояние элементов электропривода. В качестве составляющих элементов диагностического комплекса принят высокопроизводительный RISC-микроконтроллер семейства AVR ATmega16, который содержит в своем составе быстрый Гарвардский процессор, память программ, память данных, порты ввода/вывода и различные интерфейсные схемы.

Ключевые слова: электропривод горнопроходческой машины, автоматизированная диагностика и контроль, мониторинг тока, спектральный анализ, повышение надежности горнопроходческого оборудования, диагностика с применением микропроцессорной элементной базы.

Одним из направлений повышения надежности горнопроходческого оборудования, за счет устранения внезапных отказов и уменьшения тяжести их последствий, рассматривается применение цифровых систем автоматизированного контроля его технического состояния и проведение оперативной онлайн-диагностики с применением микропроцессорной элементной базы [1]. Технологии позволяют получать прямые технико-экономические показатели работоспособности и, после соответствующей обработки результатов, определять косвенные показатели работоспособности [2,3].

К настоящему моменту, в горной промышленности, электродвигатели переменного тока являются главными потребителями электроэнергии. Проведенные исследования в области повреждений элементов электродвигателей показывают, что их распределение по характеру повреждений можно представить следующим образом: повреждения элементов статора – 38%; ротора – 10%; подшипниковых узлов – 40%; остальные повреждения – 12% [Ошибка! Источник ссылки не найден.,4].

Диагностика состояния электропривода проводится на основе данных спектрального анализа тока статорной обмотки хотя бы одной из фаз электродвигателя. Для получения, преобразования и обработки данных необходимо устройство, которое позволило бы осуществлять данные функции.

Цель работы — доказать возможность и обосновать эффективность применения микропроцессорных технологий в горно-шахтной отрасли для автоматизации диагностики узлов техники.

В настоящее время существует большое количество различных программно-аппаратных комплексов, которые используются, но в стандартных промышленных условиях (температура, искробезопасность, запыленность и т.п.). Условия же горной промышленности являются особыми и не представляют собой возможности их использования [6]. Поэтому необходимо спроектировать и создать устройство, которое отвечало бы следующим требованиям: взрывобезопасность; простота монтажа на оборудование и использование; наглядность представления информации; возможность накопления данных для последующего анализа.

Обобщённая функциональная схема проектируемой системы сбора и обработки информации выглядит следующим образом (рис.1). Принцип сбора и обработки информации показан на рис.2.

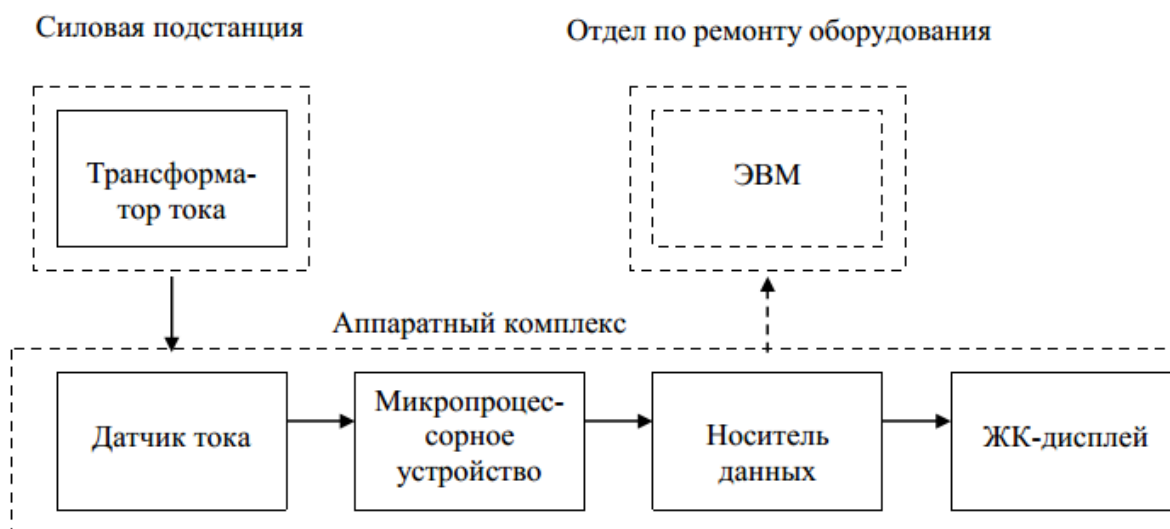


Рис. 1. – Обобщенная функциональная схема проектируемой системы

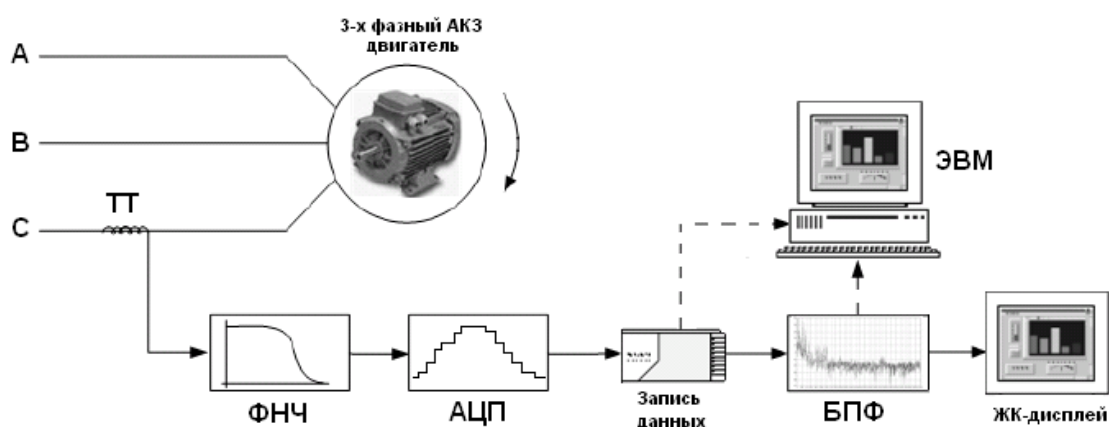


Рис. 2 – Принцип сбора и обработки информации

В момент пуска электродвигателя пусковой ток в обмотке электродвигателя достигает значений порядка 400А. Поэтому к одной из фаз питания электродвигателя (А, В, С) подключается с помощью клемм трансформатор тока (ТТ), на вторичной обмотке которого ток уже достигает допустимых значений в 0,5-1А для его записи с помощью датчика тока, расположенного в корпусе устройства. Полученный сигнал фильтруется с помощью фильтра низких частот (ФНЧ) для фильтрации высокочастотных шумов, наводимых устройствами, подключенными к данной фазе (первичный трансформатор, пускатель и т.д.) и устранения неинформативных составляющих сигнала тока.

При этом параметры фильтра определяются расчетами параметрами информационного сигнала. Затем сигнал оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), и полученные данные записываются определенным образом в память устройства. После этого, к оцифрованному сигналу применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ) и по специальному алгоритму диагностики выдается заключение о состоянии электродвигателя на ЖК-дисплей.

Для устранения неинформативных составляющих сигнала и шумов,

наводимых на информационный сигнал необходимо использовать фильтр низких частот (ФНЧ). Фильтр нижних частот представляет собой устройство, которое пропускает сигналы низких частот и задерживает сигналы высоких частот. Максимальное затухание в децибелах в полосе не должно превышать 3 дБ. Существует много типов фильтров нижних частот, удовлетворяющих данному набору технических требований: фильтры Баттерворта, Чебышева, инверсные Чебышева и эллиптические образуют четыре наиболее известных класса. Фильтр Баттерворта обладает монотонной характеристикой, фильтр Чебышева содержит пульсации (колебания передачи) в полосе пропускания и монотонна в полосе задерживания, а характеристика эллиптического фильтра обладает пульсациями, как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания. Для полиномиальной характеристики оптимальной является характеристика фильтра Чебышева. Также стоит отметить, что для частот, расположенных около точки среза и в полосе задерживания, характеристика фильтра Баттерворта заметно уступает характеристике фильтра Чебышева, что еще раз подтверждает выбор в пользу последнего. Расчет фильтра произведен по классической схеме расчета, исходя из того условия, что, так как обработка всех данных производится в цифровой форме, то, согласно теореме Котельникова, минимальная частота дискретизации должна быть как минимум в два раза больше максимально желаемой частоты в спектре сигнала [7].

Одна из наиболее простых схем активных фильтров, реализующих передаточную функцию нижних частот, называется схемой с многопетлевой обратной связью (МОС) и бесконечным коэффициентом усиления из-за наличия двух путей прохождения сигнала обратной связи, а также, вследствие того, что операционный усилитель (ОУ) в этом случае работает, как прибор с бесконечным коэффициентом усиления.

Для проведения диагностического анализа необходимо обеспечить

измерение тока нагрузки электродвигателя в диапазоне от 0 до 500А. Так как одной из особенностей метода спектрального анализа тока является возможность удаленного получения данных, то измерения можно проводить как на силовой подстанции с помощью специального трансформатора тока, подключенного к одной из фаз питания исследуемого электродвигателя, так и на станции управления [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**,8]. Свой выбор остановим на разборных трансформаторах тока TAR, предназначенных для быстрого монтажа и облегчения их установки, а также не дают искажений (находятся в диапазоне ± 3 dB) в диапазоне частот 0-20000 Гц. Эти трансформаторы тока имеют разъемную обмотку, которая позволяет защелкивать его на шине и кабеле без трудоемкой разборки шинпровода.

В качестве основы устройства был выбран высокопроизводительный RISC-микроконтроллер семейства AVR ATmega16 компании Atmel, который имеет в своем составе быстрый Гарвардский процессор, память программ, память данных, порты ввода/вывода и различные интерфейсные схемы. Гарвардская архитектура AVR реализует полное логическое и физическое разделение не только адресных пространств, но и информационных шин для обращения к памяти программ и к памяти данных, причем способы адресации и доступа к этим массивам памяти также различны. Подобное построение уже ближе к структуре цифровых сигнальных процессоров и обеспечивает существенное повышение производительности. Центральный процессор работает одновременно как с памятью программ, так и с памятью данных; разрядность шины памяти программ – до 16 бит. В микроконтроллерах AVR тоже используется одноуровневый конвейер при обращении к памяти программ и короткая команда в общем потоке выполняется за один машинный цикл, причем в отличие от других контроллеров в том, что этот цикл занимает всего один период тактовой частоты.

Как было отмечено, одним из важных и необходимых свойств, используемого в устройстве микроконтроллера, это наличие в его составе 10-ти разрядного АЦП. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) построен по классической схеме последовательных приближений с устройством выборки/хранения (УВХ). Каждый из аналоговых входов может быть соединен со входом УВХ через аналоговый мультиплексор. Устройство выборки/хранения имеет свой собственный усилитель, гарантирующий, что измеряемый аналоговый сигнал будет стабильным в течение всего времени преобразования. АЦП может работать в двух режимах: однократное преобразование по любому выбранному каналу и последовательный циклический опрос всех каналов. Время преобразования выбирается программно с помощью установки коэффициента деления частоты специального предделителя, входящего в состав блока АЦП, и заключается в диапазоне от 13 до 260 мкс. В качестве внутреннего опорного напряжения может выступать напряжение от внутреннего источника на 2,56В или внешний источник опорного напряжения.

Как и любой преобразователь, рассматриваемый АЦП имеет погрешность преобразования. Его абсолютная погрешность, максимальное отклонение реальной (без подстройки) функции преобразования от реальной при любом коде, является результатом действия нескольких эффектов: смещение, погрешность усиления, дифференциальная погрешность, нелинейность и погрешность квантования и составляет $\pm 0,5$ младшего разряда.

В качестве источника опорного напряжения проектируемого микропроцессорного устройства используется микросхема MAX6125, технические характеристики которой удовлетворяют условиям технического задания.

В качестве накопителя оцифрованной информации будем использовать

Flash-накопитель компании Atmel DataFlash. Микросхема AT45DB161B является 2,7В Flash-памятью с последовательным интерфейсом. Она идеально подходит для широкого спектра цифровых голосовых приложений, приложений визуализации, и приложений хранения программного кода и данных. 2Мб памяти данной ИС организованы в 4096 страниц по 528 байт каждая. Кроме памяти общего назначения ИС также имеет два SRAM буфера данных по 528 байт. Буферы обеспечивают возможность приема данных в режиме перепрограммирования страницы основной памяти, или считывание, или запись непрерывных потоков данных. Режим эмуляции EEPROM (с побитным или побайтным изменением) прост в применении, благодаря встроенной, трехступенчатой системе команд Read - Modify - Write. В отличие от стандартных типов Flash-памяти, обращение к которым происходит произвольным образом в режиме многочисленных адресных строк и при помощи параллельного интерфейса, память типа DataFlash использует последовательный интерфейс для обращения к своим данным в режиме последовательного доступа.

Напряжение питания микросхемы Flash-памяти AT45DB161B должно находится между 2,7В и 3,6В для корректной работы, и выход за пределы указанных значений может привести к неправильной работе устройства либо его повреждению.

Входы AT45DB161B выдерживают 5-вольтовые уровни и не представляют проблему. Что касается выхода микросхемы, то для решения этой задачи воспользуемся преобразователем уровня MAX3370 для смещения уровня низковольтного выхода AT45DB161B к более высокому уровню напряжения (V_{IH}) входа 5-вольтовой КМОП-схемы.

Для решения задачи стабилизации питания Flash-носителя воспользуемся DC-DC преобразователем P6AU-053R3E фирмы PEAK Electronics, который представляет собой небольшую микросхему в SIP-

корпусе и формирует необходимое напряжение 3,3В из 5В.

Для отображения количества записанной информации, количества оставшегося места на DataFlash и времени записи, а также для дальнейшей возможности отображения различной необходимой информации, в устройстве используется ЖК-индикатор.

Несмотря на то, что производителей ЖК-индикаторов со встроенными контроллерами имеется большое количество на рынке радиоэлектроники, промышленным стандартом является контроллер HD44780 фирмы Hitachi. Именно его аналогом является контроллер выбранного нами модуля компании МЭЛТ МТ-16S2Q.

Жидкокристаллический модуль МТ-16S2Q состоит из БИС контроллера управления и ЖК панели. Модуль позволяет отображать 2 строки по 16 символов в каждой, что является достаточным для отображения необходимой нам информации. Модуль содержит два вида памяти – кодов отображаемых символов и пользовательского знакогенератора, а также логику управления.

Широко используемый последовательный интерфейс синхронной и асинхронной передачи данных, определяемый стандартом EIA RS-232 и рекомендациями CCITT V.24, изначально создавался для связи компьютера с терминалом. В настоящее время используется в самых различных применениях.

Интерфейс RS-232 соединяет два устройства. Линия передачи первого устройства соединяется с линией приема второго и наоборот (полный дуплекс). Для управления соединенными устройствами используется программное подтверждение (введение в поток передаваемых данных соответствующих управляющих символов). Возможна организация аппаратного подтверждения путем организации дополнительных RS-232 линий для обеспечения функций определения статуса и управления.

В микроконтроллере ATmega16 имеется встроенный универсальный синхронный и асинхронный последовательный приемопередатчик (УСАПП), предназначенный для организации гибкой последовательной связи. Для согласования логических уровней приемника и передатчика СОМ-порта и УСАПП микроконтроллера, воспользуемся микросхемой MAX232, предназначенной для этих целей.

Рассматриваемый метод, основанный на оценке спектрального статорного тока двигателя, позволяет применять его при диагностировании и автоматизированном контроле дефектов зубчатых зацеплений и подшипниковых узлов [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В результате выполненных теоретических исследований получен вывод о том, что диагностику горнопроходческой машины целесообразно осуществлять на работающем двигателе под нагрузкой в интервале от 20% до 70% его номинального значения. Иначе, скольжение, которое становится близким к нулевой отметке, не позволяет идентифицировать изменения в частотной характеристике [10].

Замеры выполнялись в различных условиях эксплуатации комбайна, соответствующих различным техническим состояниям объекта. В частности - на новом комбайне; отработавшем пятидесяти процентный ресурс (наработка $12000 \text{ м}^3/1000 \text{ м}$); требующем капитального ремонта (наработка $30000 \text{ м}^3/2400 \text{ м}$). Эксперимент проводился при режимах работы приводного электродвигателя рабочего органа комбайна в установившемся режиме.

В результате замеров, получены амплитуды статорного тока электродвигателя 2ЭДКОФВ250ЛВ4 У2,5, установленного на режущем органе нового комбайна. Амплитуды тока нормировались по максимальному значению. Сделан вывод о том, что анализ тока статора двигателя во времени в представленном виде весьма затруднителен.

Предложено применение быстрого преобразования Фурье и представление полученного массива в частотной области.

Для демонстрации полученных результатов приведем пример и проанализируем полученные результаты. Спектр тока двигателя исполнительного органа проходческого комбайна КП21, требующего капитального ремонта представлен на рис.3 [3]. Спектр статорного тока содержит амплитуды на характерных частотах, явно указывающие на выраженные дефекты электромеханического привода. Частота 1 - $f_1 = 50$ Гц. - питающая частота.

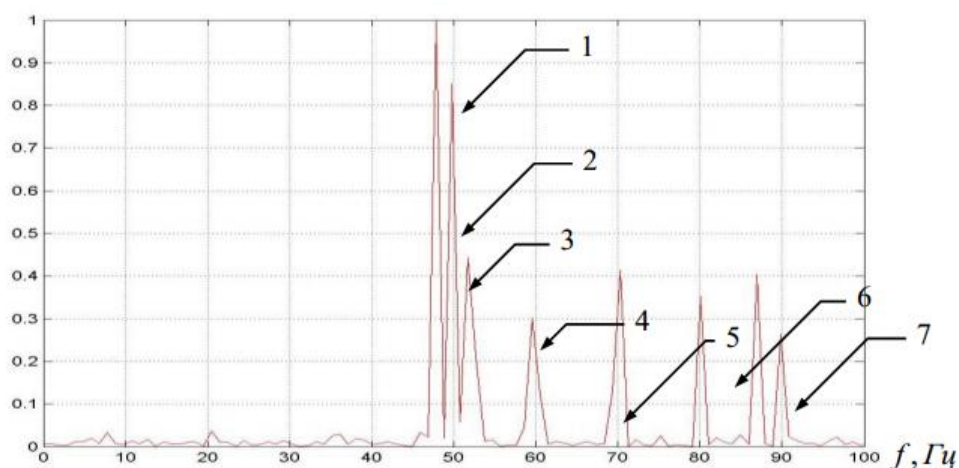


Рис. 3. – Спектр тока двигателя исполнительного органа, требующего капитального ремонта.

Наличие возмущений на частотах 2 и 3 - $f'_a \approx 52$ Гц, $f''_b \approx 48$ Гц, при таком уровне амплитуд однозначно указывают на имеющийся дефект ротора. Всплески 4 - 7 на частотах 60 Гц, 70 Гц, 80 Гц, 90 Гц. соответствуют наличию разрушений сепараторов подшипников редуктора.

Сравнительный анализ технического состояния диагностируемых узлов и значений нормированных амплитуд соответствующих частот позволил сделать вывод: дефект необходимо фиксировать, если амплитуда сигнала превышает значение в 10% от максимума, а дефект является значимым и требует устранения, если амплитуда превышает 30 %.

Адекватность разработанной методики определения идентификационных частот подтверждается экспериментальными данными в низкочастотной области спектра.

Выводы

Предложенная методика определения технического состояния электромеханического привода горнопроходческого комбайна без прекращения технологического цикла, основанная на оперативной диагностике и автоматизированном контроле, отличается тем, что в качестве входного сигнала, принимаются параметры тока, получаемые непосредственно на электродвигателе.

Сопоставительный анализ расчетных и экспериментально полученных амплитудно-частотных характеристик по отдельным узлам приводного двигателя и элементов трансмиссии исполнительного органа горнопроходческого комбайна КП21 подтвердил их адекватность. При уровне доверительной вероятности 0,9, расхождение расчетных значений и значений, полученных в результате замеров, не превышает 7%-12%, что является допустимым для данного типа исследований.

Литература

1. Носенко И.А., Домницкий А.А., Кирсанов И.А. Обоснование метода диагностики и автоматизированного контроля технического состояния электромеханического привода горнопроходческого комбайна // Инженерный вестник Дона. 2022. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7452

2. Носенко А.С. Домницкий А.А. Носенко И.А. Результаты производственных исследований надежности горнопроходческих комбайнов избирательного действия // Инженерный вестник Дона. 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3501

3. Носенко И.А. Информационные технологии диагностики состояния электропривода проходческого комбайна КП21 // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сб. статей 9-й междунаро. науч.-техн. конф., ноябрь 2008г.. Пенза: РИО ПГСХА, 2008. С.196-198.

4. Дрыгин С.Ю., Герике Б.Л., Богомолов И.Д. Анализ технического состояния экскаваторного парка угольных разрезов Кузбасса // Вестник КузГТУ. 2004. №6. С. 46-48.

5. Thomson W.T.: «A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors -Past Present and Future» // Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, Sept. 1999. pp. 3-18.

6. Герике Б.Л. Мониторинг технического состояния горного оборудования // Горные машины и автоматика. 2002. №9. С. 30-34.

7. Руссов В.А. Спектральная вибродиагностика. СПб., Питер, 2002. 231с.

8. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока // Электронный журнал "Новости Электротехники". 2005. №1(31). URL: news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php

9. Авилов В.Д., Исмаилов Ш.К. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах // Известия Транссиба. 2012. №2(10). С. 2-6.

10. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости Электротехники. 2005. № 1(31). С. 50-52.

11. Thomson W.T., Fenger M. "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults" IEEE Industry Application Magazine, vol. 7, pp. 26-34, July/Aug.

References

1. Nosenko I.A., Domnickij A.A., Kirsanov I.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2022, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7452.
2. Nosenko A.S. Domnickij A.A. Nosenko I.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2016, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3501.
3. Nosenko I.A. Informacionno-vychislitel'nye tehnologii i ih prilozhenija: sb. statej 9-j mezhdunarod. nauch.-tehn. konf., nojabr' 2008g.. Penza: RIO PGSHA, 2008. pp.196-198.
4. Drygin S.Ju., Gerike B.L., Bogomolov I.D. Vestnik KuzGTU. 2004. №6. pp. 46-48.
5. Thomson W.T. Keynote address at IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, Sept. 1999 pp 3-18.
6. Gerike B.L. Gornye mashiny i avtomatika. 2002. №9. pp. 30-34.
7. Russov V.A. Spektral'naja vibrodiagnostika [Spectral vibrodiagnostics]. SPb., Piter, 2002. 231 p.
8. Petuhov V.S., Sokolov V.A. Jelektronnyj zhurnal "Novosti Jelektrotehniki". 2005. №1(31). URL: news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php
9. Avilov V.D., Ismailov Sh.K. Izvestija Transsiba. 2012. №2(10). pp. 2-6.
10. Petuhov V.S., Sokolov V.A. Novosti Jelektrotehniki. 2005. № 1(31). pp. 50-52.
12. Thomson W.T., Fenger M. IEEE Industry Application Magazine, vol. 7, pp. 26-34, July/Aug.