



РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА СИЛОВЫХ И КОММУТАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ

И.В. Бочкарев¹, И.В. Брякин²

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан,

²Институт автоматизации и информационных технологий Национальной
Академии Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas2006@yandex.ru

Резюме: Предложен новый способ диагностики силовых и коммутационных электромагнитных механизмов, содержащих управляющий электромагнит и подвижный якорь. Подвижный элемент диагностируемого электромагнитного механизма (ЭММ) облучают высокочастотным зондирующим электромагнитным полем и регистрируют переизлученное электромагнитное поле от него. В качестве источника зондирующего поля и приемника переизлученного поля используют обмотку электромагнита ЭММ. Зондирующее электромагнитное поле формируют путем наложения на низкочастотное высоковольтное рабочее напряжение питания обмотки электромагнита ЭММ дополнительного высокочастотного низковольтного напряжения. Диагностический параметр определяют путем алгоритмической обработки результатов измерения величины приращения напряжения на обмотке ЭММ, вызванного воздействием на нее переизлученного электромагнитного поля, а техническое состояние диагностируемого электромагнитного механизма определяют по абсолютной величине диагностического параметра. Способ позволяет диагностировать текущее состояние основных функциональных узлов ЭММ и контролировать его рабочие режимы в целом.

Ключевые слова: электромагниты с поступательным движением якоря, электромагнитные механизмы, низкочастотное высоковольтное рабочее напряжение, высокочастотное зондирующее электромагнитное поле, переизлученное электромагнитное поле, комплексная диагностика электромагнитного механизма.

Для цитирования: Бочкарев И.В., Брякин И.В. Разработка нового способа диагностики электромагнитного привода силовых и коммутационных механизмов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-68-77.

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD OF DIAGNOSTICS ELECTROMAGNETIC DRIVE POWER AND COMMUTATION MECHANISMS

IV. Bochkarev, IV. Bryakin

¹Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan,

²Institute of Automation and Information Technology of the National
Academy of Sciences Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas2006@yandex.ru

Abstract: A new method for diagnosing power and switching electromagnetic mechanisms containing a control electromagnet and a movable armature is proposed. The movable element of

the diagnosed electromagnetic mechanism (EMM) is irradiated with a high-frequency probing electromagnetic field and the reradiated electromagnetic field from it is recorded. The source of the probing field and the receiver of the re-radiated field is the EMM electromagnet winding. The probing electromagnetic field is formed by imposing on the low-frequency high-voltage operating voltage of the supply winding of the electromagnet EMM an additional high-frequency low-voltage voltage. The diagnostic parameter is determined by algorithmic processing of the measurement results of the magnitude of the voltage increment on the EMM winding, caused by exposure to a reradiated electromagnetic field, and the technical condition of the diagnosed electromagnetic mechanism is determined by the absolute value of the diagnostic parameter. The method allows to diagnose the current state of the main functional units of the EMM and to control its operating modes as a whole.

Keywords: *electromagnets with anchor armature, electromagnetic mechanisms, low-frequency high-voltage operating voltage, high-frequency probing electromagnetic field, reradiated electromagnetic field, complex diagnostics of electromagnetic mechanism.*

For citation: Bochkarev IV, Bryakin IV. Development of a new method of diagnostics electromagnetic drive power and commutation mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(3): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-68-77.

Введение.

Электромагниты используются практически во всех областях техники, поскольку имеют предельно простую конструкцию и обеспечивают при этом возможность удаленного дистанционного управления преобразованием электрической энергии в механическую работу. Одной из наиболее распространенной сферы их применения являются различные электромагнитные механизмы (ЭММ), которые широко применяют в системах регулирования и управления. Несмотря на конструктивное разнообразие ЭММ, их приводные электромагниты состоят из следующих основных частей: неподвижного магнитопровода в виде ферромагнитного сердечника, обмотки, расположенной на сердечнике, и подвижного якоря, посредством которого рабочим органам механизма передается механическое усилие. ВЭММ чаще используются электромагниты с поступательным движением якоря, тяговое усилие которых служит для перемещения или фиксации в заданном положении различных рабочих органов. К таким электромагнитным механизмам относятся *силовые ЭММ*, например, муфты сцепления, фрикционные тормоза, электромагнитная технологическая оснастка, электромагнитные клапаны, магнитные замки, а также *коммутационные ЭММ*, например, электромагнитные реле, магнитные пускатели, выключатели [1-8]. Указанные ЭММ применяют для дистанционного управления перемещением рабочих или управляющих органов механизмов, а также для приведения в действие контактных устройств. Они являются базовыми устройствами, составляющими силовую элементную основу различных автоматизированных и мехатронных электроприводов и систем управления [9 -11]. Наглядным примером этому могут служить электромеханические муфты, тормозные устройства и клапаны. Электромагнитные муфты позволяют дистанционно соединять или разъединять валы, а также регулировать скорость исполнительного органа рабочей машины при постоянной скорости вращения приводного двигателя [8]. Тормозные устройства обеспечивают быструю остановку и последующую фиксацию исполнительных органов в заданных положениях после отключения двигателя [12]. Электромагнитные запорные и распределительные клапаны как элементы трубопроводной арматуры обеспечивают дистанционное включение или отключение трубопровода, а также перераспределение течения рабочей среды в обслуживаемых трубопроводах [13, 14]. Таким образом, ЭММ в значительной степени влияют на уровень механизации и автоматизации различных производственных процессов.

Постановка задачи Очевидно, что точность, производительность и надежность работы электрооборудования с электромеханическими системами, содержащими ЭММ, однозначно зависят от качества работы этих ЭММ и, в первую очередь, именно от качества функционирования их электромагнитных приводов. Соответственно, контроль и диагностика технического состояния и режима работы электромагнита имеют огромное практическое значение, поскольку позволяет исключить возможность эксплуатации оборудования при неисправном ЭММ. Поэтому актуальной задачей является разработка методов технической диагностики различных неисправностей ЭММ, обеспечивающих высокую достоверность и информативность контроля.

Обзор методов контроля ЭММ

Очевидно, что техническое состояние электромагнитов ЭММ необходимо контролировать непосредственно во время их работы без вывода ЭММ из технологического процесса [15]. Диагностика состояния ЭММ может осуществляться как контактными, так и бесконтактными способами.

Для реализации контактного контроля в ЭММ встраиваются механические датчики, сигналы которых дают информацию о характеристиках электромагнита. В качестве таких датчиков используют, например, конечные выключатели или пьезодатчики. Применяют и бесконтактные сенсоры в виде фото- или магнитных датчиков, установленных непосредственно в активной зоне ЭММ, которые обеспечивают контроль за положением якоря [12], например, путем регистрации изменения потоков выпучивания или полей рассеяния в зависимости от положения якоря относительно магнитопровода. Однако такие способы контроля с дополнительными датчиками имеют ряд недостатков: требуют для установки этих датчиков дополнительного пространства, что увеличивает габариты ЭММ и зачастую не позволяет их размещать в уже готовом ЭММ; имеют сложный процесс монтажа и настройки; приводят к снижению надежности работы и т.д.

Контактный бессенсорный контроль может проводиться для ЭММ, в которых используется постоянные магниты [16]. В этом случае в качестве диагностической информации о состоянии ЭММ использовать наличие или отсутствие электрического контакта между якорем и полюсами электромагнита. Принцип такого контроля заключается в том, что постоянные магниты имеют значительное электрическое сопротивление, которое в зависимости от состояния ЭММ может шунтироваться низкоомным якорем, что позволяет с высокой степенью достоверности осуществлять контроль за положением якоря и, тем самым, за состоянием ЭММ [8]. Недостатком этого способа является необходимость гальванического подключения напряжения непосредственно к магнитопроводу ЭММ, что часто технически трудно реализуемо. Кроме того, такой способ контроля не универсален, т.к. может быть использован для устройств, имеющих только высокоомные постоянные магниты, например, металлокерамические.

Очевидно, что более предпочтительными являются бесконтактные способы контроля ЭММ, среди которых преимущества имеют косвенные методы диагностики. Принципиальное преимущество таких методов состоит в том, что для их реализации не требуется конструктивного изменения самого ЭММ и, соответственно, они могут быть использованы для любого серийно изготавливаемого ЭММ без необходимости проведения трудоемких операций его разборки/сборки. Такие бесконтактные косвенные методы контроля можно разделить на два класса:

- статические методы, осуществляющие контроль за установившимся положением якоря относительно магнитопровода электромагнита;
- динамические методы, осуществляющие контроль за фактом движения якоря относительно магнитопровода.

Для практической реализации статических методов контроля был разработан целый ряд технических решений, использующих различные физические явления, протекающие в ЭМУ при изменении положения якоря. Так, в [12] описано разработанное и запатентованное бесконтактное устройство контроля, основанное на изменении индуктивности L обмотки управляющего электромагнита в зависимости от величины воздушного зазора δ в его магнитной цепи:

$$L = W^2 \mu_0 \frac{S_{\Pi}}{2\delta}, \quad (1)$$

где W – число витков обмотки; S_{Π} – суммарная площадь полюсов магнитопровода; δ – воздушный зазор между якорем и полюсами магнитопровода.

Практическая реализация динамических методов бесконтактного контроля основана на анализе кривой изменения тока в обмотке электромагнита путем обработки кривой нарастания тока $I(t)$ в обмотке электромагнита после подачи на нее питающего напряжения и фиксации факта срабатывания ЭММ при наличии характерного провала в этой кривой при движении якоря, вызванного наведением против ЭДС [12]. Контроль за состоянием осуществляют путем выделения переменной составляющей тока обмотки и преобразования ее в прямоугольные импульсы. При движении якоря, т.е. при срабатывании механизма, величина времени между импульсами определяется временем движения якоря и превышает длительность интервалов между импульсами в питающем напряжении. Полученные таким образом сигналы обрабатывают и формируют контрольные прямоугольные импульсы, количество которых не зависит от наличия пульсаций в питающем напряжении, а определяется только состоянием механизма.

Алгоритмы системы диагностики путем анализа зависимостей кривых тока $I(t)$ и

потокоцепления $Psi(t)$ в обмотке электромагнита приведены в [17]. Частотную составляющую полученных сигналов развертывают во времени с использованием аппарата вейвлет-преобразования. Состояние диагностируемого ЭММ определяют путем сравнения выбранных частотных диапазонов вейвлет-спектра информативных сигналов с заранее полученной библиотекой характеристик соответствующего электромагнита.

Недостатком этих способов диагностики электромагнитного механизма является их низкая информативность, поскольку контроль осуществляется по факту движения якоря, т.е. только в переходных режимах работы, что не позволяет оценить текущее состояние механизма в установившемся режиме работы.

В [18] предложен бездатчиковый метод определения положения подвижного элемента электрических машин возвратно-поступательного действия, согласно которому положение подвижного элемента определяют по параметрам напряжения обмоток. Предложенный контроль базируется на том, что амплитуда сигнала и его период изменяются в зависимости от ускорений и замедлений подвижного элемента. Проводят измерения напряжений обмоток и полученные данные используют как координаты обобщенного вектора, находящегося в неподвижной трехфазной системе координат. Однако предложенный способ для диагностики силовых и коммутационных электромагнитных механизмов использовать нецелесообразно.

Возможность диагностики электромеханической системы путем подачи на ее вход прямоугольного сигнала и анализа изменения энергии выходного сигнала, обусловленного изменением состояния объекта, путем сравнения с эталонным значением, показана в [19].

Новая концепция построения систем контроля ЭММ была предложена в [20, 21]. Ее суть заключалась в том, что предлагается инициировать новые физические эффекты, которые не связаны с рабочим режимом ЭММ и не влияют на его качество. Предлагается дополнительно воздействовать на ЭММ высокочастотным электрическим полем, которое возбуждает в магнитопроводе соответствующие высокочастотные электродинамические процессы, не связанные с рабочими режимами ЭММ. В этом случае ЭММ дополнительно выступает в качестве электромагнитного датчика, регистрирующего необходимые параметры высокочастотных электродинамических процессов, значения которых определяются как состоянием его магнитопровода, так и текущим состоянием самого ЭММ, в частности, положением якоря относительно магнитопровода. Иными словами, в магнитопроводе ЭММ одновременно существуют два независимых друг от друга электродинамических процессов: низкочастотный, определяемый рабочим током, и высокочастотный, возбуждаемый внешним источником низковольтного ВЧ-напряжения. Для этого ЭММ дополняется новым функциональным элементом – блоком вибраторных С-антенн, выполненным в виде разъемного пространственного конденсатора, на внешней поверхности несущего цилиндрического диэлектрического основания которого находятся профильные многосекционные пространственно распределенные обкладки. Каждая пара соседних секций образует своеобразный электрический диполь (вибратор), который и является элементарным антенным излучателем ВЧ-электромагнитного поля. Недостатком этого способа диагностики на «отражение» является необходимость установки на магнитопроводе блока вибраторных С-антенн.

Проведенный анализ показал, что в настоящее время отсутствуют универсальные способы и устройства диагностики ЭММ, обеспечивающие достоверный контроль их тяговых электромагнитов. Решение этой задачи требует разработки новых подходов диагностики ЭММ, которые позволят своевременно принимать меры по отключению неисправных устройств.

Результаты работы

С целью расширения эксплуатационных возможностей способа диагностики ЭММ путем обеспечения комплексного контроля его текущего состояния был разработан универсальный бесконтактный способ диагностики эксплуатационного состояния ЭМУ. Он основан на эффекте вихревых токов. Фактически управляющий электромагнит ЭМ, состоящий из магнитопровода и обмотки, представляют собой вихретоковый накладной параметрический преобразователь с ферромагнитным сердечником полуброневое типа, а подвижный элемент (якорь) – объект контроля. При этом, согласно предложенному способу, обмотка управляющего электромагнита совмещает в себе функции источника и приемника электромагнитного излучения.

На рис. 1 показана структурная блок-схема устройства, реализующего предложенный способ диагностики ЭММ, 1 – управляющий электромагнит диагностируемого ЭММ, содержащий обмотку с индуктивностью L_1 и активным сопротивлением r_1 ; 2 – подвижный элемент (якорь) диагностируемого ЭМ; 3 – НЧ-фильтр, состоящий из электрических дросселей; 4 – генератор ВЧ низковольтного напряжения; 5 – измерительно-вычислительное устройство; C_1 и C_2 – разделительные электрические конденсаторы

соответственно генераторной и измерительной электрических цепей, выполняющие функции ВЧ-фильтров; \dot{U}_n – НЧ высоковольтное рабочее напряжение питания ЭМ; \dot{E}_1 – ВЧ низковольтное выходное напряжение генератора 4; \dot{I}_1 – ток ВЧ через электрическую обмотку электромагнита диагностируемого ЭМ; \dot{U}_1 – ВЧ низковольтное напряжение на электрической обмотке электромагнита диагностируемого ЭМ.

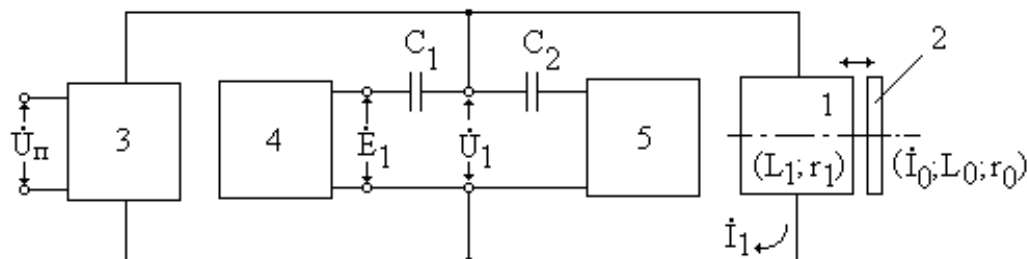


Рис.1. Структурная блок-схема устройства, реализующего предложенный способ диагностики ЭММ

При подаче ВЧ-напряжения \dot{E}_1 генератора 4 на обмотку управляющего электромагнита 1 через разделительный электрический конденсатор C_1 , который дополнительно выполняет функции элемента делителя напряжения, в окружающем пространстве возбуждается зондирующее электромагнитное поле, которое в якоре 2 будет индуцировать вихревые токи. Переизлученное электромагнитное поле этих вихревых токов, направленное по закону Ленца противоположно зондирующему электромагнитному полю, воздействует на обмотку управляющего электромагнита 1, наводя в ней соответствующую ВЧ ЭДС, определяемую потокоцеплением. Указанная ЭДС, параметры которой функционально связаны с пространственным расположением якоря относительно магнитопровода управляющего электромагнита и с физико-технологическими характеристиками якоря, вызывает изменение ВЧ низковольтного напряжения \dot{U}_1 на зажимах обмотки управляющего электромагнита 1.

ВЧ низковольтное напряжение \dot{U}_1 через разделительный электрический конденсатор C_2 измерительной цепи поступает на измерительно-вычислительное устройство 5, которое регистрирует параметры этого ВЧ-напряжения и алгоритмически определяет значения диагностического параметра.

Необходимый уровень «развязки» между источником высоковольтного НЧ-напряжения и источником низковольтного ВЧ-напряжения обеспечивается за счет использования НЧ-фильтра 3, содержащего подавляющие высокие частоты электрические дроссели, и ВЧ-фильтра в виде разделительного электрического конденсатора C_1 генераторной цепи, являющегося элементом последовательного колебательного контура.

ВЧ фильтр в виде разделительного электрического конденсатора C_2 измерительной цепи измерительного устройства 5 позволяет выделить ВЧ низковольтное напряжение \dot{U}_1 , несущее информацию о диагностическом параметре, обеспечивая при этом соответствующую развязку от низкочастотного высоковольтного напряжения \dot{E}_1 , питающего ЭМ.

Для повышения эффективности измерений ВЧ зондирующее электромагнитное поле возбуждают на резонансной частоте последовательного колебательного контура, образованного индуктивностью L_1 обмотки ЭМ и разделительным электрическим конденсатором C_1 , дополнительно выполняющим функции элемента делителя напряжения.

При настройке данного электрического контура в указанный резонансный режим обеспечивается увеличение точности измерения диагностического параметра в Q_1 раз, где $Q_1 = \omega L_1 / r_1$ – добротность электрического колебательного контура.

Интенсивность наводимых в якоре 2 вихревых токов зависит от взаимного положения якоря 2 и магнитопровода управляющего электромагнита 1, а также от текущих физических параметров якоря 2, а именно, от его удельной электрической проводимости σ_0 , от магнитной проницаемости μ_0 , от состояния поверхности, от наличия и размеров дефектов, от ориентации относительно оси управляющего электромагнита. Величины σ_0 и μ_0 , в свою очередь, определяются многими факторами, например, химическим составом и

структурным состоянием материала якоря, его температурой, наличием механических напряжений в нем и т.д.

Это позволяет применить данный способ для комплексной диагностики электромагнитного механизма, в частности, для контроля величины рабочего зазора между якорем и магнитопроводом управляющего электромагнита электромагнитного механизма, например, между полумуфтами дисковой фрикционной муфты.

Обоснование предлагаемого способа диагностики текущих параметров ЭМ по величине ЭДС, наведенной в его обмотке электромагнитным полем вихревых токов якоря, заключается в следующем.

При отсутствии якоря 2 коэффициент взаимной индукции M_1 между обмоткой управляющего электромагнита и якорем равен нулю. Напряжение на выходном контуре E_1 генератора ВЧ низковольтного напряжения 4 при условии, что внутреннее его активное сопротивление $r_1=0$, определится выражением:

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right]. \quad (2)$$

Напряжение на индуктивности обмотки управляющего электромагнита в этом случае:

$$\dot{U}_L = \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1). \quad (3)$$

Если в пространственной рабочей зоне управляющего электромагнита 1 появляется якорь 2, имеющий условную индуктивность L_0 и сопротивление r_0 , то магнитный поток в пространстве, обусловленный контурным током \dot{I}_1 обмотки управляющего электромагнита, вызывает появление в электрическом контуре $L_0 r_0$ тока \dot{I}_0 . Контур $L_1 r_1$ под влиянием замкнутого эквивалентного контура $L_0 r_0$ расстраивается, что в итоге приводит к изменению напряжения \dot{U}_L .

Иными словами, при появлении якоря 2, между контуром $L_1 C_1$ и самим якорем появится соответствующая взаимосвязь, согласно которой аналитическое выражение для подобным образом взаимосвязанных контуров запишется в виде

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1^* \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] + j\omega M_1 \dot{I}_0; \\ j\omega M_1 \dot{I}_1^* + (r_0 + j\omega L_0) \dot{I}_0 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Так как $r_1=0$, то ЭДС генератора в обоих случаях будет неизменной, а во втором – изменится ток контура, т.е. станет равным \dot{I}_1^* .

Подставляя \dot{I}_0 из второго уравнения системы (4) в первое уравнение, определим:

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1^* \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right], \quad (5)$$

где $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}$.

Из полученного выражения видно, что в результате взаимодействия контуров $L_1 C_1$ и $L_0 r_0$ активное r_1 и реактивное x_L сопротивления контура $L_1 C_1$ изменились на величины

$$\Delta r_1 = \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0; \quad \Delta x_L = -j \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0. \quad (6)$$

Рассмотрим приращения напряжения на обмотке управляющего электромагнита 1. В соответствии с (3) и (6) напряжение на обмотке с индуктивностью L_1 при наличии якоря будет равно:

$$\dot{U}_L^* = \dot{I}_1^* \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right) \right] \quad (7)$$

В этом случае приращение напряжения определится из соотношения $\Delta \dot{U}_L = \dot{U}_L^* - \dot{U}_L$, т.е.

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{I}_1^* \left[\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right) \right] - \dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1) \quad (8)$$

С учетом того, что $\dot{I}_1 = \dot{E}_1 / r_1$, а $\dot{I}_1^* = \dot{E}_1 / Z_1$,

где

$$\dot{Z}_1 = \left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right), \quad (9)$$

для (8) можем записать:

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{E}_1 \left[\frac{\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 \right)}{\left(r_1 + \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} r_0 \right) + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2} \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right)} - \frac{(r_1 + j\omega L_1)}{r_1} \right] \quad (10)$$

Введя обозначение $k^2 = \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0^2}$, будем иметь:

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{E}_1 \left[\frac{(r_1 + k^2 r_0) + j(\omega L_1 - k^2 \omega L_0)}{(r_1 + k^2 r_0) + j \left(\omega L_1 - k^2 \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_1} \right)} - \frac{(r_1 + j\omega L_1)}{r_1} \right] \quad (11)$$

Принимаем в качестве допущения, что

$$M_1 \ll 1 \text{ и } \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 0.$$

Тогда выражение (11) можно упростить и представить в виде:

$$\Delta \dot{U}_L^* = \dot{E}_1 \left[\frac{(r_1 + k^2 r_0) + j(\omega L_1 - k^2 \omega L_0)}{(r_1 + k^2 r_0) - jk^2 \omega L_0} - \frac{(r_1 + j\omega L_1)}{r_1} \right] \quad (12)$$

Учтем, что добротность Q_1 измерительного контура равна

$$\omega L_1 / r_1 = Q_1. \quad (13)$$

Тогда формулу (12) преобразуем к виду:

$$\Delta \dot{U}_L^* = -\dot{E}_1 \frac{r_1}{(r_1 + k^2 r_0)^2} k^2 Q_1 (\omega L_0 + jr_0). \quad (14)$$

Приняв $\frac{r_1}{(r_1 + k^2 r_0)^2} \approx \frac{1}{r_1}$, получим:

$$\Delta \dot{U}_L^* = -\frac{\dot{E}_1}{r_1} k^2 Q_1 (\omega L_0 + jr_0) = \frac{\dot{E}_1}{r_1} k^2 Q_1 (r_0 - j\omega L_0) e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (15)$$

В этом случае модуль данного приращения напряжения можно представит в виде:

$$|\Delta \dot{U}_L^*| = \frac{|\dot{E}_1|}{r_1} \cdot \frac{\omega^2 M_1^2}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} Q_1 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} = \frac{|\dot{E}_1|}{r_1} \cdot \frac{\omega^2 M_1^2}{Z_0} Q_1 \quad (16)$$

Известно, что M_1 является экспоненциальной функцией зазора h , за величину которого принимают расстояние от торца магнитопровода до поверхности проводящей среды, в нашем случае до поверхности якоря ЭМ. Исходя из этого, можем записать [22]:

$$M_1 = M_0 e^{-\frac{3h}{R_s}}, \quad (17)$$

где M_0 – коэффициент взаимной индукции обмотки и ее «зеркального изображения» при нулевом зазоре; $R_s = a + (b/2)$ – эквивалентный радиус обмотки; a – радиус внутреннего сердечника магнитопровода обмотки; b – толщина обмотки.

С учетом соотношения (17) выражение (16) окончательно можем представить в следующем виде:

$$|\Delta \dot{U}_L^*| = \frac{|\dot{E}_1|}{r_1} \cdot \frac{\omega^2 M_1^2}{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} Q_1 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} = \frac{|\dot{E}_1|}{r_1} \cdot \frac{\omega^2}{Z_0} M_0^2 Q_1 e^{-\frac{6h}{R_s}} \quad (18)$$

Согласно полученному выражению (18), величина приращения напряжения на обмотке 1 резонансного контура зависит от пространственного расположения системы связанных контуров $L_1 C_1$ и $L_0 r_0$, определяемого коэффициентом M_1 , рабочей частоты ω , параметров эквивалентного контура якоря $L_0 r_0$, определяемых значениями $Z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}$, а также от параметров измерительного контура, т.е. контурного тока $\dot{I}_1 = \dot{E}_1 / r_1$ и добротности Q_1 . Следует отметить, в соответствии с выражением (18),

чувствительность колебательного контура в резонансном режиме возрастает в Q_1 раз.

Решая полученное уравнение относительно величины зазора h между якорем и магнитопроводом управляющего электромагнита ЭМ, получим

$$h = \frac{R_s}{6} \cdot \ln \left(\frac{|\dot{E}_1| \cdot \omega^2 \cdot M_0^2 \cdot Q_1}{|\Delta \dot{U}_L^*| \cdot r_1 \cdot Z_0} \right) = \frac{R_s}{6} \cdot \ln \left(S \cdot \frac{|\dot{E}_1|}{|\Delta \dot{U}_L^*|} \right), \quad (19)$$

где $S = \frac{\omega^2 \cdot M_0^2 \cdot Q_1}{r_1 \cdot Z_0}$ – коэффициент преобразования управляющего электромагнита в режиме

измерительной обмотки.

Таким образом, если подать высокочастотное напряжение \dot{E}_1 на колебательный контур $L_1 C_1$, настроенный на резонансную частоту, и при этом регистрировать изменения напряжения на этом контуре посредством измерительного устройства 6, то в соответствии с выражением (19) осуществляется непрерывный контроль величины зазора h между якорем и магнитопроводом управляющего электромагнита ЭМ в процессе его эксплуатации.

Из выражения (18) видно, что ЭДС (или напряжение) обмотки управляющего электромагнита ЭМ несет информацию не только о величине рабочего зазора между магнитопроводом и якорем, но и о целом ряде других физических параметрах якоря. Это обусловлено тем, что напряжение $|\Delta \dot{U}_L^*|$ зависит от сопротивления Z_0 якоря, которое, в свою очередь, зависит от его удельной электрической проводимости σ_0 , от магнитной проницаемости μ_0 , от состояния поверхности, от наличия и размеров дефектов. Регистрируемое напряжение зависит и от подобных физических параметров самого управляющего электромагнита.

Применяя различные алгоритмические и аппаратные методы разделения информации об отдельных параметрах якоря и управляющего электромагнита фактически можно диагностировать текущее состояние этих функциональных узлов и контролировать рабочие режимы ЭММ в целом.

Выводы

Высокая степень информационной избыточности разработанного способа диагностики состояния силовых и коммутационных электромагнитных механизмов позволяет эффективно осуществлять их многопараметровый эксплуатационный контроль.

Предложенный способ диагностики состояния функциональных элементов ЭММ имеет простую схемотехническую реализацию и позволяет эффективно осуществлять оперативный неразрушающий контроль как для ЭММ с переменными, так и с постоянными источниками рабочего напряжения питания в режиме активного функционирования ЭММ.

Литература

1. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА. М.: Радио и связь, 1991. 352 с.
2. Белов М.П. Технические средства автоматизации и управления. СПб: СЗТУ, 2006. 184 с.
3. Соколова Е.М. Электрическое и электромеханическое оборудование: Общепромышленные механизмы и бытовая техника. М.: Academia, 2015. 648 с.
4. Верников А.Я. Магнитные и электромагнитные приспособления в металлообработке. М.: Машиностроение, 1984. 157с.
5. Furlani E.P. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. San Diego, Academic Press, 2001. 518 p.
6. Orthwein W. C. Clutches and Brakes: Design and Selection. CRC Press, 2004. 300p.
7. Albers A., Deters L., Feldhusen J., Leidich E. Kupplungen und Bremsen // Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinen elementen für Antrieb sauf gaben.2006. pp.279-368.
8. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т. Электромагнитные механизмы с постоянными магнитами и схемы их управления для систем автоматики. Бишкек: Илим, 2008. 274 с.
9. Isermann R. Mechatronic Systems: Fundamentals. London: Springer, 2005. 624 p.
10. Lyshevski S.E. Mechatronics and Control of Electromechanical Systems. Boca Raton: CRCPress, 2017. 486 p.
11. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. М.: Феникс, 2006. 320 с.
12. Бочкарев И.В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 2001. 288 с.
13. Щучинский С.Х. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152с.
14. Popov N.P., Il'in, A.Y. Trends in development of automatically controlled pipeline valves // Chemical and Petroleum Engineering, 1995, Volume 31, Issue 3. pp 150-153.
15. Gatica C.P., BoschmannA. Enabling Self-Diagnosis of Automation Devices through Industrial Analytics. In book: Machine Learning for Cyber Physical Systems.2019.V. 9. pp 107-115.

16. Bochkarev I.V., GalbaevZh. T. Development of frictional couplings and brake with a magnetoelectric drive // *Russian Electric Engineering*. NewYork, AllertonPress, Inc. 2009. V. 80, N.7. pp. 371-375.

17. Дубров В.И. Интеллектуальная диагностика электромагнитных механизмов на базе нейронных сетей // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 4. С. 40-47.

18. Гибадуллин Р.Р., Цветков А.Н., Ившин И.В., и др. Бездатчиковый метод контроля положения подвижного элемента электрической машины возвратно-поступательного действия // *Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики*. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 133-143.

19. Dovban S.N., Veselov O.V. Technical diagnostics of electromechanical systems based on the analysis of distorted output signal // *Automation and Remote Control*. 2012. V. 73, Issue 11. pp 1902-1909.

20. Bochkarev I.V., Bryakin I.V., KhramshinV.R., Voronin S.S. Diagnostics of Electromagnetic Friction Brakes and Clutches // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019. pp. 447-452.

21. Бочкарев И.В., Брякин И.В. Способ диагностики электромагнитного механизма. Патент РФ № 2659868 // Опубликовано 04.07.2018. Бюл. № 19.

22. Фрайден Дж. *Современные датчики*. М.: Техносфера, 2006. 592 с.

Авторы публикации

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Заслуженный изобретатель КР.

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией информационно-измерительных систем, Институт автоматизации и информационных систем НАН КР.

References

1. Kazakov LA. *REE electromagnetic devices*. M.: Radio and communications, 1991. 352 p.
2. Belov MP. *Technical means of automation and control*. St. Petersburg: SZTU, 2006. 184 p.
3. Sokolova EM *Electrical and electromechanical equipment: General industrial machinery and household appliances*. M.: Academia, 2015. 648 с.
4. Vernikov AYа. *Magnetic and electromagnetic devices in metalworking*. M.: Mechanical Engineering, 1984. 157 p.
5. Furlani EP. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. San Diego, Academic Press, 2001. 518 p.
6. Orthwein WC. *Clutches and Brakes: Design and Selection*. CRC Press, 2004. 300 p.
7. Albers A., Deters L., Feldhusen J., Leidich E. Kupplungen und Bremsen. *Konstruktions elemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinen elementen für Antriebs aufgaben*. 2006. pp. 279-368.
8. Bochkarev IV, GalbaevZh. T. *Electromagnetic mechanisms with permanent magnets and their control circuits for automation systems*. Bishkek: Ilim, 2008. 274 p.
9. Isermann R. *Mechatronic Systems: Fundamentals*. London: Springer, 2005. 624 p.
10. Lyshevski SE. *Mechatronics and Control of Electromechanical Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 486 p.
11. Karnaukhov NF. *Electromechanical and mechatronic systems*. M.: Phoenix, 2006. 320 s.
12. Bochkarev IV. *High-speed electromechanical braking devices for electric motors*. M.: Energoatomizdat, 2001. 288 s.
13. Schuchinsky S.Kh. *Electromagnetic actuator actuators*. M.: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
14. Popov NP, Il'in AY. Trends in development of automatically controlled pipeline valves. *Chemical and Petroleum Engineering*. 1995;31(3):150-153.
15. Gatica CP, Boschmann A. Enabling Self-Diagnosis of Automation Devices through Industrial Analytics. In book: *Machine Learning for Cyber Physical Systems*. 2019;9:107-115.
16. Bochkarev IV, Galbaev ZhT. Development of frictional couplings and brake with a magnetoelectric drive. *Russian Electric Engineering*. New York, Allerton Press, Inc. 2009; 80(7):371-375.
17. Dubrov VI. Intelligent diagnosis of electromagnetic mechanisms based on neural networks // *Modern problems of science and education*. 2013;4:40-47.
18. Gibadullin RR, Tsvetkov AN, Ivshin IV, et al. Non-sensor method for controlling the position of a movable element of an electric reciprocating machine. *News of Higher Education Institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2017;19(7-8):133-143.
19. Dovban SN, Veselov OV. Technical diagnostics of electromechanical systems based on the analysis of distorted output signal. *Automation and Remote Control*. 2012;73(11):1902-1909.
20. Bochkarev IV, Bryakin IV, KhramshinVR, et al. *Diagnostics of Electromagnetic Friction Brakes and Clutches*. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering

(EIconRus). 2019.pp. 447-452.

21. Bochkarev IV, Bryakin IV. *Method for diagnosing the electromagnetic mechanism*. RF patent No. 2659868. Posted on 07/04/2018. Bull. Number 19.

22. Friden J. *Modern sensors*. М.: Technosphere, 2006.592 P.

Authors of the publication

Igor V. Bochkarev – Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan.
Email: elmech@mail.ru.

Ivan V. Bryakin – Institute of Automation and Information Technology of the National Academy of Sciences Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan. Email: bivas2006@yandex.ru.

Поступила в редакцию

19 марта 2020 г.