

Ю.Г. Керамика – материал будущего. – М.: Знание, 1987. – 48 с. **18.** Покровский Б.И. Материалы для оптических квантовых генераторов / Сб. статей «Оксидные материалы в электронной технике». Сер. «Химия». – 1983, №6. – С.38-52. **19.** Петров Ю.Н., Филимоненко В.Н., Шац Б.З. Возможности электрохимической обработки в электролитах с органическими растворителями // Электродные процессы и технология электрохимической размерной обработки металлов. – Кишинев: Штиинца, 1980. – С.63-66. **20.** Калинин А.А., Мельников В.Г. Смазочные свойства водосодержащих жидкостей на основе триэтанолamina // Химия и технология топлив и масел . – 1988. - №7. – С.20-21. **21.** Бердников А.И., Манчаров Ю.С., Казанкина А.Ф., Михайлов И.Г. Объемная вязкость жидкости ПГВ // Химия и технология топлив и масел. - 1986. - №4. – С.26-28. **22.** Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1979. – 640 с. **23.** Jan Suhr. Synthese und Nachweis neuer schwefelhaltiger Molekule und Ionen im RF-Plasma. – Koln, 2006. – 158 p. **24.** Гуэррини Е., Трасатти С. Некоторые последние достижения в понимании факторов электрокатализа // Электрохимия. – 2006. – Т.42, №10. – С.1131-1140. И **25.** Петров Ю.Н., Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалев В.Д. Совместная электрохимико-механическая доводка пары трения сталь-антифрикционный материал // Электронная обработка материалов, 1980. - №1. – С.32-35.

Сдано в редакцию 18.05.07

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ МЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ, ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ И ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Хоменко В. Н. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

The technical diagnostics of electromechanical systems is urgent question. It can be resolved only when taking into account the mutual influence between each element that enters into the system. These elements are mechanical part of system, electrical drive, power supply. To confirm this statement was realized technical state estimation of the electromechanical system containing the direct current separate excitation motor mechanically connected with the load through spring linkage.

Цель проведенной работы: изучение поведения электромеханической системы с учетом упругих свойств механической связи для осуществления диагностирования технического состояния на примере двухмассовой электромеханической системы с приводным двигателем постоянного тока, питаемым от шестипульсного тиристорного преобразователя.

Объект исследования – двухмассовая электромеханическая система.

Предмет исследования – диагностирование технического состояния двухмассовой электромеханической системы.

Для достижения поставленной цели применены следующие методы: регистрации величин (сигналы получены с датчиков в аналоговой форме, затем проведено их преобразование в цифровую с частотой дискретизации 1000Гц – для частот вращения и тока якоря двигателя, и 500 Гц – виброускорения); цифровой обработки сигналов (фильтрация, спектральный анализ); моделирование упругих свойств системы, приводного двигателя постоянного тока независимого возбуждения и тиристорного шестипульсного преобразователя.

Для упрощения анализа динамики многомассовых электромеханических систем с упругими связями нами в качестве базового блока принята двухмассовая расчетная электромеханическая схема. Возможно построение более сложных схем на её основе. Также, существует возможность учета свойств приводного двигателя, характера питающей сети и нагрузки.

При составлении математической модели двигателя постоянного тока независимого возбуждения принято, что на рабочем участке кривая намагничивания линейна. Пренебрегаем влиянием вихревых токов.

Тип используемого тиристорного преобразователя: БТУ-3601, шестипульсный.

Механическая часть системы представима в виде двух сосредоточенных масс, связанных между собой упругой связью, см. структурную схему рис. 1 ниже.

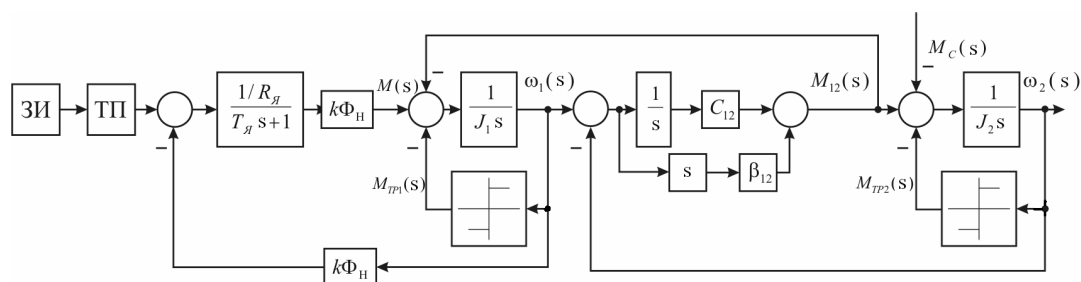


Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы с приводным двигателем постоянного тока независимого возбуждения

В качестве первой массы представлен приводной двигатель постоянного тока, питаемый от тиристорного преобразователя. Вторая масса – нагрузочный двигатель постоянного тока, создающий момент сопротивления, который можно принять неизменным во всём диапазоне частот вращения $M_C = 0,785 \text{ Нм}$.

Параметры упругой связи: момент инерции первой массы $J_1 = 0,1382 \text{ Нм}^2$; момент инерции второй массы $J_2 = 0,0855 \text{ Нм}^2$; собственная частота упругой связи

$$\Omega_{12} = 37,01 \text{ с}^{-1}; \text{ коэффициент жесткости } C_{12} = \frac{J_1 J_2 \Omega_{12}^2}{J_1 + J_2} = 72,35 \text{ Нм}.$$

Полученные результаты приведены в относительных единицах. Базисные величины: частота вращения $\omega_6 = \omega_H$, момент $M_6 = M_H$, ток якоря $I_6 = I_{ЯH}$.

На экспериментальной установке исследовались три режима работы: разгон, работа с неизменным средним значением частоты вращения (стационарный режим), остановка в режиме свободного выбега. Особенностью данной системы электропривода является то, что ток в якорной цепи может протекать только в одном выбранном направлении, поэтому остановка осуществляется в режиме свободного выбега.

На поведение рассматриваемой электромеханической системы оказывает влияние питающая часть системы, приводной двигатель и механическая нагрузка. На участках разгона системы и в режиме установившейся работы влияние всех этих факторов проявляется совместно. В то время как при свободном выбегае влияние питающей части отсутствует, также можно пренебречь влиянием приводного двигателя как электромеханического преобразователя. То есть, в указанном режиме двигатель постоянного тока независимого возбуждения можно рассматривать лишь как расчё-

тную массу механической системы, пренебрегая влиянием электромагнитных переходных процессов.

В качестве подтверждения необходимо рассмотреть величины частот вращения первой и второй масс ЭМС на участке разгона при подходе к установившейся частоте вращения и при свободном выбеге.

Покажем, что в этом случае удобней воспользоваться величиной, которая представляет собой разность частот вращения пар смежных масс системы.

Однако, из передаточных функций двухмассовой системы по первой массе

$$\frac{\omega_1(s)}{M_1(s)} = \frac{1}{T_M s} \cdot \frac{s^2 T_2^2 + 1}{s^2 T_{12}^2 + 1} \quad (1)$$

и по второй массе

$$\frac{\omega_2(s)}{M_1(s)} = \frac{1}{T_M s} \cdot \frac{1}{s^2 T_{12}^2 + 1} \quad (2)$$

следует, что разность частот вращения составит:

$$\omega_1(s) - \omega_2(s) = M_1(s) \cdot \frac{s T_2^2}{T_M} \cdot \frac{1}{s^2 T_{12}^2 + 1}, \quad (3)$$

где: s - оператор Лапласа; $\omega_1(s)$ - частота вращения первой массы; $\omega_2(s)$ - частота вращения второй массы; $M_1(s)$ - движущий момент для первой массы; T_{12} - постоянная времени собственных колебаний системы; $T_M = T_{M1} + T_{M2}$ - суммарная постоянная времени первой и второй масс; $T_2 = \sqrt{\frac{T_{M2}}{C_{12}}}$ - постоянная времени колебаний по второй массе.

ЛАЧХ, построенные по приведенным составляющим передаточным функциям (1) – (2) и результирующая ЛАЧХ $\frac{\omega_1(s) - \omega_2(s)}{M_1(s)}$, построенная по выражению (3), приведены на рис. 2.

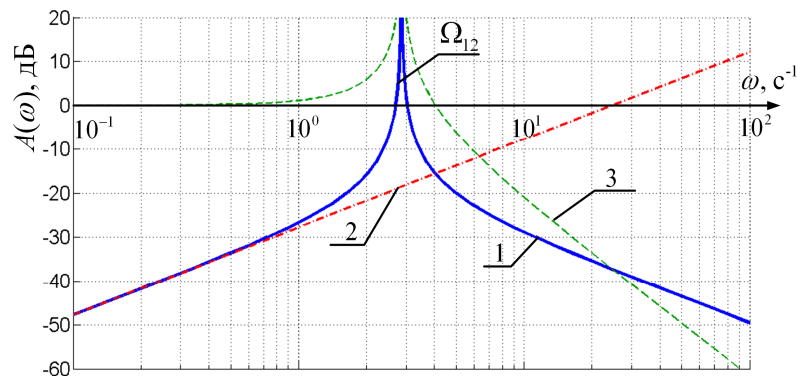


Рис. 2 . ЛАЧХ величины разности частот вращения: 1 – результирующая характеристика; 2 – дифференциальная составляющая; 3 – колебательная составляющая

Результирующая фазо-частотная характеристика на частотах ниже Ω_{12} будет равна $+\pi/2$, на частоте Ω_{12} примет значение 0, а на более высоких частотах $-\pi/2$.

Таким образом, выбирая величину разности частот вращения смежных масс системы в качестве диагностической, можно выделить собственную частоту упругих колебаний, а также особенности составляющих колебаний более низких или высоких частот, если последние не взаимно ортогональны. Кроме указанного, применение величины разности частот вращения позволяет: 1) расширить динамический диапазон измерений, так как постоянные составляющие частот вращения взаимно вычитаются; 2) эффективно устранить наводки на регистрирующую цепь; 3) уменьшить наклон в высокочастотной области ЛАЧХ с -2 до -1.

Величины разностей частот, полученные для экспериментальной установки, показаны на рис. 3 для двух участков тахограммы: разгон при подходе к установившейся частоте вращения (рис. 3а) и свободный выбег (рис. 3б).

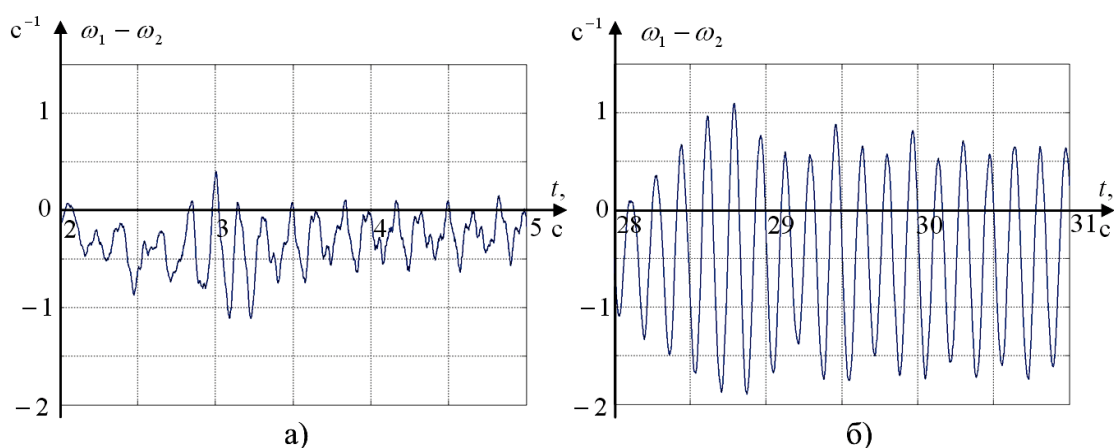


Рис. 3. График величин разности частот вращения первой и второй масс, полученный экспериментально для двухмассовой электромеханической системы:
а – на участке разгона; б – на участке свободного выбега

Из приведенных графиков видно, что если на поведение электромеханической системы оказывают влияние переходные процессы в приводном двигателе, вызванные его структурой и влиянием со стороны питающей части системы и, кроме того, оказывает влияние упругое соединение с механической нагрузкой, то временная реализация величин, характеризующих систему, имеет сложный характер. В ней присутствует множество гармонических составляющих, причиной возникновения которых является влияние элементов, входящих в состав электромеханической системы. В режиме свободного выбега (рис. 3б) можно допустить, что на поведение системы оказывает влияние только механическая часть системы, график разности частот вращения существенно упрощается, в нём в значительной мере выражена одна гармоника, соответствующая собственной частоте колебаний двухмассовой системы с упругой связью.

В момент времени $t = 27$ с ток в обмотке якоря двигателя снижается до нуля, колебания частот вращения первой и второй масс возрастают, начинается свободный выбег системы, приводной двигатель не оказывает демпфирующего влияния на частоты вращения. Исчезает влияние питающей части системы на характер переходных процессов, что подтверждается при рассмотрении динамических спектрограмм рис. 4.

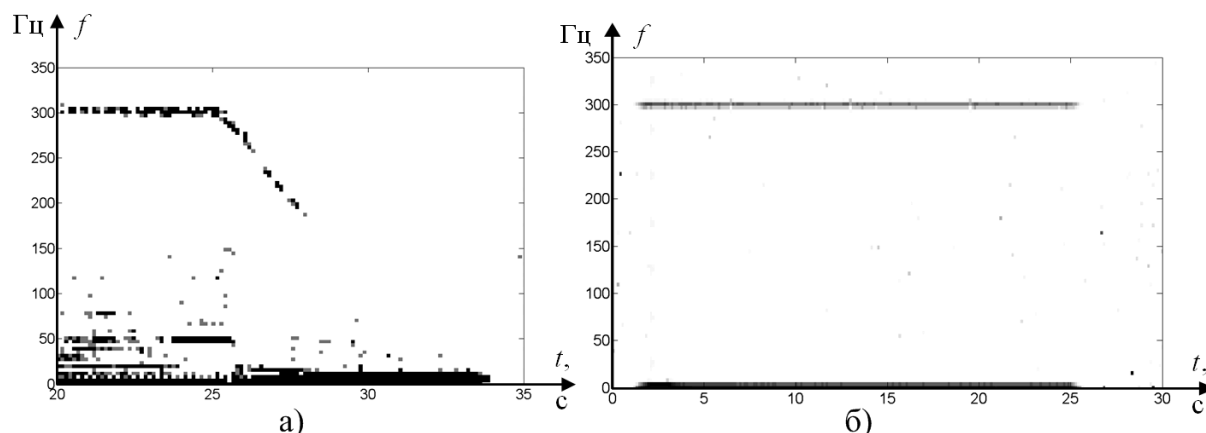


Рис. 4. Динамические спектрограммы: а – разности частот вращения на этапах установившейся работы и свободного выбега; б – токая якоря

Ток якоря двигателя $i_{я}$ содержит, кроме постоянной составляющей, гармоники с частотами 300Гц, 600Гц и т.д., наличие которых связано с питанием якорной цепи двигателя от шестипульсного тиристорного преобразователя (см. рис. 4). Как следует из структурной схемы системы (рис. 5.1), наличие высокочастотных гармонических составляющих в токе якоря ДПТ НВ вызовет их наличие и в частоте вращения, что следует из уравнения вращательного движения первой массы:

$$\omega_1 = \frac{1}{J_1} \int (i_{я} \cdot k\Phi - M_{12} - M_C) dt. \quad (4)$$

Анализ технического состояния системы по динамическим спектрограммам тока и частот вращения позволяет оценить изменение гармонического состава величин во времени. Недостатком такого подхода является довольно грубое определение частот гармонических составляющих, так как известно, что увеличение разрешения по оси времени ведёт к снижению разрешения по оси частот. Поэтому, совместно, с проведенным анализом, осуществим усреднённый анализ гармонического состава на всём интервале времени реализации процесса, что позволит получить максимально достижимую разрешающую способность по частоте, в то время как информация о времени будет потеряна.

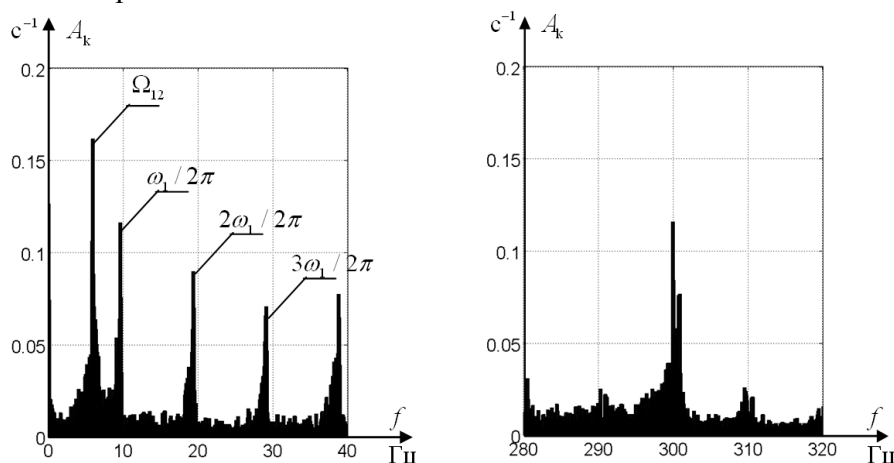


Рис. 5. Усреднённый амплитудный спектр разности частот вращения первой и второй масс $\omega_1(t) - \omega_2(t)$

В спектре сигнала $\omega_1(t) - \omega_2(t)$ выделяются составляющие следующих частот:

1) 5,975 Гц (собственная частота двухмассовой системы $\Omega_{12} = 2\pi f_{12} = 2\pi \cdot 5,975 = 37,54 \text{ с}^{-1}$), эта составляющая имеет наибольшую амплитуду по сравнению с иными гармониками, она легко прослеживается также и во временной реализации сигнала (рис. 3); 2) $\omega_1 / 2\pi = 9,79$ Гц и кратные ей, т.е.: 19,35 Гц, 29,34 Гц, ... Частота 9,79 Гц соответствует средней частоте вращения ротора, т.к. при оценке спектра был выбран участок реализации процесса, содержащий длительный отрезок работы с указанным средним значением частоты вращения. Обычно, она называется «оборотной» частотой. При рассмотрении этапа разгона или останова такая составляющая отсутствует в виде выраженного пика, т.к. её частота будет меняться; 3) на частоте 300 Гц отслеживается вторичное появление гармонических составляющих.

Наличие частот, кратных оборотной, связано с проявлением дефекта механической части системы – осевая расцентровка валов первой и второй расчётных масс. Причина её возникновения – соединение достаточно коротких выходных валов двигателей с помощью двух полумуфт через элемент, эмулирующий упругое соединение, в качестве которого выступает спиралеобразная пружина. При таком виде соединения возможно появление значительной величины несоосности валов, так как в месте соединения с полумуфтами несжатая пружина имеет кривизну.

Проведя гармонический анализ отдельно по величинам каждой из частот вращения, отметим, что сигнал частоты вращения второй массы является менее информативным по сравнению с частотой вращения первой массы, что вызвано фильтрующим действием системы с упругой связью (см. передаточную функцию 2).

Ток якоря двигателя содержит постоянную составляющую и гармоники, вызванные влиянием формы выходного напряжения тиристорного преобразователя, питающего якорную цепь двигателя. В рассматриваемом нами примере гармонический состав тока обмотки якоря может быть принят в качестве оценочного для определения наличия пульсаций частоты вращения на частотах, обнаруженных в токе. По нему также возможно диагностирование питающей части системы, в особенности, технического состояния тиристорного преобразователя. К примеру, диагностирование исправности тиристорного выпрямительного моста. Выход из строя одного или двух тиристорных приведет к существенному изменению формы выходного напряжения преобразователя, а, соответственно, изменится и гармонический состав тока, протекающего в обмотке якоря.

Увеличение угла отпирания тиристорного преобразователя приводит к снижению среднего значения величины напряжения, прикладываемого к обмотке якоря двигателя, изменению его формы, увеличению его пульсаций. Возрастает амплитуда гармоник, характерных для применяемой схемы выпрямителя, амплитуда нулевой гармоники уменьшается. Увеличение гармоники с частотой 300 Гц в токе якоря повлекло за собой увеличение уровня пульсаций на указанной частоте также и в частотах вращения. Как и в предыдущем случае, проявление механического дефекта несоосности валов, происходит на частотах, кратных оборотной частоте ротора.

В ходе исследований, кроме измерений значений частот вращения первой и второй масс и тока приводного двигателя, также были проведены измерения величин вибрации (виброускорения, виброскорости и виброперемещения) на корпусе электрических. Расположение мест крепления датчиков вибрации показано на рис. 6.

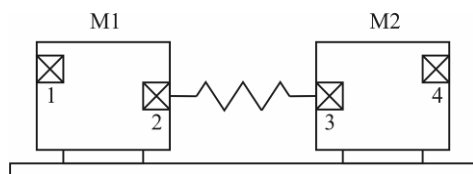


Рис. 6. Расположение точек измерения вибрации на корпусах электрических машин исследуемой двухмассовой системы

Анализ измеренных на корпусе приводной и нагрузочной машин вибраций показал, что наиболее информативным являются результаты измерений, полученные в точке 2 при измерении виброускорения. Величины виброскорости и виброперемещения позволяют лучшим образом оценить состав низкочастотной части спектра, понижая информативность высокочастотной части. Однако, энергетический вклад последних показателей в уровень вибрации выше. Величины вибрации в точке 3 ослаблены в сравнении с точкой 1 по причине ослабления вынуждающих колебаний при переходе от первой массы ко второй. Вибрации в точке 2 имеют наименьшее ослабление, и возникают в связи не полным ограничением продольного перемещения вала двигателя подшипниками. При отдалении положения измерения вибрации от места контакта корпуса с подшипником (точки 1 и 4) величина вынужденных вибраций уменьшается, в большей мере начинают проявляться вибрации, соответствующие собственным частотам конструкции двигателя, т.е. к измеряемому сигналу добавляются нежелательные искажения.

Динамическая спектрограмма колебаний корпуса приводного двигателя, измеренных в точке 2, приведена на рис. 7 ниже.

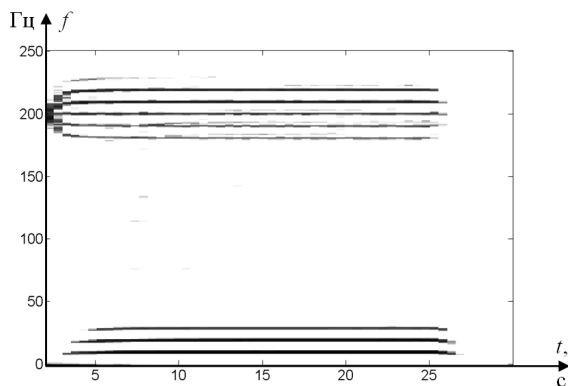


Рис.7. Динамическая спектрограмма виброускорения в точке 2 при оборотной частоте ротора 9,79 Гц

Колебания, которые были обнаружены в угловой частоте вращения ротора (рис. 5), присутствуют также в вибрации корпуса двигателя (рис. 7, снизу). Отличием является появление колебаний корпуса на частотах, близких к резонансной частоте корпуса 200 Гц. Наибольшая интенсивность колебаний наблюдается в начале пуска на резонансной частоте корпуса. При останове двигателя колебания корпуса плавно затухают. Проявляется резонансная частота корпус-основание.

Выводы: 1. В результате проведенного частотного анализа величин тока, вибраций и частот вращения, полученных на экспериментальном стенде, а также при моделировании установлено наличие взаимовлияния электрической и механической частей электромеханической системы. 2. Предложено в качестве диагностических величин для оценки технического состояния электромеханической системы принимать: а) величину разности частот вращения смежных масс; б) ток якоря приводного двигателя постоянного тока независимого возбуждения; в) виброускорение, измеренное в точках, наименее удаленных от источника возбуждения колебаний, т.е. для роторных машин – вала двигателя. 3. Результаты проведенного диагностирования показывают наличие колебаний с собственной частотой двухмассовой системы в величинах частот вращения, что вызвано наличием упругой связи между массами. Также, отмечено присутствие ко-

лебаний частоты вращения и корпуса двигателя с частотами, кратными оборотной, что свидетельствует о наличии дефекта «расцентровка валов».

Список литературы: 1. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: «Машиностроение», 1978. – 240 с., ил. – (Надежность и качество). 2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с. 3. В.П. Дьяконов. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.: ил. – (Серия «Библиотека профессионала»). 4. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение: Спектр, 2003. – 656 с.: ил. – ISBN 5-217-03178-6. 5. Устройство управления тиристорное серии БТУ 3601. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

Сдано в редакцию 14.05.07

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ШЛАКОВ

Бредихин В.Н.¹, Кушнерова Е.Ю.², Кушнеров² В.Ю.

(1-ДонНИПИЦМ, г. Донецк, Украина; 2-ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

The work presents thermotechnical calculation of the equipment for aluminium slag processing using hot-pressing method. The equipment design is developed that allows both to recover up to 80% of aluminium directly in the shop during 5 ? 15 min and to decrease significantly gassing and dusting during the slag cooling-down.

Введение. При переплаве лома и отходов алюминия, а также при литье отливок, когда плавку ведут с небольшими добавками покровно-рафинирующих и модифицирующих флюсов, на поверхности расплава в обязательном порядке образуется шлаковая фаза.

Шлаковая фаза состоит из смеси оксидов, хлоридов, нитридов основных компонентов сплава, кремнеземных составляющих шихты, компонентов флюсов, материалов футеровочной массы.

Шлаковая фаза алюминиевых сплавов пропитана металлом и при удалении её с поверхности расплава образуется сильно металлизированный продукт, который содержит кроме оксидной части, до 50% металлической составляющей.

На протяжении многих лет перед переработчиками стоит задача не только по уменьшению образования шлака, но главное по увеличению извлечения металла из него [1,2]. При этом по законам термодинамики окисление металлического алюминия происходит постоянно, пока кислород присутствует около открытой алюминиевой поверхности. При этом алюминий сгорает по реакции (1) и в результате чего в оксид переходит порядка 1% алюминия в минуту.



Такая ситуация требует разработки полного комплекса мероприятий начиная от снижения до минимума образования шлака в печи, до максимального извлечения из