

УДК 681.518.5: 621.318.3

И.В. Бочкарев^{1,2}, И.В. Брякин², И.Р. Сандыбаев², А.Р. Сандыбаева²

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

²Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рассмотрены и проанализированы различные типы электромагнитных механизмов (ЭММ). Показано, что в процессе их эксплуатации необходим контроль их рабочего состояния, выполнен обзор известных методов контроля. Для расширения возможностей систем контроля предложено использовать в качестве вихретокового датчика такой функциональный элемент ЭММ, как электромагнит (ЭМ). Для этого на обмотку электромагнита (ОЭМ), имеющую индуктивность L , через разделительный конденсатор C подают низковольтное ВЧ-напряжение, которое накладывают на рабочее постоянное напряжение питания ОЭМ, причем измерительный колебательный контур LC настраивают на его резонансную частоту. За счет этого возбуждается зондирующее электромагнитное поле, которое в якоре ЭМ индуцирует вихревые токи. Их величина зависит от положения якоря относительно магнитопровода электромагнита, а также от параметров якоря (от параметров его материала, от наличия дефектов и др.). Эти токи наводят в обмотке ЭДС, значение которой алгоритмическими методами разделяют на информацию о рабочих режимах ЭМ и о текущем состоянии узлов ЭМ, в частности, о положении якоря относительно магнитопровода. Разработана структурная блок-схема реализации предложенного способа контроля ЭМ, приведено его теоретическое обоснование. Предложена схема аппаратной реализации системы контроля ЭМ.

Ключевые слова: фрикционные электромагнитные муфты и тормоза, управляющий электромагнит, подвижный якорь, вихретоковый параметрический преобразователь, резонансная частота возбуждения зондирующего электромагнитного поля, вихревые токи, информационный сигнал.

Введение

В робототехнике и станкостроении, а также в различных средствах автоматики и мехатронных системах широко используются различные электромагнитные механизмы (ЭММ) – приводные, переключающие, тормозные, фиксирующие, блокирующие и другие [1 - 5]. Такие механизмы позволяют создавать управляемые автоматизированные системы, которые могут с высокой точностью и эффективностью выполнять различные технологические операции, а также обеспечивают надежность, точность и безопасность в автоматизированных процессах. В системах управления ЭММ могут выполнять различные функции:

- выполнять роль привода для перемещения механизмов и рабочих органов;
- обеспечивать регулирование скорости, торможение или фиксацию движущихся систем;
- осуществлять регулирование потоками жидкостей и газов;
- управлять электрическими контактами;
- выполнять функции датчиков для обнаружения различных физических величин.

Таким образом, ЭММ играют ключевую роль в различных отраслях, обеспечивая управление, преобразование и защиту.

Охватить все многообразие исполнений ЭММ в одной, ограниченной по объему статье не представляется возможным. Поэтому будем рассматривать только ЭММ, основным функциональным назначением которых является сцепление их ведущей (первичной) части с ведомой (вторичной) частью с использованием электромагнитного поля, создаваемого обмоткой ЭМ, являющегося функциональным элементом ЭММ.

Существует большое различие таких ЭММ, которые отличаются типом связи между ведущей и ведомой частями. Их можно сгруппировать в три класса (см. рис. 1):

- 1) индукционные с бесконтактной связью через магнитное поле;

2) с электромеханической связью на основе электромагнитных и механических сил, действующих через специальную магнитную смесь, находящуюся в зазоре между ведущей и ведомой частями и изменяющую свою вязкость под действием магнитного поля;

3) с непосредственной механической связью соответствующих конструктивных элементов, обусловленных силами трения.



Рисунок 1 – Классификация ЭММ по виду связи между их ведущей и ведомой частями

Каждый из указанных классов ЭММ достаточно подробно описан в соответствующей литературе [6-10]. По функциональному назначению их можно разделить на две основные группы:

- передающие устройства, служащие для дистанционного управления процессом передачи механической энергии с вращающегося ведущего вала на другой элемент (например, на другой вал или на деталь, которая свободно на нем сидит). К таким ЭММ относятся в первую очередь электромагнитные муфты и тормоза [11-13];
- позиционные устройства, служащие для дистанционного перевода рабочего исполнительного органа из одного рабочего положения в другое с его последующей фиксацией в заданном положении. К ЭММ этого класса относятся запорно-регулирующие и предохранительные электромагнитные клапаны, устройства блокировки, замки и т.п. [14 - 16].

Среди них наибольшее распространение получили фрикционные муфты и тормоза с электромагнитным приводом (ФМЭП и ФТЭП) [17 - 19], построенные на основе таких исполнительных элементов, как электромагниты, которые содержат три основные части: неподвижный ферромагнитный магнитопровод, обмотку и подвижный якорь, положение которого управляется электромагнитным полем. В ЭММ чаще используются ЭМ постоянного или выпрямленного тока с поступательным движением дискового якоря, который через соответствующие кинематические звенья осуществляет перемещение различных рабочих органов оборудования или их фиксацию в заданном положении.

Анализ современных ФМЭП и ФТЭП показал, что наиболее перспективными являются конструкции с нормально замкнутым фрикционным узлом, имеющим источник тягового усилия в виде постоянных магнитов [20]. Это объясняется тем, что такие ФМЭП и ФТЭП имеют по сравнению с традиционными пружинными конструкциями целый ряд существенных преимуществ: высокий удельный тормозной момент, высокое быстродействие при размыкании и замыкании фрикционного узла без использования схем форсировки срабатывания, отсутствие люфта вала при замкнутом фрикционном узле, низкое

энергопотребление, высокую надежность. В качестве примера на рисунке 2 показана конструкция ФМЭП с источником усилия замыкания полумуфт в виде постоянного магнита.

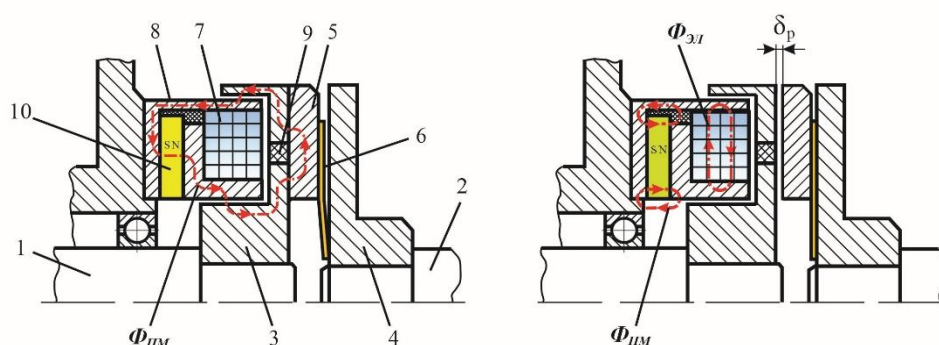


Рисунок 2 – Конструкция электромагнитной фрикционной муфты в замкнутом (а) и разомкнутом (б) состоянии:

- 1 и 2 – ведущий и ведомый валы; 3 и 4 – ведущая и ведомая полумуфты;
- 5 – дисковый якорь; 6 – возвратная пружина в виде упругой мембраны;
- 7, 8 – обмотка и магнитопровод управляющего электромагнита;
- 9 – немагнитная вставка; 10 – постоянный магнит

Обычно ФТЭП встраивают непосредственно в электродвигатель, создавая тем самым тормозную модификацию [21]. На рисунке 3 показана конструкция ФТЭП с источником тормозного усилия в виде постоянного магнита.

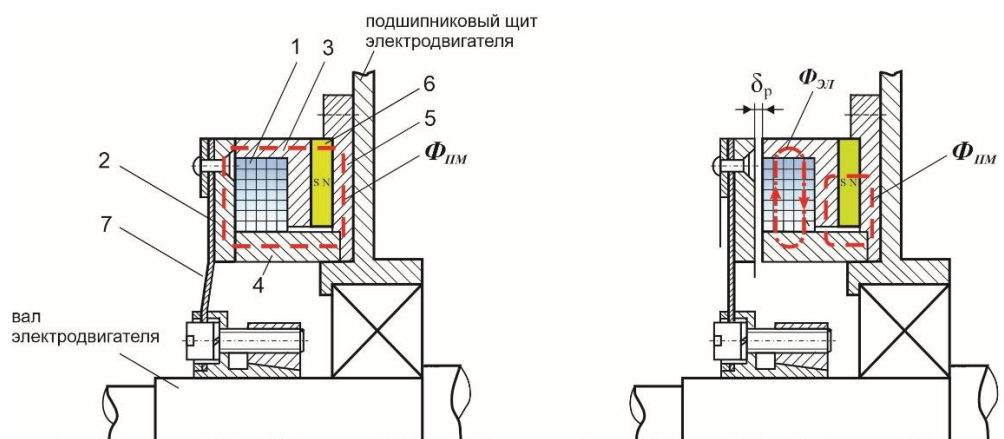


Рисунок 3 – Конструкция электромагнитного фрикционного тормоза в замкнутом (а) и разомкнутом (б) состоянии фрикционного узла:

- 1 – обмотка управляющего электромагнита; 2 – дисковый якорь;
- 3 и 4 – наружный и внутренний полюса магнитопровода; 5 – фланец;
- 6 – постоянный магнит; 7 – возвратная пружина в виде упругой мембраны

В процессе эксплуатации ЭМ необходимо иметь информацию о текущем состоянии и положении их рабочих элементов. Это позволит избежать некорректной работы и аварий оборудования, а также обеспечить безопасность его эксплуатации. Например, тормозной электродвигатель после отключения питания, если его ФТЭП не замкнется и не зафиксирует вал, будет по инерции продолжать вращение, за счет чего подвижные кинематические звенья и рабочие органы оборудования также будут продолжать движение и их позиционирование будет отсутствовать. Это приведет не только к нарушению технологического процесса и браку, но и может вызвать значительные аварии и резкое повышение травмоопасности для обслуживающего персонала. Особенно наглядно негативные последствия такой ситуации будут иметь место в станкостроении, робототехнике, при эксплуатации оборудования с острыми лезвиями на движущихся частях (например, деревообрабатывающие станки,

шредеры для измельчения бытовых и производственных отходов и т.п.) [22, 23]. Следует также отметить, что в различном технологическом оборудовании после отключения питания на вал электродвигателя со стороны приводного механизма может действовать динамический момент, например, в подъемно-транспортном машиностроении при эксплуатации лифтов, подъемников, электрического транспорта и т.п. [24], и несрабатывание ФТЭП в этом случае приведет к тяжелым последствиям и катастрофам. Отсутствие фиксации рабочих органов оборудования вследствие отказа ФТЭП вызывает некорректную работу оборудования и в других областях, например, в медицине (будет отсутствовать фиксация рабочих органов компьютерных томографов, рентгеновских устройств, роботизированного операционного оборудования), в технологическом оборудовании текстильной промышленности (будет отсутствовать четкость нанесения рисунков и покраски тканей) и т.д. Сбой в работе ФМЭП приведет к проблемам с передачей крутящего момента, что вызовет принципиальное нарушение работы оборудования, приведет к повреждению его компонентов и систем, резко снизит производительность и безопасность. Наглядно это видно, например, при работе неисправной ФМЭП в приводе электромобиля [25]. При этом очевидно, что аварийные ситуации возникают не только при не замыкании, но и при не размыкании фрикционного узла. Например, если при эксплуатации тормозной модификации электродвигателя его ФТЭП сохранит замкнутое состояние фрикционного узла после подачи питания, то вал двигателя останется заторможенным, что приведет к принципиальному изменению условий работы оборудования и к резкому увеличению нагрева двигателя.

Таким образом, разработка способов и устройств технической диагностики ЭМ, обеспечивающих высокую достоверность и информативность контроля, является актуальной задачей и имеет большое практическое значение [26].

Краткий обзор методов контроля ЭМ

Техническое состояние ЭМ необходимо контролировать непосредственно во время их работы без вывода их из технологического процесса. Такой контроль может проводиться как контактными, так и бесконтактными способами, которые подробно описаны в [11]. Контроль может проводиться как с использованием дополнительных датчиков, устанавливаемых непосредственно в активной зоне фрикционного узла и обеспечивающих наблюдение за положением якоря, так и косвенными способами путем надзора за электрическими параметрами ЭМ, величина которых зависит от текущего состояния якоря (от факта его движения или установившегося положения относительно магнитопровода).

Способы контроля с дополнительными датчиками могут быть контактными, которые реализуются, например, путем использования конечных выключателей или пьезодатчиков, и бесконтактными с использованием оптических или магнитных датчиков. Оптические системы контроля содержат источник света в виде светодиода и приемник света в виде фотодиода или фоторезистора и регистрируют изменение положения якоря за счет контроля оптического излучения. Магнитные датчики регистрируют изменения магнитных потоков выпучивания или полей рассеяния в зависимости от положения якоря относительно магнитопровода. Для определения положения якоря можно также использовать датчик Холла, размещенный на магнитопроводе, с которого снимается напряжение, пропорциональное координате якоря. Система контроля величины воздушного зазора между якорем и сердечником может быть построена также на базе токовых датчика. Новый подход к системе контроля ЭМ был предложен в [27, 28]. Предложено на магнитопроводе ЭМ разместить блок вибраторных С-антенн, выполненных в виде разъемного пространственного конденсатора, который является антенным излучателем высокочастотного электромагнитного поля. Это ВЧ-поле возбуждает в магнитопроводе соответствующие высокочастотные электродинамические процессы, не связанные с рабочими режимами ЭМ. Параметры этих процессов определяются как состоянием магнитопровода, так и текущим положением якоря относительно магнитопровода.

Однако способы контроля с использованием дополнительных датчиков требуют для их установки дополнительного пространства, что не только увеличивает габариты, но и обычно

не позволяет их размещать в уже готовом ЭМ; имеют сложный процесс монтажа и настройки; приводят к снижению надежности работы и т.д.

Для ЭМ с постоянными магнитами контактный контроль может проводиться без использования дополнительных датчиков [29], путем контроля электрического контакта между якорем и полюсами электромагнита, наличие или отсутствие которого определяется положением якоря и, таким образом, эксплуатационным состоянием фрикционного узла. Однако этот способ требует подключения источника контрольного напряжения непосредственно к магнитопроводу ЭМ, что часто невозможно или технически трудно.

Бесконтактные косвенные способы контроля ЭМ не требуются для реализации дополнительных датчиков или конструктивного изменения самого ЭМ и являются более приемлемыми для практического применения. Их можно применять для диагностики любых серийно изготавливаемых ЭМ. Такие способы по принципу работы делятся на два класса – статические и динамические. Первые из них контролируют установившееся положение якоря относительно магнитопровода, а вторые – факт движения якоря.

Для практической реализации статических способов контроля был разработан целый ряд технических решений, использующих различные физические явления, протекающие в ЭМ при изменении положения якоря. Так, в [30] описано бесконтактное устройство контроля, основанное на уменьшении индуктивности ОЭМ при увеличении величины воздушного зазора δ в его магнитной цепи (см. рис. 2, 3). Метод определения положения якоря по значению магнитного сопротивления воздушного зазора между якорем и сердечником путем расчета параметров магнитной цепи описан в [31].

Динамические способы косвенной диагностики основаны на контроле кривой нарастания тока в обмотке электромагнита после подачи на нее питающего напряжения. Алгоритмы анализа кривой тока в обмотке электромагнита с целью определения факта срабатывания ЭМ могут быть разными, например, по наличию характерного провала в этой кривой при движении якоря, вызванного наведением противо-ЭДС [11], или с использованием аппарата вейвлет-преобразования путем сравнения выбранных частотных диапазонов вейвлет-спектра информативных сигналов с заранее полученной библиотекой характеристик соответствующего электромагнита [32]. Недостатком этих динамических способов является то, что контроль осуществляется по факту движения якоря и не позволяет достоверно оценить текущее положение якоря в установившемся режиме работы.

Выбор метода контроля положения якоря электромагнита зависит от конкретных требований и условий эксплуатации, а также от различных технических решений. При этом проведенный анализ показал, что известные способы и устройства контроля ЭМ имеют определенные недостатки и ограниченные возможности, поэтому разработка новых технических решений для диагностики ЭММ, обеспечивающих бесконтактный достоверный контроль рабочих режимов их фрикционного узла, является важной и актуальной научно-практической задачей.

Новый способ комплексного контроля текущего состояния ЭМ

Для проведения комплексного контроля текущего эксплуатационного состояния ЭМ был разработан универсальный бесконтактный способ диагностики. Он заключается в том, что на рабочее постоянное напряжение питания ОЭМ через высокочастотный фильтр накладывают дополнительное низковольтное диагностическое высокочастотное напряжение, возбуждая тем самым на резонансной частоте ОЭМ первичное высокочастотное зондирующее электромагнитное поле. Этим полем облучают якорь диагностируемого ЭМ и индуцируют в нем вихревые токи. Эти вихревые токи создают вторичное переизлученное электромагнитное поле, которое регистрируют с помощью приемника излучения, в качестве которого используют саму обмотку ОЭМ. Тем самым получают диагностический сигнал в виде приращения напряжения на этой обмотке, вызванного изменением ее полного сопротивления при воздействии на нее вторичного переизлученного поля. Путем алгоритмической обработки этого диагностического сигнала определяют техническое состояние диагностируемого ЭМ.

Таким образом, согласно предложенному способу, управляющий ЭМ дополнительно используется как вихрековый параметрический преобразователь, имеющий ферромагнитный сердечник полуброневого типа для локализации магнитного поля и повышения чувствительности. При этом сама ОЭМ фактически совмещает в себе функции источника излучения зондирующего электромагнитного поля и приемника переизлученного электромагнитного поля.

На рисунке 4 показана структурная блок-схема устройства, реализующего предложенный способ диагностики ЭМ.

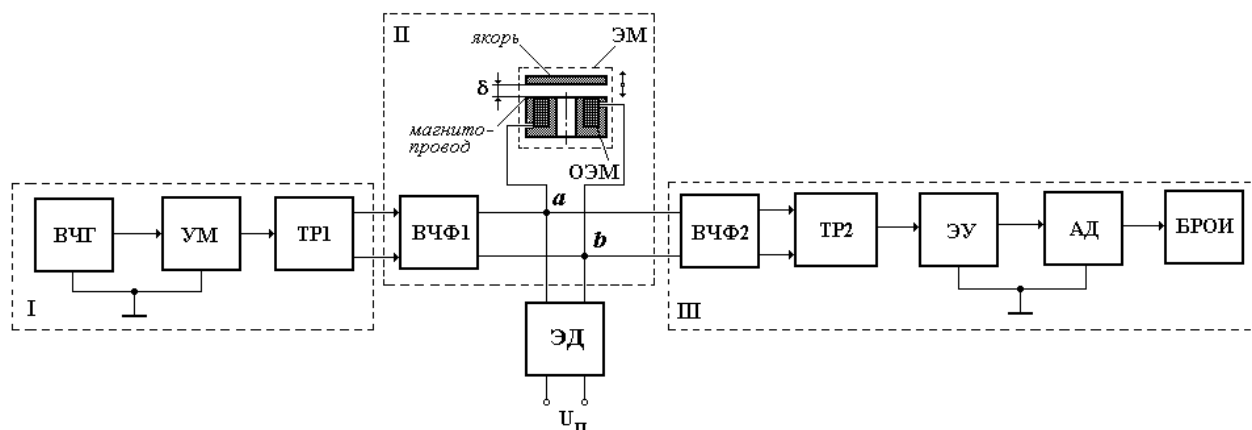


Рисунок 4 – Структурная блок-схема устройства, реализующего предложенный способ диагностики ЭМ

Особенностью работы предлагаемого устройства реализации нового способа диагностики состояния ЭМ состоит в том, что оно функционирует в режиме совмещения двух электрических цепей: а) информационная с переменным напряжением 10 В и частотой порядка 10 кГц; б) силовая с постоянным электрическим напряжением порядка 24÷170 В.

При этом информационная электрическая цепь состоит из трех функциональных каналов (рис. 4):

I – формирователь зондирующего сигнала (ЗС) низкого напряжения высокой частоты, состоящий из высокочастотного генератора ВЧГ, усилителя мощности УМ и разделительного трансформатора ТР1.

II – первичный измерительный преобразователь (ПИП), состоящий из ЭМ и разделительного высокочастотного фильтра ВЧФ1, емкость которого совместно с индуктивностью ОЭМ образует измерительный резонансный LC-контур.

III – вторичный измерительный преобразователь (ВИП) высокочастотного низковольтного зондирующего сигнала, состоящий из высокочастотного фильтра ВЧФ2; разделительного трансформатора ТР2; электронного усилителя ЭУ; амплитудного детектора АД; блока регистрации и отображения информации БРОИ.

ВТГ вырабатывает высокочастотный ЗС низкого напряжения, который через УМ и ТР1 поступает на ВЧФ1 функционального канала II. При этом ВЧФ1 блокирует постоянное напряжение силовой электрической цепи и обеспечивает прохождение высокочастотного ЗС низкого напряжения в эту силовую электрическую цепь.

ОЭМ, выходные электрические цепи ВЧФ1 и ЭД, а также входная электрическая цепь ВЧФ2 имеют две общие точки подключения «а» и «б». В этом случае гальваническая развязка между информационной и силовой электрическими цепями осуществляется посредством ТР1 и ТР2, а необходимый уровень развязки этих цепей по постоянному и переменному напряжениям электрических сигналов реализуется ЭД, ВЧФ1 и ВЧФ2. При этом постоянное напряжение питания $U_{\text{п}}$ подается на ОЭМ через электрический дроссель ЭД, посредством которого осуществляется блокировка высокочастотного ЗС, т.е.

предотвращается его прохождение в источник питания силовой цепи и исключается воздействие зондирующего сигнала на функциональные элементы этого источника питания.

Изменение импеданса ОЭМ вызывает соответствующее перераспределение ЗС на элементах измерительного резонансного LC -контура функционального канала II. Часть перераспределенного ЗС уже в виде информационного сигнала поступает на вход функционального канала III для последующего преобразования. При этом ВЧФ2 функционального канала III блокирует прохождение постоянного напряжения силовой электрической цепи в последующие электрические цепи этого канала, но наряду с этим пропускает высокочастотный информационный сигнал, проходящий в дальнейшем через ТР2 и ЭУ на вход АД, который соответствующим образом преобразуется в выходной информационный сигнал функционального канала III. Параметры этого выходного информационного сигнала, отражающие рабочее состояние ЭМ, определяются и обрабатываются БРОИ соответствующим образом.

Теоретическое обоснование предложенного способа контроля ЭМ

Докажем, что параметры выходного диагностического информационного сигнала в виде приращения напряжения на этой обмотке, вызванного при воздействии на нее вторичного переизлученного поля, отражают рабочее состояние ЭМ.

Для упрощения математических преобразований примем, что импеданс вторичной обмотки ТР1 условно является относительно малой величиной, а входное сопротивление функционального канала III обладает малозначимым эффектом шунтирования. Тогда при отсутствии якоря для напряжения $\dot{U}$ на выходе функционального канала I справедливо следующее выражение:

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot \left[r + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right], \quad (1)$$

где r , L и C – собственные электрические параметры элементов функционального канала II соответственно ОЭМ и ВЧФ1, представляющие собой два последовательно соединенных разделительных электрических конденсатора; $\dot{I}$ – высокочастотный электрический ток, протекающий в ОЭМ, обусловленный подключением функционального канала I.

Напряжение на индуктивности L ОЭМ при этом будет равно:

$$\dot{U}_L = \dot{I} \cdot (r + j \cdot \omega \cdot L). \quad (2)$$

Указанный ток $\dot{I}$ создаст зондирующее электромагнитное поле, и если в рабочей зоне ОЭМ присутствует якорь, то это поле будет индуцировать в нем вихревой ток $\dot{I}_0$, протекающий в замкнутом электрическом контуре с параметрами L_0 (условная индуктивность) и r_0 (условное активное сопротивление). Этот ток $\dot{I}_0$ создаст вторичное переизлученное электромагнитное поле, которое будет действовать на ОЭМ. В этом случае для взаимосвязанных контуров Lr и L_0r_0 можно записать:

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{I}^* \cdot \left[r + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right] + j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_0; \\ j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}^* + (r_0 + j \cdot \omega \cdot L_0) \cdot \dot{I}_0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

где M – коэффициент взаимной индукции между ОЭМ и якорем.

Решая систему уравнений, получим:

$$\dot{U} = \dot{I}^* \cdot \left[\left(r + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \right) + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right] = \dot{U}_L^* - \dot{U}_C^*, \quad (4)$$

$$\text{где } Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}; \quad \dot{U}^* = \dot{I}^* \cdot \left[\left(r + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \right) + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 \right) \right];$$

$$\dot{U}_C^* = -\dot{I}^* \cdot j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

Из анализа уравнений (1) и (4) видно, что в результате взаимодействия $L_0 r_0$ -контура и LC -контура параметры последнего изменились на величины:

$$\Delta r = \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0; \quad \Delta x = -j \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0. \quad (5)$$

В этом случае приращение напряжения на ОЭМ будет определяться следующим выражением:

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{U}_L^* - \dot{U}_L = \dot{I}^* \cdot \left[\left(r + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \right) + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 \right) \right] - \dot{I} \cdot (r + j \cdot \omega \cdot L). \quad (6)$$

Для токов в ОЭМ при отсутствии и при наличии якоря соответственно можем записать:

$$\dot{I} = \dot{U}/r \text{ и } \dot{I}^* = \dot{U}/\dot{Z}, \quad (7)$$

где $\dot{Z} = \left(r + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \right) + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)$ – импеданс ОЭМ при наличии якоря.

С учетом сделанного замечания (7) выражение (6) можно представить в следующем виде:

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{U} \cdot \left[\frac{\left(r + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \right) + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 \right)}{\left(r + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot r_0 \right) + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0^2} \cdot \omega \cdot L_0 - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)} - \frac{(r + j \cdot \omega \cdot L)}{r} \right]. \quad (8)$$

Введя $k^2 = \omega^2 \cdot M^2 / Z_0^2$ и осуществив соответствующие преобразования с учетом того, что $M \ll 1$ и $\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) = 0$, получим:

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{U} \cdot \left[\frac{(r + k^2 \cdot r_0) + j \cdot (\omega \cdot L - k^2 \cdot \omega \cdot L_0)}{(r + k^2 \cdot r_0) - j \cdot k^2 \cdot \omega \cdot L_0} - \frac{(r + j \cdot \omega \cdot L)}{r} \right]. \quad (9)$$

Выразим добротность Q измерительного LC -контура через следующее соотношение:

$$Q = \omega \cdot L / r. \quad (10)$$

Учитывая (10) выражение (9), можно привести к виду:

$$\Delta \dot{U}_L^* = -\dot{U} \cdot \frac{r}{(r + k^2 \cdot r_0)^2} \cdot k^2 \cdot Q \cdot (\omega \cdot L_0 + j \cdot r_0). \quad (11)$$

Если принять, что $r / (r + k^2 \cdot r_0)^2 \approx 1/r$, то получим следующее выражение:

$$\Delta \dot{U}_L^* = -\frac{\dot{U}}{r} \cdot k^2 \cdot Q \cdot (\omega \cdot L_0 + j \cdot r_0) = \frac{\dot{U}}{r} \cdot k^2 \cdot Q \cdot (r_0 - j \cdot \omega \cdot L_0) \cdot e^{-j \cdot \frac{\pi}{2}}. \quad (12)$$

В этом случае модуль приращения напряжения $\Delta \dot{U}_L^*$ будет равен

$$|\Delta \dot{U}_L^*| = \frac{|\dot{U}|}{r} \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2}{r_0^2 + \omega^2 \cdot L_0^2} \cdot Q \cdot \sqrt{r_0^2 + \omega^2 \cdot L_0^2} = \frac{|\dot{U}|}{r} \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2}{Z_0} \cdot Q. \quad (13)$$

Коэффициент взаимной индукции M между ОЭМ и якорем является экспоненциальной функцией текущей величины зазора δ между якорем и торцами магнитопровода (рис. 4). Его величина описывается выражением [33]:

$$M = M_0 \cdot e^{\frac{3\delta_p}{R_3}}, \quad (14)$$

где M_0 – коэффициент взаимной индукции обмотки и ее «зеркального изображения» при зазоре $\delta = 0$; $R_3 = a + (b/2)$ – эквивалентный радиус обмотки; a – внутренний радиус сердечника магнитопровода обмотки; b – толщина обмотки.

Тогда, с учетом соотношения (14), выражение (13) получит следующий вид:

$$|\Delta \dot{U}_L^*| = \frac{|\dot{U}|}{r} \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2}{r_0^2 + \omega^2 \cdot L_0^2} \cdot Q_1 \cdot \sqrt{r_0^2 + \omega^2 \cdot L_0^2} = \frac{|\dot{U}|}{r} \cdot \frac{\omega^2}{Z_0} \cdot M^2 \cdot Q \cdot e^{\frac{6\delta_p}{R_3}}. \quad (15)$$

Таким образом, величина модуля приращения напряжения $\Delta \dot{U}_L^*$ на ОЭМ определяется следующими параметрами: 1) коэффициентом M , который определяется пространственным расположением якоря; 2) рабочей частотой ω ; 3) собственными параметрами якоря; 4) добротностью Q измерительного контура. При этом видно, что чувствительность измерительного LC -контура и соответственно чувствительность всей системы контроля ЭМ в резонансном режиме возрастает в Q раз.

Из выражения (15) можно получить формулу для расчета величины зазора δ между якорем и магнитопроводом:

$$\delta = \frac{R_3}{6} \cdot \ln \left(\frac{|\dot{U}| \cdot \omega^2 \cdot M_0^2 \cdot Q}{|\Delta \dot{U}_L^*| \cdot r \cdot Z_0} \right) = \frac{R_3}{6} \cdot \ln \left(S \cdot \omega^2 \cdot \frac{|\dot{U}|}{|\Delta \dot{U}_L^*|} \right), \quad (16)$$

где $S = \frac{M_0^2 \cdot Q}{r \cdot Z_0}$ – коэффициент преобразования ОЭМ в режиме измерительной обмотки.

Таким образом из представленного выше анализа следует сделать вывод о том, что предложенный способ позволяет осуществляется контроль величины зазора δ между якорем и магнитопроводом управляющего электромагнита ЭМ непосредственно в процессе его эксплуатации без отключения ЭМ от силовой цепи питания, контролируя тем самым рабочий режим ЭМ в целом. Для этого необходимо подать высокочастотное зондирующее напряжение на измерительный LC -контур функционального канала II, настроенный на резонансную частоту, и регистрировать изменения напряжения $|\Delta \dot{U}_L^*|$ на этом LC -контуре.

Из выражения (15) видно, что напряжение ОЭМ, наряду с контролем величины δ , несет в себе также информацию о целом ряде собственных физических параметрах как управляющего электромагнита, так и якоря: удельной электрической проводимости σ_0 , магнитной проницаемости μ_0 , о наличии дефектов и их размерах. Это обусловлено тем, что указанные показатели входят в сопротивления Z_1 и Z_0 , которые однозначно влияют на $|\Delta \dot{U}_L^*|$. Поэтому, используя различные аппаратные и алгоритмические способы разделения информации и используя заранее сформированную библиотеку характеристик соответствующего ЭМ, можно диагностировать текущее состояние указанных узлов ЭМ.

Вариант схемотехнического решения устройства диагностики состояния ЭМ показан на рисунке 5. В качестве ВЧГ используется наиболее распространенная схема генератора гармонического сигнала с мостом Вина, не изменяющего фазу сигнала на частоте генерации ВЧГ. Основными элементами ВТГ являются: двоянный широкополосный операционный усилитель (ОУ) DA1 на интегральной микросхеме (ИМ) KP574УД2 с малыми входными токами и обладающий достаточным быстродействием; резисторы R1÷R7; электрические конденсаторы C2 и C3; диоды VD1 и VD2. Операционный усилитель DA1.2 охвачен положительной и отрицательной обратными связями (ОС), которые при определенных соотношениях элементов моста Вина приводят к возникновению автоколебаний соответствующей частоты. Сам мост Вина, представляющий собой частотно-избирательный четырёхполюсник, выполненный в виде Г-образной RC-цепи (C3 и R7; C2и R3), находится

во внешней ОС, позволяющей получить более высокую стабильность по частоте. Применение переменного резистора (потенциометра) R3, изменяющего усиление в цепи отрицательной обратной связи операционного усилителя DA1.1, позволяет регулировать также частоту выходного напряжения ВЧГ. При уменьшении номинала потенциометра R3 увеличивается частота и уменьшается сигнал ОС на неинвертирующем входе DA1.2.

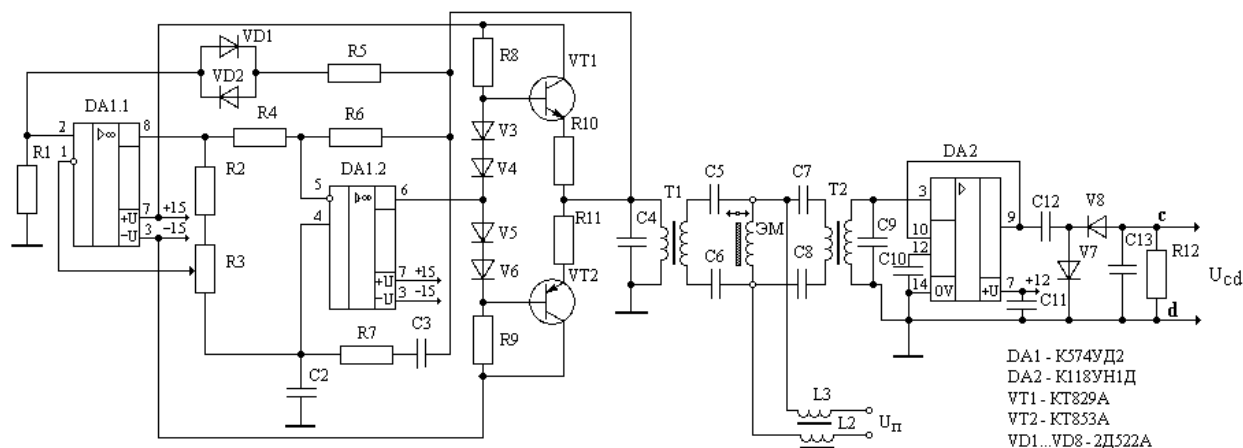


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема устройства диагностики состояния ЭМ

Данный вариант ВЧГ имеет автоматическую регулировку усиления (APY), выполненную на DA1.1, VD1 и VD2, где падением напряжения на диодах VD1 и VD2 в цепи APY определяется значение выходного напряжения ВЧГ, т.е. на выходе DA1.2.

В качестве выходного УМ используется двухтактный каскад с общим коллектором по схеме, соответствующей режиму «А». Каскад собран на следующих элементах: комплементарные транзисторы VT1 и VT2; VD3÷VD6; резисторы R8÷R11. Резисторы R8 и R9 и диоды VD3÷VD6 служат для задания рабочей точки транзисторов VT1 и VT2. Применение резисторов R10 и R11 обусловлено несимметричностью относительно комплементарных транзисторов VT1 и VT2. С выхода УМ организуется внешняя ОС по отношению к DA1.2 ВЧГ.

Первичная обмотка разделительного трансформатора T1 образует с конденсатором C4 выходной параллельный LC-контур функционального канала I, с которого напряжение зондирующего сигнала соответствующим образом трансформируется посредством его вторичной обмотки и поступает в силовую цепь питания ОЭМ через ВЧФ1, образованный разделительными конденсаторами C5 и C6. Кроме того, последовательно соединенные конденсаторы C5 и C6 суммарной емкостью C образуют совместно с индуктивностью ОЭМ измерительный резонансный LC-контур функционального канала II. Часть перераспределенного ЗС между импедансом ОЭМ и суммарными емкостными сопротивлениями конденсаторов C5, C6 (ВЧФ1) уже в виде входного измерительного сигнала поступает через разделительные конденсаторы C7, C8 (ВЧФ2) и первичную обмотку трансформатора T2 во вторичную его обмотку, образующую с конденсатором C9 входной параллельный LC-контур функционального канала III. Далее измерительный сигнал усиливается ЭУ, составленный из усилителя напряжения DA2 на базе МС К 118УН1Д; конденсаторов C10 и C11. После чего усиленный информационный сигнал детектируется посредством АД, состоящего из резистора R12, конденсаторов C12 и C13, а также диодов VD7 и VD8. При этом процедура детектирования подразумевает выделение информационной компоненты U_{cd} информационного сигнала, связанной с изменениями значений импеданса ОЭМ в процессе функционирования ЭМ. С выхода АД информационная компонента U_{cd} ЗС поступает в БРОИ, где осуществляется соответствующая завершающая процедура ее преобразования. В свою очередь, соответствующая развязка элементов

источника питания, формирующего напряжение U_p в электрической силовой цепи обмотки ЭМ, от высокочастотных зондирующих сигналов достигается за счет дросселей L2 и L3.

Выводы. Предложенный способ контроля состояния силовых и коммутационных электромагнитных механизмов и разработанная система его аппаратной реализации позволяют получить информацию о текущем состоянии и положении их рабочих элементов непосредственно во время их работы. Это дает возможность избежать нарушений технологического процесса и аварий оборудования, а также обеспечить высокую степень безопасности эксплуатации. Высокая степень информационной избыточности разработанного способа диагностики способствует эффективно осуществлять многопараметровый эксплуатационный контроль ЭМ.

Предложенная система контроля и диагностики состояния функциональных элементов ЭМ имеет простую схемотехническую реализацию и допускает эффективно осуществлять оперативный неразрушающий контроль как для ЭМ с переменными, так и с постоянными источниками рабочего напряжения питания в режиме активного функционирования ЭМ.

Предложенная система контроля имеет расширенные эксплуатационные возможности и позволяет в зависимости от поставленных задач контроля регистрировать различные информативные параметры, непосредственно связанные с текущим состоянием ФТЭП и эффективно определять большинство видов эксплуатационных дефектов их элементов.

Литература

1. Тонконогов Е. Н., Суханов В. В. Электромагнитные механизмы. – СПб.: Политех-Пресс, 2019. – 85 с.
2. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. – М.: Высшая школа, 2004. – 351 с.
3. Маренич К.Н. и др. Автоматизация сложных электромеханических объектов энергоёмких производств. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 239 с.
4. Жужжалов В.Е., Солдатов В.В., Маклаков В.В., Жиров М.В. Технические средства автоматизации. – М.: МГУТУ, 2004. – 173 с.
5. Li Zh., Jiang X., Chen Zh. Research on the Development and Application of Electromagnetic Clutch. International Journal of Energy, 2025, 6(2):37-39. DOI:10.54097/53rkyd29.
6. Руднев С. Г., Погосян В. М., Мечкало А. Л. Муфты. Конструкция и расчет. – М.: Лань, 2026. – 107 с.
7. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т. Электромагнитные механизмы с постоянными магнитами и схемы их управления для систем автоматики. – Бишкек: Изд-во «Илим», 2008. – 274 с.
8. Kielan P., Pilch Z. Comparison of properties of electromagnetic clutches with ferromagnetic powder and magnetorheological fluid for low frequency control signals, 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Rzeszow, Poland, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/WZEE.2016.7800200.
9. Venusamy K., Ashok P., K. D, D. Nirmala, M. K and H. Anandaram, "Design and Fabrication of Contactless Clutch with Braking and Traction Control System using Electromagnetic Coupling," 2024 4th International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM), Noida, India, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIPTM59628.2024.10563830.
10. Pirouz H. M., Baghayipour M. Design and Analysis of a New Electrically Controllable Brushless Eddy-Current Clutch. 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2021, pp. 351-355, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544501.
11. Бочкарев И.В. Фрикционные тормозные устройства с электромагнитным приводом для технологического оборудования. – Бишкек, ИЦ «Техник», 2006. – 401 с.
12. Учаев П.Н., Емельянов С.Г., Захаров И. С. и др. Современное машиностроение. Основы машиноведения. Конструкция, параметры и основы конструирования. – Кн. 3. Муфты и тормоза приводов машин. – 2006. – 295 с.

13. Orthwein W. C. Clutches and Brakes: Design and Selection. CRC Press, 2004, 300 p.
14. Nesbitt B. Handbook of Valves and Actuators. Butterworth-Heinemann, 2011. 416 p.
15. Blair T. H. Valves and Actuators, in Energy Production Systems Engineering , IEEE, 2017, pp.603-623, doi: 10.1002/9781119238041.ch25.
16. Щучинский С. Х. Электромагнитные клапаны систем автоматизации и их привод. — СПб.: ГЭТУ, 1995. — 115 с.
17. Воропаев В.В., Поезжалов В.М. Электромагнитные муфты и тормоза. Область применения, преимущества и недостатки // Международный научный журнал «Вестник науки» –2021. – № 12 (45) –Т.3. – С. 184 –192.
18. Singh S. Design and Analysis of an Electro-Magnetic Clutch, International Journal of Progressive Research in Science and Engineering, 2020, Volume-1, Issue-3, pp. 89-95.
19. Review Paper on Eddy Current and Electromagnetic Brake / Y. Gandhi, D. Modh, N. Kishan, R. Parmar, N. Panchal // International journal of engi-neering research & technology (IJERT), 2021, Vol. 10, Iss. 01. doi: 10.17577/IJERTV10IS010198.
20. Бочкарев И.В., Храмшин В.Р., Галбаев Ж.Т., Сандыбаева А.Р. Разработка электромеханических тормозных устройств с источником тормозного усилия в виде постоянных магнитов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. – № 3. – С. 55–67. doi:10.17213/0136-3360-2024-3-55-67.
21. Бочкарев И.В., Ширинский С.В. Расчет и конструирование асинхронных электродвигателей различных модификаций. – М.: Изд-во МЭИ, 2025. – 240 с.
22. Ладик Б. Р., Ермак И. Т. Деревообрабатывающее оборудование – источник опасных производственных факторов // Труды БГТУ. – 2014. – № 2. – С. 140–142.
23. Техника и технология переработки и утилизации отходов / Найман С. М., Газеев Н. Х., Глебов А. Н., Фролов Д. В. – Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, Казань, 2011. – 418 с.
24. Константинов В. Ф. Подъемно-транспортные машины. –Лань, 2025. – 176 с.
25. Бахмутов С.В., Круташов А.В., Маликов О.В., Благушко Я.И. Особенности работы управляемых фрикционных муфт в составе энергосиловой установки гибридного автомобиля // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 1(11). – С. 120–126.
26. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Сандыбаева А.Р., Кудайбергенова Н.Б. Разработка системы виброакустической диагностики оборудования // Проблемы автоматики и управления. – 2025. – № 3 (54). – С. 5–16.
27. Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Khrumshin V.R., Voronin S.S. Diagnostics of Electromagnetic Friction Brakes and Clutches // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineer-ing (EIConRus). – 2019. – pp. 447–452.
28. Патент РФ № 2659868. Способ диагностики электромагнитного механизма / Бочкарев И.В., Брякин И.В. // Опубликовано 04.07.2018. Бюл. № 19.
29. Bochkarev I.V., Galbaev Zh. T. Development of frictional couplings and brake with a magnetoelectric drive // Russian Electric Engineering. – New York, Allerton Press, Inc. 2009, Vol. 80, No. 7. – pp. 371-375.
30. Гаврилюк В. И., Профатилов В. И. Метод определения положения якоря по значению индуктивности обмотки реле // Наука и прогресс транспорта. Вестник ДНУЖТ. – 2007. – № 19. – С.13–17. DOI:10.15802/stp2007/17372.
31. Профатилов В. И. Метод определения положения якоря реле по магнитному сопротивлению рабочего воздушного зазора // Наука и прогресс транспорта. Вестник ДНУЖТ. – 2005. – № 6. – С.16–21.
32. Дубров В.И. Интеллектуальная диагностика электромагнитных механизмов на базе нейронных сетей // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – С. 40–47.
33. Фрайден Дж. Современные датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.