



УДК 621.321

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

*А. М. Ланкин*

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск

В данной статье проведен анализ методов контроля функционального состояния высоковольтных электромагнитных выключателей. Рассмотрены процессы, происходящие в электромагнитных механизмах и основные контролируемые характеристики и параметры. Исследованы существующие подходы к функциональной диагностике электромагнитных механизмов.

**Ключевые слова:** электрические подстанции, функциональная диагностика, экспресс-контроль, силовой масляный трансформатор, высоковольтный электромагнитный выключатель.

## ANALYSIS OF METHODS FOR MONITORING THE FUNCTIONAL STATE OF HIGH VOLTAGE ELECTROMAGNETIC CIRCUIT BREAKERS

*A. M. Lankin*

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

This article analyzes methods for monitoring the functional state of high-voltage electromagnetic switches. The processes occurring in electromagnetic mechanisms and the main controlled characteristics and parameters are considered. Existing approaches to functional diagnostics of electromagnetic mechanisms are investigated.

**Keywords:** electrical substations, functional diagnostics, express control, power oil transformer, high-voltage electromagnetic switch.

Электромагнитный выключатель — высоковольтный коммутационный аппарат, предназначенный для оперативного включения и отключения отдельных цепей или электрооборудования в энергосистеме в нормальных или аварийных режимах посредством приведения в движение электромагнитного привода.

Электромагнитные выключатели имеют ряд преимуществ перед масляными и пневматическими. Они не требуют для работы масла или сжатого воздуха, допускают большое количество включений и отключений без ремонта. Отсутствие масла упрощает эксплуатацию выключателя, делает его полностью взрыво- и пожаробезопасным.

Высоковольтный масляный выключатель состоит из:

1. контактной системы с дугогасительным устройством,
2. токоведущих частей,
3. корпуса,
4. изоляционной конструкции
5. приводного механизма (электромагнитный механизм).

Таким образом, наиболее ответственным элементом высоковольтного масляного выключателя является электромагнитный механизм.

Основные процессы, происходящие в электромагнитном механизме описываются уравнениями [1]:

Уравнение электрической цепи обмотки электромагнита:

$$U = IR + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1.1)$$



где  $U$  – напряжение на обмотке;  $I$  – ток, протекающий через обмотку;  $R$  –

активная составляющая сопротивления обмотки;  $\frac{d\psi}{dt}$  – скорость изменения потокосцепления  $\psi$ , пронизывающего обмотку, за время  $t$ .

Уравнение (1.1) дает возможность произвести анализ первой стадии энергетических преобразований в электромагните – процесса преобразования электрической энергии, поступающей от источника, в энергию магнитного поля.

Уравнение характеристики намагничивания электромагнита или вебер-амперная характеристика:

$$\psi = f_2(I, \delta) \quad (1.2)$$

связывает потокосцепление  $\Psi$ , ток в обмотке  $I$  и рабочий зазор  $\delta$ .

Эта характеристика сильно зависит от магнитных свойств материала магнитопровода.

Характер кривой намагничивания электромагнита и ее видоизменения при перемещении якоря определяют возможность преобразования магнитной энергии в механическую и величину действующей в данный момент электромагнитной силы.

Уравнение силы электромагнитного притяжения

$$F_3 = f_3(W_m), \quad (1.3)$$

возникающей как результат энергетических преобразований и являющейся функцией запаса энергии  $W_m$ , сосредоточенной в магнитном поле электромагнита.

Уравнение движение имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_3 - F_n - F_c \left( \frac{dx}{dt} \right), \quad (1.4)$$

где  $m$  – приведенная масса движущихся частей;  $x$  – перемещение якоря;  $F_c(dx/dt)$  – сила сопротивления, зависящая от скорости движения.

Уравнение (1.4) характеризует механические процессы, происходящие при срабатывании электромагнита.

Уравнение нагрева и охлаждения электромагнита

$$\vartheta = f_4(P, t_{\text{вкл}}, \text{размеры}), \quad (1.5)$$

связывает температуру нагрева  $\vartheta$  с мощностью  $P$ , выделяющейся в обмотке, размерами электромагнита и временем включенного состояния  $t_{\text{вкл}}$ .

Основными регламентируемыми характеристиками по ГОСТ [2] являются: Статическая тяговая характеристика  $F=f(\delta)$  (рисунок 1 – кривая 1).

Динамическая тяговая характеристика  $F_d=f(\delta)$  (рисунок 1 – кривая 2).

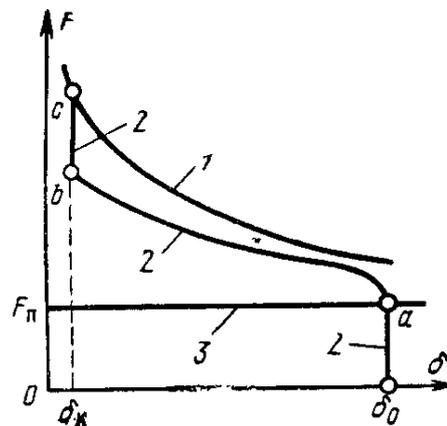


Рис. 1. Тяговые характеристики электромагнита

Кривая 1 представляет собой статическую тяговую характеристику, соответствующую установившемуся значению тока в обмотке. Кривая 3 — это характеристика противодействующей, возвратной пружины, сила которой условно принята постоянной, не изменяющейся при движении якоря. Динамическая тяговая характеристика (кривая 2) начинается с точки  $\delta_0$ . При неизменном рабочем зазоре  $\delta_0$ , соответствующем отпущенному состоянию якоря,  $F_{эм}$  нарастает. Точка а примерно соответствует началу движения якоря, а точка b — его окончанию. В стадии движения зазор уменьшается, а динамическая характеристика 2 лежит ниже статической 1, так как ток в катушке меньше установившегося значения. В последней, третьей стадии, когда якорь не движется и зазор равен конечному  $\delta_k$ , электромагнитная сила нарастает до соответствующей статическому состоянию (отрезок b-c) согласно с ростом тока в обмотке до установившегося значения.

Движение якоря во времени  $\delta=f(t)$  (рисунок 2а).

Ток в обмотке во времени  $i=f(t)$  (рисунок 2б).

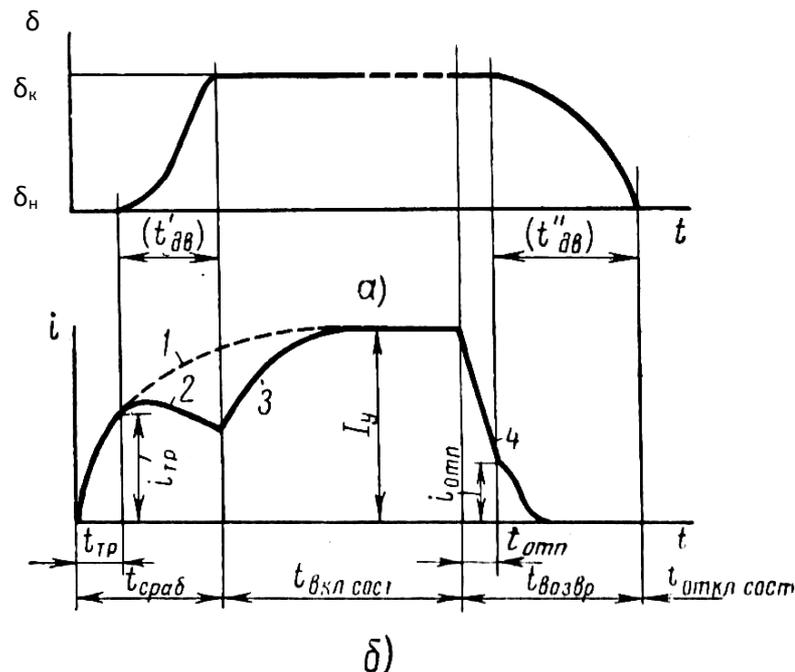


Рис. 2. Характеристики электромагнита: а) движения якоря во времени; б) ток в обмотке во времени.



Работа электромагнита как правило имеет циклический характер. Это определяется тем, что якорь электромагнита, используемого в качестве привода, совершает перемещение в ограниченных пределах и, следовательно, требуется обеспечить его возврат в исходное положение.

Первым этапом рабочего цикла (рисунок 2) является процесс срабатывания электромагнита. Он начинается с момента подачи питания на обмотку электромагнита и заканчивается, когда якорь перейдет из своего начального положения  $\delta_H$  в конечное  $\delta_k$  (рисунок 2а), и разделяется на период трогания якоря и период его движения.

В период трогания ток в обмотке электромагнита нарастает до величины  $i_{тр}$  обеспечивающей равенство электромагнитной силы силам, противодействующим движению. После этого якорь приходит в движение. Время трогания  $t_{тр}$ , в течение которого ток нарастает до тока трогания, определяется как схемой включения обмотки электромагнита и условиями ее питания, так и параметрами самого электромагнита и его нагрузки.

Характер движения зависит от соотношения движущих (электромагнитных) и противодействующих сил, а также массы движущихся частей и силы трения. В период движения при срабатывании совершается та работа, которую должен произвести электромагнит. Поэтому с точки зрения оценки конструкции электромагнита, анализа его параметров, рассмотрение процессов, происходящих при перемещении якоря электромагнита, является весьма важной и ответственной стадией анализа полного цикла его работы. Ток в обмотке электромагнита в процессе движения его якоря, как правило, изменяется (кривая 2 рисунок 1.5б). Его изменения связаны как с процессом установления тока в обмотке, который имел бы место при неподвижном якоре (кривая 1 рисунок 1.5б), так и возникновением противо-ЭДС, связанной с движением якоря. Период движения определяет время движения при срабатывании  $t'_{дв}$ , которое совместно с временем трогания составляет время срабатывания.

После окончания перемещения якоря следует период включенного состояния, в течение которого система находится в покое, а обмотка остается во включенном состоянии. В начальной стадии этого периода ток в обмотке электромагнита нарастает до установившегося значения (кривая 3, рисунок 1.5б), после чего, если не изменяются напряжение питания и сопротивление обмотки, ток остается неизменным.

Процесс возврата якоря в исходное состояние, так же как и срабатывание, происходит двумя ступенями. Сначала при отключении обмотки ток спадает до величины тока отпускания  $i_{отп}$ , при котором электромагнитная сила становится равной силе, стремящейся возвратить якорь в исходное положение. Длительность этого процесса характеризуется промежутком времени  $t_{отп}$ , зависящим от нагрузки, условий отключения обмотки и от задерживающего действия вихревых токов в массивных частях электромагнита и короткозамкнутых контурах, если такие имеются. Перемещение подвижных частей в исходное положение происходит



в течение времени  $t''_{дв}$ , зависящим от ряда факторов и в первую очередь от величины отбрасывающих якорь усилий. Процесс возврата, так же как и процесс срабатывания, определяет динамические свойства электромагнита. Особую роль он играет в электромагнитах замедленного действия. Совокупность времени отпущения и времени, движения в процессе возврата составляет время возврата  $t_{возвр}$ .  
Нагрев и охлаждение во времени  $\Theta=f(t)$  (рисунок 3).

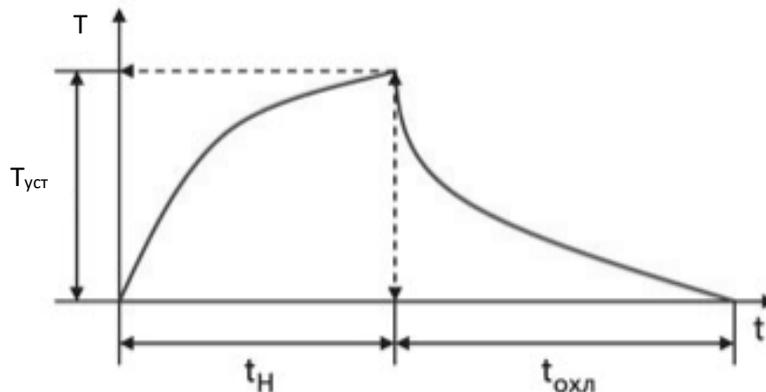


Рис. 3. Характеристика нагрева и охлаждения во времени

На рисунке 3 представлена характеристика нагрева и охлаждения во времени, где  $t_n$  – время нагрева электромагнита,  $t_{охл}$  – время охлаждения электромагнита,  $T_{уст}$  – установившаяся температура после нагрева. Стоит отметить, что нагрев и охлаждение происходят по функции экспоненты.

Зависимость магнитного потока от тока  $\Phi=f(i)$  при фиксированных значениях зазора  $\delta$  (рисунок 4).

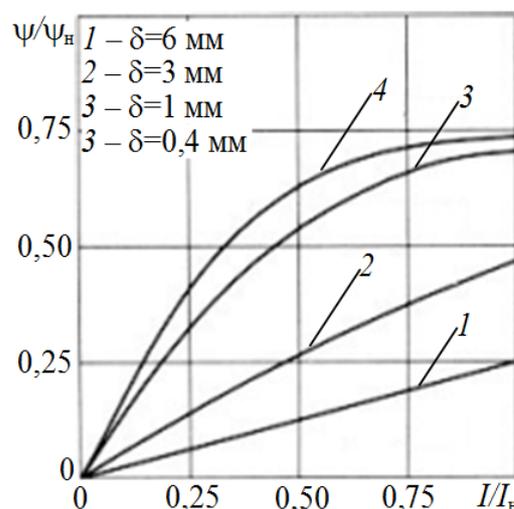


Рис. 4. Характеристика магнитного потока от тока при фиксированных значениях зазора

На рисунке 4 показаны характеристики зависимости магнитного потока от тока в нормированных значениях при различных фиксированных значениях зазора  $\delta$ .



Каждая группа показателей требует применения своих методов и средств испытания пропорциональных электромагнитов. Данная ситуация стимулирует поиск интегральных характеристик электромагнитов, позволяющих сделать выводы о качестве его отдельных частей и эксплуатационных свойствах всего изделия.

В работах [1, 3, 4] показано, что имея динамическую характеристику намагничивания электромагнита (рис. 5) можно рассчитать большинство характеристик регламентированных ГОСТ.

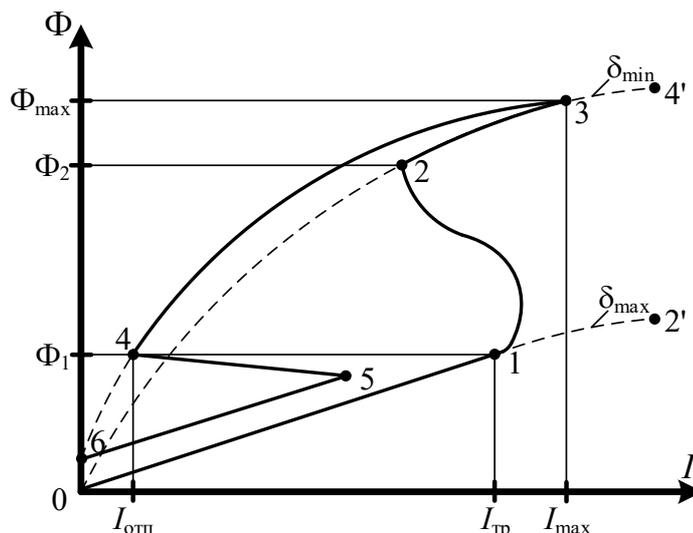


Рис. 5. Динамическая характеристика намагничивания электромагнита

После подачи питания, ток в обмотке достигает значения тока трогания, которому соответствует точка 1. В это мгновение якорь приходит в движение, в процессе которого рабочий зазор  $\delta$  уменьшается, индуктивность обмотки растет, а ток в ней падает до тех пор, пока якорь не притянется к сердечнику, чему соответствует точка 2. Во время движения якоря связь между магнитным потоком  $\Phi$  и током  $I$  определяется кривой 1-2. По окончании движения якоря ток опять начинает возрастать, достигая установившегося значения в точке 3. После отключения питания электромагнита, ток в обмотке падает и при достижении значения тока отпускания  $I_{отп}$ , (точка 4), якорь приходит в движение, а рабочий зазор увеличивается от минимального  $\delta_{min}$  до максимального  $\delta_{max}$ . Точка 5 соответствует окончанию движения якоря электромагнита. Далее ток спадает до нуля, чему соответствует точка 6. Из-за остаточной намагниченности магнитопровода поток, соответствующий точке 6, больше нуля.

В [1, 3, 4] показано как из динамической характеристики намагничивания определить электромагнитную силу.

Сила электромагнитного притяжения определяются характером зависимости потокосцепления от положения якоря и тока в его обмотке, т. е. зависит от вида характеристики намагничивания. Энергия, преобразуемая в электромагните в процессе перемещения его якоря в механическую энергию, проявляется в виде электромагнитной силы:

$$F_s = \int_0^{i_s} \frac{d\Psi}{ds} di$$



В [3] описано получение временных параметров срабатывания из этой же характеристики.

Время срабатывания электромагнитов состоит из: времени трогания и времени движения. Время трогания  $t_{тр}$  – промежуток времени с момента подачи импульса на обмотку электромагнита до момента начала движения якоря. Время движения  $t_{дв}$  – промежуток с момента начала движения якоря до полной его остановки.

Таким образом, время срабатывания:

$$t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}.$$

Время трогания  $t_{тр}$  равняется промежутку времени, в течении которого магнитный поток изменяется от нуля до значения, при котором произойдет трогание якоря (отрезок 0–1 на рис. 1.9):

$$t_{тр} = \int_0^{\Psi_{тр}} \frac{1}{U - iR} d\Psi.$$

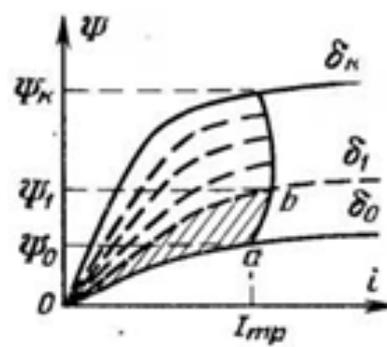


Рис. 6. Определения времени отпускания по динамической характеристике намагничивания электромагнита

Для определения времени движения [3] все перемещение  $\delta_0 - \delta_k$  разбивается на отрезки  $\delta_0 - \delta_1$ ,  $\delta_1 - \delta_2$  и т. д. (рисунок 6.). Для первого из  $n$  участков время движения:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta s_1}{d\delta} dt,$$

где  $\Delta s_1$  – пропорциональна площади 0–a–b.

Полное время движения якоря определяют, как сумму времени движения на всех  $n$  участках:

$$t_{дв} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n.$$

На основании того, что из динамической характеристики намагничивания можно получить большинство характеристик регламентированных ГОСТ, можно сделать вывод, что такая характеристика содержит латентную информацию о состоянии электромагнита. Таким образом, зная динамическую характеристику намагничивания электромагнита можно определить тяговые, временные и энергетические характеристики, следовательно ее можно использовать в качестве интегральной характеристики пропорционального электромагнита. В работах ряда авторов [5, 6] исследовано применение динамической характеристики намагничивания для определения типа неисправности электромагнита.



Динамическая характеристика намагничивания (ДХН) содержит важную диагностическую информацию, позволяющую судить о работоспособности электромагнита (ЭМ).

Для получения ДХН ЭМ необходимо воздействовать на магнитопровод изменяющимся магнитным полем и измерять возникающий в его сечении магнитный поток. Сложность задачи получения ДХН состоит в том, что в работающее изделие, как правило, невозможно внедрить магнитные сенсоры.

Рассмотрим средства получения ДХН, в которых источником магнитного поля является катушка ЭМ, а поток определяют косвенным образом.

Метод подстановки [7], заключается в том, что в цепь источника синусоидального напряжения включают поочередно или рабочую катушку ЭМ, или известные переменные индуктивность  $L_0$  и безреактивное сопротивление  $r$ . Последовательно с источником синусоидального напряжения включают амперметр и переменные индуктивность  $L$  и конденсатор  $C$ . Сначала при известном значении выходного напряжения  $U$  источника синусоидального напряжения, подключают к нему катушку испытуемого ЭМ и с помощью переменных индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ , цепь настраивают в резонанс, что фиксируют по максимальной величине тока  $I$  в намагничивающей цепи. Затем в цепь, вместо обмотки испытуемого образца, включают известные переменные индуктивность  $L_0$  и безреактивное сопротивление  $r$  и с их помощью цепь снова настраивают в резонанс. Причем, изменяя безреактивное сопротивление  $r$ , добиваются той же величины тока  $I$  в цепи (при этом величины  $L$  и  $C$  не изменяют). В момент резонанса индуктивность обмотки  $L_x$ , нанесенной на испытуемый образец равна известной переменной индуктивности  $L_0$ . Зная ее, рассчитывают индукцию  $B$  или поток  $\Phi$  магнитного поля в испытуемом образце по формулам:

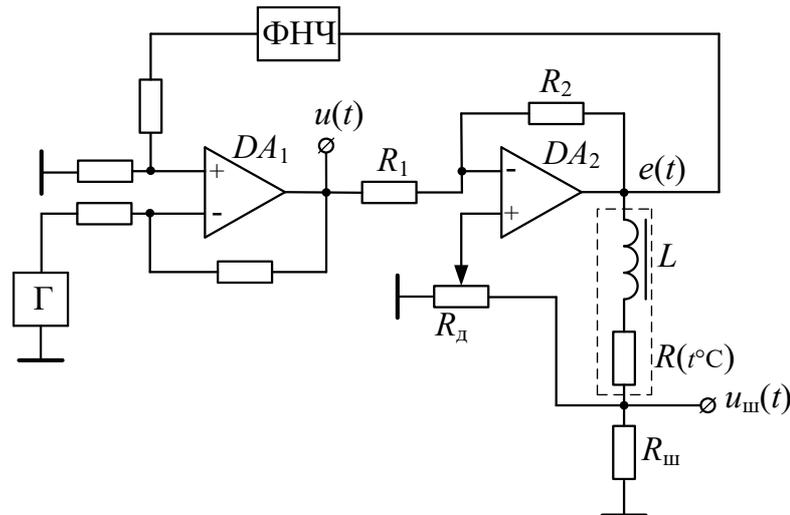
$$\Phi = \frac{L_0 \cdot I \cdot \sqrt{2}}{4\pi w} \quad (1.7)$$

где  $I$  – ток измеренный амперметром,  $w$  – число витков обмотки испытуемого образца.

Задают другие значения выходного напряжения источника синусоидального напряжения  $U$  и измеряя значения тока  $I$  в намагничивающей цепи вычисляют магнитный поток  $\Phi$  и получают требуемое количество точек ДХН.

Недостатком данного метода является то, что приемлемая точность обеспечивается только при синусоидальном изменении намагничивающего тока, в области малых магнитных полей, а при насыщении испытуемого образца, когда ток становится несинусоидальным, расчет по формуле дает большую погрешность.

«Рассмотрим устройства, в состав которых не входят сенсоры магнитных полей. На рисунке 7 изображено устройство для создания заданного режима изменения магнитной индукции [8].



**Рис. 7. Устройство для создания заданного режима изменения магнитной индукции**

Создание режима сводится к поддержанию желаемой формы ЭДС индукции  $e(t)$ . Намагничивающую обмотку представим индуктивностью  $L$  и резистором  $R_c$  сопротивлением, равным активному сопротивлению провода реальной обмотки. При достаточно большом коэффициенте усиления мощного операционного усилителя  $DA2$  и выполнении условий:

$$R_d \gg R_{ш}, \quad (1.8)$$

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + R(t^\circ C)/R_{ш}} - 1 = \frac{R_2/R_1 - R(t^\circ C)/R_{ш}}{1 + R(t^\circ C)/R_{ш}}, \quad (1.9)$$

будет справедливым равенство:

$$e(t) = -\frac{R_2}{R_1} u(t), \quad (1.10)$$

где  $R_{ш}$  – сопротивление шунта для измерения намагничивающего тока;  $R_3$  и  $R_4$  – сопротивление между движком делителя напряжения  $R_d$  его заземленным и незаземленным выводами соответственно.

Следовательно, магнитная индукция  $B(t)$  в испытуемом с поперечным сечением  $S$  при числе витков намагничивающей обмотки  $N$  будет следующим образом изменяться во времени:

$$B(t) = \frac{1}{NS} \cdot \frac{R_2}{R_1} \int u(t) dt, \quad (1.11)$$

т.е. однозначно определяется сигналом генератора.

Наличие гармоник сети в выходном напряжении задающего генератора оставит в силе выражения (1.10) и (1.11) ввиду глубокой обратной связи на низких частотах, замыкающейся через фильтр низкой частоты ФНЧ. В этом случае на выходе операционного усилителя  $DA1$  напряжение  $u(t)$  представляет собой противофазный сигнал генератора, свободный от низкочастотных составляющих.

Необходимое для выполнения условия (1.9) положение движка делителя напряжения устанавливается по нулевому напряжению на выходе мощного



операционного усилителя DA2 при ограниченном на время этой операции его выходном токе и закороченном выходе задающего генератора.

Напряженность магнитного поля в образце  $H(t)$  связана с падением напря-

жения на шунте  $u_{ш}(t)$  выражением: 
$$H(t) = \frac{N u_{ш}(t)}{l_{cp} R_{ш}}$$
, где  $l_{cp}$  – длина средней магнитной линии в образце. Устройство имеет полосу пропускания в сотни кГц и не требует частотной перестройки. Заданный режим поддерживается независимо от сопротивлений обмотки и шунта. Средство измерения магнитной индукции подключается своим входом к выходу операционного усилителя DA1. Благодаря этому, во-первых, его входное сопротивление не влияет на результат измерения, поскольку выходное сопротивление усилителя DA1, охваченного отрицательной обратной связью, мало отличается от нуля, и, во-вторых, изменяя величину резисторов R1 и R2, можно на разных частотах и для образцов различных размеров ограничиться одним пределом измерения указанного средства. Сигнал, пропорциональный намагничивающему току, т. е. напряженности магнитного поля, снимается с шунта.

Рассмотренное устройство позволяет расширить диапазон частот намагничивания до сотен кГц, не требует использования сенсоров магнитных полей и перестройки при изменении частоты намагничивания, имеет близкое к нулю выходное сопротивление в канале измерения магнитной индукции.

На рисунке 8 изображена схема «бессенсорного» устройства для испытания ЭМ [9].

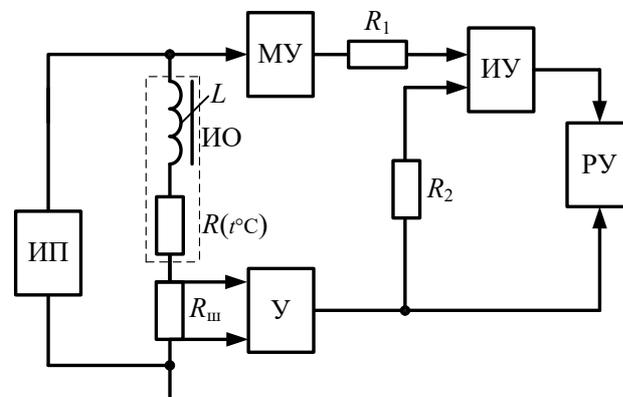


Рис. 8. Схема «бессенсорного» устройства для испытания ЭМ

Устройство содержит источник питания ИП, рабочую обмотку изделия из ферромагнитных материалов с индуктивностью  $L$  и активной составляющей сопротивления  $R$ , нанесенную на испытуемый образец ИО, измерительный шунт  $R_{ш}$ , масштабирующее устройство МУ, интегросуммирующий усилитель ИУ, регистрирующее устройство РУ, усилитель У.

Напряжение на выходе источника питания, определяется выражением (1.1). Перенеся  $IR$  в левую часть уравнения, и проведя интегрирование по времени, получим формулу, по которой интегросумматор рассматриваемого устройства вычисляет потокосцепление:

$$\psi = \int (U - IR) dt + C \quad (1.12)$$



Выражение (1.12) реализуется при соблюдении условия:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{k_{\text{му}} \cdot (R + R_{\text{ш}})}{k_{\text{у}} \cdot R_{\text{ш}}}, \quad (1.13)$$

где  $R_1, R_2$  – сопротивления резисторов, определяющих коэффициенты передачи по первому и второму входам интегросумматора;  $k_{\text{му}}$  – коэффициент передачи масштабирующего устройства;  $k_{\text{у}}$  – коэффициент усиления усилителя  $Y$ ;  $R_{\text{ш}}$  – сопротивление измерительного шунта.

Известна также схема мостового «бессенсорного» устройства для испытания ЭМ, схема которого приведена на рисунке 9 [10].

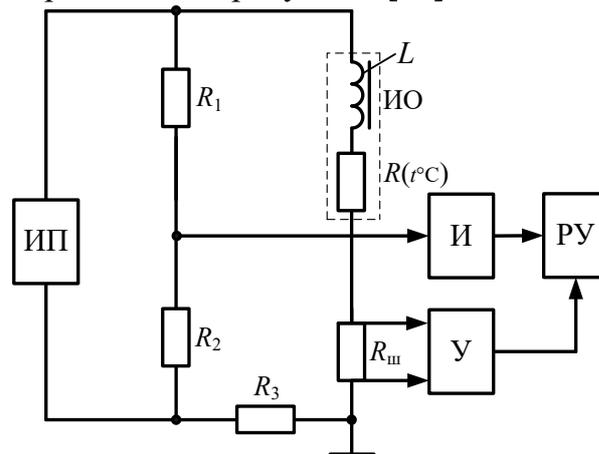


Рис. 9. Схема мостового «бессенсорного» устройства

На рисунке 9: ИП – источник питания; И – интегратор; У – усилитель; РУ – регистрирующее устройство.

Напряжение на выходе усилителя пропорционально току, а, следовательно, напряженности в образце. Интегратор вычисляет потокосцепление согласно выражению (1.12), которое реализуется при соблюдении условий:

$$R_1 = R_2, \quad R_3 = R + R_{\text{ш}}. \quad (1.14)$$

Данная схема легла в основу автоматической измерительной системы (АИС) MagHyst предназначенной для определения квазистатических характеристик магнитных материалов [11]. Ее функциональная схема приведена на рисунке 10.

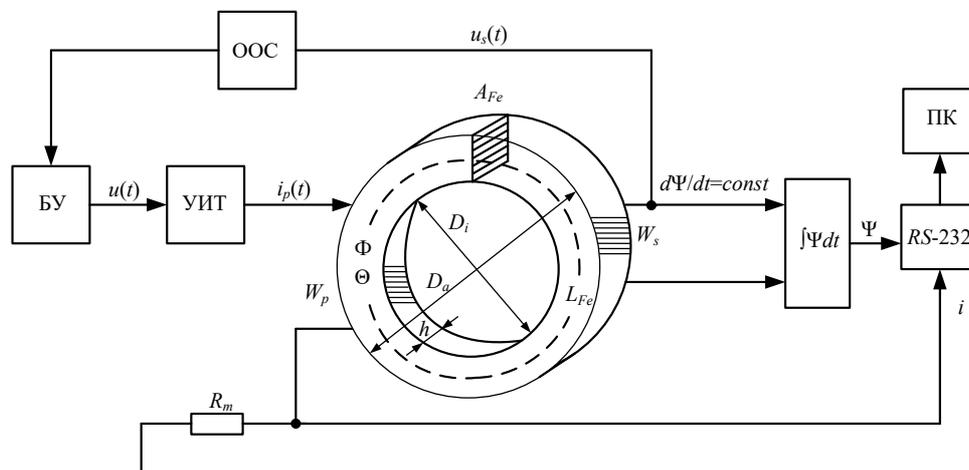


Рис. 10. Функциональная схема АИС MagHyst



На схеме введены следующие обозначения: БУ – блок управления; УИТ – управляемый источник тока; ООС – отрицательная обратная связь. Управляющее напряжение  $u(t)$  блока управления поступает в управляемый источник тока, осуществляющий изменение намагничивающего тока  $i_p(t)$ . Нагрузкой УИТ является намагничивающая обмотка  $W_p$  кольцевого испытуемого образца. Индуцируемая в измерительной обмотке  $W_s$ , при перемагничивании образца, ЭДС  $u_s(t)$  интегрируется и определяется потокосцепление  $\Psi$  в измерительной обмотке  $W_s$ . Для косвенного измерения напряженности магнитного поля по току  $i_p(t)$  в образце служит шунт  $R_m$ , включенный последовательно с намагничивающей обмоткой. Первичная (намагничивающая) и вторичная (измерительная) обмотки равномерно распределены по образцу. Образец имеет следующие геометрические размеры: площадь поперечного сечения  $A_{Fe}$ , длина средней линии  $L_{Fe}$ , внутренний диаметр  $D_i$ , наружный диаметр  $D_a$ , толщина  $h$ . Ток первичной обмотки  $i_p(t)$  вызывает намагничивающую силу  $\Theta$  и магнитный поток  $\Phi$  в образце.

Ниже приведены расчетные соотношения для определения значений  $H$  и  $B$  – усредненных по площади поперечного сечения образца напряженности магнитного поля и магнитной индукции.

$$\Theta = i_p \cdot W_p; \quad H = \frac{\Theta}{L_{Fe}}; \quad \Psi = \int u_s dt; \quad \Phi = \frac{\Psi}{W_s}; \quad B = \frac{\Phi}{A_{Fe}}.$$

Значения  $L_{Fe}$  и  $A_{Fe}$  определяются по формулам:

$$L_{Fe} = \frac{\pi(D_a + D_i)}{2}; \quad A_{Fe} = \frac{D_a - D_i}{2} h.$$

Измеряемые напряжения и токи отображаются на мониторе ПЭВМ в процессе измерения квазистатических характеристик. По окончании измерения, зависимости представляются в виде  $\Psi(I)$ ,  $\Phi(\Theta)$ ,  $B(H)$  и сохраняются в памяти ПЭВМ.

АИС Maghyst имеет возможность работать в «бессенсорном» режиме определения магнитных характеристик изделий. При этом используется рабочая обмотка изделия.

Рассмотренные методы позволяют определять динамическую характеристику намагничивания в виде массивов данных  $i(\Phi)$ , что затрудняет использование и дальнейшую обработку измерительной информации. Следовательно, необходима разработка метода определения динамической характеристики намагничивания в виде аппроксимирующих выражений.

Таким образом, в ходе работы был проведен анализ методов контроля функционального состояния высоковольтных электромагнитных выключателей. Рассмотрены процессы, происходящие в электромагнитных механизмах и основные контролируемые характеристики и параметры. Исследованы существующие подходы к функциональной диагностике электромагнитных механизмов

*Данная статья была подготовлена в ходе выполнения проекта № СП-1544.2019.1, реализуемого в рамках программы «Стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2019-2021 гг.»*

**Список цитируемой литературы**

1. Гордон А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока - М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. - 447с.
2. ГОСТ 19264-82 - Электромагниты управления. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 31 с.
3. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972, – 248 с.
4. Ковалев О.Ф. Комбинированные методы моделирования магнитных полей в электромагнитных устройствах. – Ростов н/Д.:Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 220 с.
5. Gadyuchko, A. Magnetische Messung - Neue Wege der Funktionsprüfung bei der Herstellung von Magnetaktoren / A. Gadyuchko, E. Kallenbach // Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik. – Würzburg. – 2010. – S. 59-64.
6. Ruderman, M. Phenomenological Modeling and Measurement of Proportional Solenoid with Stroke-dependent Magnetic Hysteresis Characteristics / M. Ruderman, A. Gadyuchko // IEEE International Conference on Mechatronics. – 2013. – P. 180-185.
7. Испытание магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376с.
8. Каплан Л. М. Родионов М. Н. Устройства для динамического намагничивания образцов магнитных материалов // Измерения параметров магнитных полей и испытания магнитных материалов.: сб. науч. тр. – Л., 1981. С. 111-114.
9. Испытание магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376с.
10. Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Магнитоизмерительные приборы и установки. – М.: Энергоатомиздат, 1982, 152 с.
11. Patent DE 10 2006 043 239 A1. Glet U.: Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von magnetischen Kenngrößen.