

УДК 681.527

К ВЫБОРУ ПРИНЦИПА БЕССЕНСОРНОЙ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДОВ

Шайхутдинов Д.В., Гречихин В.В., Январев С.Г., Леухин Р.И.,
Ахмедов Ш.В., Ланкин А.М.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Новочеркасск, e-mail: d.v.shaykhutdinov@gmail.com*

Настоящая статья посвящена обзору подходов и методов диагностики и прогнозирования технического состояния электромагнитных приводов. Текущие электрические и магнитные характеристики и параметры привода несут в основном информацию о его состоянии в некоторый конкретный момент времени и не позволяют сделать вывод о появлении возможных неисправностей в предстоящий период эксплуатации. Более эффективными считаются системы прогнозирующей диагностики, в которых путем анализа результатов аналогичных контрольных операций за некоторый предыдущий период времени решается задача предсказания изменения состояния объекта в будущие моменты времени. Достижение данной важной цели требует выбора наиболее подходящих диагностических подходов и методов получения прогноза, учитывающих особенности объектов диагностирования. В результате обзора и анализа методов диагностики электромагнитных приводов и математических принципов прогнозирования предложен принцип бессенсорной прогнозирующей диагностики на базе анализа изменения вебер-амперной характеристики во времени. Для определения вебер-амперной характеристики, соответствующей той или иной неисправности, предложено использовать натурно-модельный подход.

Ключевые слова: электромагнитный привод, диагностика, прогнозирование технического состояния, вебер-амперная характеристика, метод натурно-модельного эксперимента

SELECTION OF PRINCIPLES SENSORLESS PREDICTIVE DIAGNOSTICS OF ELECTROMAGNETIC ACTUATORS

Shaykhutdinov D.V., Grechikhin V.V., Yanvarev S.G., Leukhin R.I.,
Akhmedov S.V., Lankin A.M.

*Platov South-Russian State Polytechnic University,
Novocherkassk, e-mail: d.v.shaykhutdinov@gmail.com*

This article reviews the approaches and methods for diagnosis and prediction of technical condition of the electromagnetic actuators. Current electrical and magnetic characteristics and parameters of the actuator give an information about its condition at some particular point in time and do not allow to conclude about the appearance of possible malfunctions in the next period of operation. More effective are predictive diagnostics system, which by analyzing the similar results of control operations at some previous period of time solves the problem of predicting the state of the object changes in future times. Achieving this purpose requires to decide the important selection of the most appropriate diagnostic approaches and methods for the preparation of the forecast, taking into account the features of the objects of diagnosis. On the basis of analysis of diagnostic methods of electromagnetic actuators and mathematical principles of the prediction of the object condition the principle of sensorless prediction diagnosis is offered. This principle is based on the analysis of changes in the flux-current characteristics over time. To determine the flux-current characteristic corresponding to a given fault full-scale experiment method is used.

Keywords: electromagnetic drive, diagnosis, prediction of technical condition, flux-current characteristic, the method of full scale experiment

Для выходного и промежуточного контроля электромагнитных устройств ранее были разработаны ряд методов [12–14, 18, 19] и устройств [2, 3, 6, 8, 9, 11, 17]. В ходе проведенных работ были выявлены новые возможности диагностики неисправностей электромагнитных систем, основанные на анализе их вебер-амперных характеристик [7, 10, 15, 16]. При этом контроль магнитных свойств позволяет идентифицировать дефекты без необходимости проведения операций разборки/сборки изделий. Стоит отметить, что текущие электрические и магнитные характеристики и параметры привода несут в основном информацию о его состоянии в некоторый конкретный

момент времени и не позволяют сделать вывод о появлении возможных неисправностей в предстоящий период эксплуатации. Более эффективными считаются системы прогнозирующей диагностики, в которых путем анализа результатов аналогичных контрольных операций за некоторый предыдущий период времени решается задача предсказания изменения состояния объекта в будущие моменты времени. Достижение данной важной цели требует выбора наиболее подходящих диагностических подходов и методов получения прогноза, учитывающих особенности объектов диагностирования. Применение методов прогнозирования принесет несомненную пользу: позволит

определить время выхода из строя объекта и обосновать сроки профилактических работ, исключить «человеческий фактор» и ограничить количество персонала путем автоматизации процесса прогнозирования и определения состояния объекта на некоторый период времени вперед, сократить затраты на гарантийный ремонт и обслуживание путем выявления и оптимизации конструкции наименее отказоустойчивых элементов. Для постановки задачи прогнозирующей диагностики необходимо знать, на каких принципах может быть осуществлено ее решение, достигается ли цель путем применения известного математического аппарата, а также каким образом использовать известные подходы теории прогнозирования к данной предметной области.

Задача исследования состоит в определении оптимального метода прогнозирующей диагностики технического состояния электромагнитных приводов.

В качестве материалов используется теоретическое описание принципов работы предложенных ранее методов диагностики и прогнозирования технического состояния электромагнитных приводов, их достоинства и недостатки. Используемые методы: анализ, структурирование и алгоритмизация.

Описание методов прогнозирования технического состояния

При выборе метода прогнозирования необходимо учитывать следующие факторы: требуемая форма прогноза; горизонт, период и интервал прогнозирования; доступность данных; требуемая точность; поведение прогнозируемого процесса; стоимость разработки, установки и работы с системой; простота работы с системой. На практике наиболее удобно использовать первый принцип прогнозирования, так как он дает прогноз в той же размерности, что и измеряемая величина. При постановке задачи прогнозирования с позиции этого направления контролируемый процесс, характеризующий состояние объекта диагностики, представляется в виде многомерной функции y_p , которая наблюдается дискретно или непрерывно в период времени $t_0 = 0$ до t_n в области T_p , вследствие чего известны значения этой функции в соответствующие моменты времени $y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_m}$. Задача прогнозирования заключается в определении величины заданной функции в будущие моменты времени y_{m+1}, y_{m+2} и т.д. В этом случае рассматриваемая задача может быть решена различными методами.

Одним из наиболее простых является метод «наивных» моделей [5]. При создании таких моделей предполагается, что некото-

рый последний период прогнозируемого временного ряда лучше всего описывает будущее этого прогнозируемого ряда, поэтому в этих моделях прогноз, как правило, является очень простой функцией от значений прогнозируемой переменной в недалеком прошлом. Самой простой моделью является $Y(t+1) = Y(t)$, что соответствует предположению, что «завтра будет как сегодня». Такая модель не обладает высокой точностью, так как не учитывает механизмы, определяющие прогнозируемые данные, и не защищена от случайных флуктуаций.

Другим методом прогнозирования является метод среднего или скользящего среднего. Самой простой моделью, основанной на простом усреднении, является

$$Y(t+1) = (1/t) \cdot [Y(t) + Y(t-1) + \dots + Y(1)].$$

Этой модели соответствует принцип «завтра будет, как было в среднем за последнее время». Такая модель более устойчива к флуктуациям, поскольку в ней сглаживаются случайные выбросы относительно среднего. Несмотря на это, такой метод идеологически настолько же примитивен, как и «наивные» модели, и ему свойственны почти те же самые недостатки. В приведенной выше формуле предполагалось, что ряд усредняется по достаточно длительному интервалу времени. Однако, как правило, значения временного ряда из недалекого прошлого лучше описывают прогноз, чем более старые значения этого же ряда. Тогда можно использовать для прогнозирования скользящее среднее

$$Y(t+1) = (1/(T+1)) \cdot [Y(t) + Y(t-1) + \dots + Y(t-T)].$$

Смысл его заключается в том, что модель видит только ближайшее прошлое (на T отсчетов по времени в глубину) и, основываясь только на этих данных, строит прогноз. При прогнозировании довольно часто используется метод экспоненциальных средних, который постоянно адаптируется к данным за счет новых значений. Формула, описывающая эту модель, записывается как

$$Y(t+1) = \alpha \cdot Y(t) + (1-\alpha)Y(t-1),$$

где $Y(t+1)$ – прогноз на следующий период времени; $Y(t)$ – реальное значение в момент времени t ; $Y(t-1)$ – прошлый прогноз на момент времени t ; α – постоянная сглаживания ($0 \leq \alpha \leq 1$). Модель простых средних:

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t Y_i;$$

$$\hat{Y}_{t+2} = \frac{t \cdot \hat{Y}_{t+1} + Y_{t+1}}{t+1}.$$

Модель скользящих средних:

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-k+1}}{k};$$

$$\hat{Y}_{t+2} = \hat{Y}_{t+1} + \frac{Y_{t+1} + \dots + Y_{t-k+1}}{k},$$

где k – порядок скользящих средних.

Если $k = t$, то получится метод простых средних, если $k = 1$, то наивный метод. Значит, таким методом, следует считать прогнозы, начиная с $t = k$.

Метод экспоненциального сглаживания:

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) \hat{Y}_t,$$

где α – сглаживающий параметр, определяющий зависимость прогноза от более старых данных, причем влияние данных на прогноз экспоненциально убывает с «возрастом» данных.

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) Y_t + \alpha(1 - \alpha)^2 Y_{t-2}.$$

Все вышеприведенные модели хорошо работают, если тренд отсутствует.

В середине прошлого века Хольт предложил усовершенствованный метод экспоненциального сглаживания, впоследствии названный его именем. В предложенном алгоритме значения уровня сглаживаются с помощью экспоненциального сглаживания. Причем параметры сглаживания у них различны:

$$\Omega_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(\Omega_{t-1} - T_{t-1});$$

$$T_t = \beta(\Omega_t - \Omega_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1};$$

$$Y_{t+p} = \Omega_t + pT_t.$$

Здесь первое уравнение описывает сглаженный ряд общего уровня. Второе уравнение служит для оценки тренда. Третье уравнение определяет прогноз на p отсчетов по времени вперед. Постоянные сглаживания в методе Хольта идеологически играют ту же роль, что и постоянная в простом экспоненциальном сглаживании. Подбираются они путем перебора по этим параметрам с каким-то шагом. Можно использовать и менее сложные в смысле количества вычислений алгоритмы. Главное, что всегда можно подобрать такую пару параметров, которая дает большую точность модели на тестовом наборе, и затем использовать эту пару параметров при реальном прогнозировании. Частным случаем метода Хольта является метод Брауна, когда $\alpha = \beta$.

Модель Хольта

$$L_t = \alpha Y_t + \alpha(1 - \alpha) L_{t-1};$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1};$$

$$\hat{Y}_{t+p} = L_t + pT_t,$$

где p – просто число; α и β – выбираются как показатели точности. Обычно в зависимости от точности предыдущих прогнозов (чем больше средняя или еще какая-нибудь ошибка, тем больше эти параметры).

Для нахождения L применяется обратное прогнозирование обычно в зависимости от точности предыдущих прогнозов.

Модель Брауна

$$L_t = \alpha Y_t + \alpha(1 - \alpha) L_{t-1};$$

$$M_t = \alpha L_t + (1 - \alpha) M_{t-1};$$

$$\hat{Y}_{t+p} = L_t + (L_t - M_t).$$

Хотя описанный выше метод Хольта (метод двухпараметрического экспоненциального сглаживания) и не является совсем простым (относительно «наивных» моделей и моделей, основанных на усреднении), он не позволяет учитывать случайные колебания при прогнозировании. Существует расширение метода Хольта до трехпараметрического экспоненциального сглаживания. Этот алгоритм называется методом Винтерса. При этом делается попытка учесть случайные колебания параметров. Система уравнений, описывающих метод Винтерса, выглядит следующим образом:

$$\Omega_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(\Omega_{t-1} - T_{t-1});$$

$$T_t = \beta(\Omega_t - \Omega_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1};$$

$$S_t = \alpha \frac{Y_t}{\Omega_t} + (1 - \alpha) S_{t-s};$$

$$Y_{t+p} = (\Omega_t + pT_t) S_{t-s+p}.$$

Дробь в первом уравнении служит для исключения случайной величины из $Y(t)$. Полученный «чистый» прогноз, посчитанный по методу Хольта, умножается на случайный коэффициент.

Модель Винтерса

$$L_t = \frac{\alpha Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1});$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1};$$

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)L_{t-s};$$

$$\hat{Y}_{t+p} = (L_t + pT_t) S_{t+p}.$$

Наряду с описанными выше методами, основанными на экспоненциальном сглаживании, уже достаточно долгое время для

прогнозирования используются регрессионные алгоритмы. Коротко суть алгоритмов такого класса можно описать так. Существует прогнозируемая переменная Y (зависимая переменная) и отобранный заранее комплект переменных, от которых она зависит – X_1, X_2, \dots, X_N (независимые переменные). Модель множественной регрессии в общем случае описывается выражением

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_N) + \varepsilon.$$

В более простом варианте линейной регрессионной модели зависимость зависимой переменной от независимых имеет вид

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_N X_N + \varepsilon,$$

где $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_N$ – подбираемые коэффициенты регрессии, ε – компонента ошибки.

Предполагается, что все ошибки независимы и нормально распределены. Для построения регрессионных моделей необходимо иметь базу данных наблюдений. С помощью таблицы значений прошлых наблюдений можно подобрать (например, методом наименьших квадратов) коэффициенты регрессии, настроив тем самым модель. При работе с регрессией надо соблюдать определенную осторожность и обязательно проверить на адекватность найденные модели. Существуют разные способы такой проверки. Обязательным является статистический анализ остатков (тест Дарбина – Уотсона). Полезно иметь независимый набор примеров, на которых можно проверить качество работы модели.

Наиболее перспективным методом прогнозирования является использование нейронных сетей. Использование нейросетевой архитектуры и базы данных со всеми параметрами позволяет получить работающую систему прогнозирования. Причем учет или неучет системой внешних параметров будет определяться включением или исключением соответствующего входа в нейронную сеть. Дополнительным преимуществом нейронных сетей является то, что построение нейросетевой модели происходит адаптивно во время обучения, без участия эксперта, что исключает субъективные факторы. В настоящее время наиболее активно используются два основных типа моделей для нейросетевых методов прогнозирования: модели временных последовательностей и причинные модели. Временная последовательность – это упорядоченная во времени последовательность наблюдений (реализаций) переменной. Анализ временных последовательностей использует для прогнозирования переменной только исторические данные об ее изменении. Причинные модели используют связь между

заданной временной последовательностью и одной или более другими временными последовательностями.

С учетом сложности и в первую очередь нелинейности объекта диагностики для проведения дальнейших исследований выбран метод прогнозирования на базе нейронных сетей и моделей временных последовательностей.

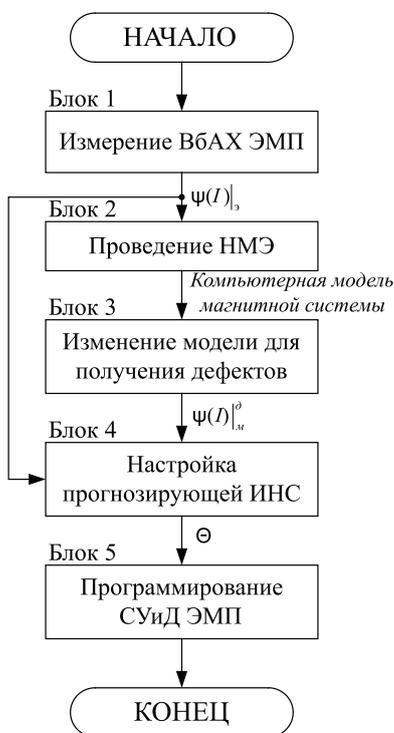
Обоснование подхода к прогнозирующей диагностике электромагнитных приводов путем анализа их вебер-амперных характеристик

В работах [10, 15, 16] представлен ряд доказательств, подтверждающий что появление дефектов электромагнитных приводов оказывает определенное влияние на форму вебер-амперной характеристики, в частности расположение в пространстве $\psi(I)$ точек перегиба данной характеристики. В данной работе предполагаем, что положение данных точек изменяется в ходе жизненного цикла изделия и определяется постепенным проявлением дефекта изделия. Примером такого дефекта является изменение геометрии магнитной системы [16] в виде «скола» магнитопровода, препятствующего функционированию электропривода, в частности созданию необходимой силы перемещения F при некотором положении подвижного элемента x [4]. Окончательным проявлением данного дефекта на вебер-амперной характеристике будет снижение потокосцепления ψ при том же значении тока I . При этом в ходе развития дефекта магнитный поток также будет снижаться вследствие появления первичных трещин в магнитопроводе – дополнительных магнитных сопротивлений [1].

Стоит отметить, что сложность задачи прогнозирования времени развития дефекта заключается в неизвестном заранее для данного типа электропривода состоянии вебер-амперной характеристики, соответствующей наличию дефекта. Данная задача может быть успешно решена путем применения метода натурно-модельного эксперимента [19]. Обобщенный алгоритм решения задачи прогнозирования появления дефекта в управляемом электромагнитном приводе на базе искусственной нейронной сети представлен на рисунке.

Представленный алгоритм работает следующим образом. На первом этапе (рисунок, блок 1) производится экспериментальное определение вебер-амперной характеристики электромагнитного привода $\psi(I)$. Данный результат является входной величиной для проведения натурно-модельного эксперимента (НМЭ, рисунок, блок 2).

Результатом выполнения НМЭ является адекватная компьютерная модель электропривода. На следующем этапе (рисунок, блок 3) выполняется изменение модели путем введения возможных изменений в электромагнитную систему привода (ЭМП) таким образом, чтобы представленное изменение проявилось в виде дефекта – отказа ЭМП. Полученные результаты фиксируются и передаются в блок настройки параметров искусственной нейронной сети (ИНС), прогнозирующей появление неисправности (рисунок, блок 4). Результатом настройки ИНС является некоторый набор параметров Θ . Данный набор параметров передается в блок программирования системы управления и диагностики электромагнитного привода (СУиД ЭМП, рисунок, блок 5).



Обобщенный алгоритм решения задачи прогнозирования появления дефекта в управляемом электромагнитном приводе на базе искусственной нейронной сети

Заключение

В результате обзора и анализа методов диагностики электромагнитных приводов и математических принципов прогнозирования предложен принцип бессенсорной прогнозирующей диагностики на базе анализа изменения вебер-амперной характеристики во времени. Для определения вебер-амперной характеристики, соответствующей той или иной неисправности, предложено использовать натурно-модельный подход.

Результаты работы получены при поддержке гранта РФФИ № 15-38-20652 «Развитие теории бессенсорных прогнозирующих методов управления и диагностики электроприводов».

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Высш. шк., 1986. – С. 126–127.
2. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д., Шайхутдинов Д.В., Тришечкин Д.В. Устройство для испытания изделий из ферромагнитных материалов // Патент России на изобретение № 2357265.2009. Бюл. № 15.
3. Горбатенко Н.И., Ланкин М.В., Шайхутдинов Д.В., Широков К.М. Устройство для измерения характеристик магнитомягких материалов // Патент России на изобретение № 2390789.2010. Бюл. № 15.
4. Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
5. Грешилов А.А. Математические методы построения прогнозов / А.А. Грешилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
6. Ланкин М.В., Горбатенко Н.И., Гришин А.С., Пжилюский А.А. Устройство для классификации ферромагнитных материалов по форме кривой намагничивания // Патент России на изобретение № 2185635.2004. Бюл. № 16.
7. Сахавова А.А., Широков К.М., Январев С.Г. Применение метода косвенного определения вебер-амперных характеристик в автоматизированной системе бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5; URL: www.science-education.ru/111-10234 (дата обращения: 04.10.2013).
8. Шайхутдинов Д.В. Устройство для экспресс-испытаний изделий из листовой стали // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 6(156). – С. 55–61.
9. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Датчик и прибор для измерения магнитных параметров листовой электротехнической стали // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 4. – URL: www.science-education.ru/110-9756.
10. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Леухин Р.И., Широков К.М., Дубров В.И., Стеценко И.А., Ахмедов Ш.В. Анализ влияния критических дефектов магнитной системы электромагнитов на их вебер-амперные характеристики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11(Ч.11). – С. 2385–2389.
11. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Наракидзе Н.Д., Леухин Р.И., Широков К.М., Дубров В.И., Стеценко И.А., Ахмедов Ш.В. Измерительный преобразователь напряженности магнитного поля для прибора экспресс-испытаний изделий из листовой электротехнической стали // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-14895> (дата обращения: 14.10.2014).
12. Шайхутдинов Д.В., Гречихин В.В., Боровой В.В. Методы и приборы экспресс-контроля магнитных параметров для промышленных систем управления // Современные проблемы науки и образования – 2012. – № 6. – URL: <http://education.ru/106-7516> (дата обращения: 16.05.2014).
13. Шайхутдинов Д.В., Ланкин М.В., Боровой В.В. Измерение магнитных характеристик элементов мехатронных систем в режиме последовательного резонанса // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2009. – Спец. выпуск: Мехатроника. Современное состояние и тенденции развития. – С. 177–179.
14. Шайхутдинов Д.В., Шайхутдинова М.В. Метод определения магнитных свойств электротехнической стали // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 11–1. – С. 105–107.

15. Шайхутдинов Д.В., Январев С.Г., Широков К.М., Ахмедов Ш.В. Метод технической диагностики нарушений геометрических параметров магнитной системы электромагнитных устройств на базе их вебер-амперных характеристик // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 8 (Ч.1). – С. 84–86.

16. Шайхутдинов Д.В., Январев С.Г., Широков К.М., Леухин Р.И. Метод технической диагностики межвитковых замыканий в электромагнитных устройствах на базе их вебер-амперных характеристик // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 8. – С. 69–71.

17. Широков К.М., Шайхутдинов Д.В., Дубров В.И., Январев С.Г., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Устройство магнитного контроля для подсистемы управления производством электротехнических изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-11665 (дата обращения: 16.05.2014).

18. Широков К.М., Гречихин В.В. Исследование бессенсорных устройств определения магнитных характеристик для систем управления производством электромагнитов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – С. 1173–1178.

19. Shaykhtudinov D.V., Gorbatenko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhtudinova M.V., Shirokov K.M. Experimental and Simulation Tests of Magnetic Characteristics of Electrical Sheet Steel // Life Science Journal. – 2013. – № 10(4); URL: http://www.lifesciencesite.com/ljs/life1004/361_22173life1004_2698_2702.pdf.

References

1. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovi elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole. / L.A. Bessonov M.: Visshaja shkola, 1986. pp. 126–127.

2. Gorbatenko N.I., Lankin M.V., Narakidze N.D., Shaykhtudinov D.V., Trishechkin D.V. Ustrojstvo dlia ispitaniya izdelij iz ferromagnitnih materialov // Patent Rossii no. 2357265.2009. Bul. no. 15.

3. Gorbatenko N.I., Lankin M.V., Shaykhtudinov D.V., Shirokov K.M. Ustrojstvo dlia izmereniya harakteristik magnetnomjagkih materialov // Patent Rossii no. 2390789.2010. Bul. no. 15.

4. Gordon A.V. Elektromagniti postojannogo toka / A.V. Gordon, A.G. Slivinskaja. M.: Gosenergoizdat, 1960. 447 p.

5. Greshilov A.A. Matematicheskie metodi postroeniya prognozov / A.A. Greshilov, V.A. Stakun, A.A. Stakun M.: Radio i svjaz, 1997. 112 p.

6. Lankin M.V., Gorbatenko N.I., Grishin A.S., Pgiluskij A.A. Ustrojstvo dlia klassifikacii ferromagnitnih materialov po forme krivoj namagnichivaniya // Patent Rossii no. 2185635.2004. Bul. no. 16.

7. Sakhavova A.A., Shirokov K.M., Yanvarev S.G. Prime-nenie metoda kosvennogo opredelenija veber-ampernih harakteristik v avtomatizirovannoj sisteme bessensornoj diagnostiki jelektromagnitnyh mehanizmov // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013, no. 5; URL: www.science-education.ru/111-10234.

8. Shaykhtudinov D.V. Ustrojstvo dlia ekspress-ispitanij izdelij iz listovoj stali // Kontrol. Diagnostika. 2011. no. 6(156). pp. 55–61.

9. Shaykhtudinov D.V., Gorbatenko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhtudinova M.V. Datchik i pribor dlia izmereniya magnetnih parametrov listovoj elektrotehnicheskoy stali // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013. no. 4. URL: www.science-education.ru/110-9756.

10. Shaykhtudinov D.V., Gorbatenko N.I., Leukhin R.I., Shirokov K.M., Dubrov V.I., Stetsenko I.A., Akhmedov Sh.V.

Analiz vlianiya kriticheskikh defektov magnetnoj sistemi electro-magnitov na ih veber-ampernie harakteristiki // Fundamentalnie issledovanija. 2014. no. 11(P.11). pp. 2385–2389.

11. Shaykhtudinov D.V., Gorbatenko N.I., Narakidze N.D., Leukhin R.I., Shirokov K.M., Dubrov V.I., Stetsenko I.A., Akhmedov Sh.V. Izmeritelnij preobrazovatel napriagennosti magnetnogo polia dlia pribora ekspress-ispitanij izdelij iz listovoj elektrotehnicheskoy stali // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2014. no. 5; URL: http://www.science-education.ru/119-14895.

12. Shaykhtudinov D.V., Grechikhin V.V., Borovoy V.V. Metodi i probori ekspress-kontrolya magnetnih parametrov dlia promishlennih sistem upravlenija // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2012. no. 6. URL: http://education.ru/106-7516.

13. Shaykhtudinov D.V., Lankin M.V., Borovoy V.V. Izmenenie magnetnih harakteristik elementov mehatronnih sistem v regime posledovatel'nogo rezonansa // Izvestija vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki. 2009. Spec. vipusk: Mekhatronika. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitiya. pp. 177–179.

14. Shaykhtudinov D.V., Shaykhtudinova M.V. Metod opredelenija magnetnih svojstv elektrotehnicheskoy stali // Megdunarodnij jurnal eksperimentalnogo obrazovaniya, 2013. no. 11–1. pp. 105–107.

15. Shaykhtudinov D.V., Yanvarev S.G., Shirokov K.M., Akhmedov Sh.V. Metod tehniceskoy diagnostiki narushenij geometricheskikh parametrov magnetnoj sistemi elektromagnitnih ustrojstv na base ih veber-ampernih harakteristik // Megdunarodnij jurnal eksperimentalnogo obrazovaniya, 2014. no. 8 (P.1). pp. 84–86.

16. Shaykhtudinov D.V., Yanvarev S.G., Shirokov K.M., Leukhin R.I. Metod tehniceskoy diagnostiki megvitkovih zamikanij v elektromagnitnih ustrojstvah na base ih veber-ampernih harakteristik // Sovremennye naukojemkie tehnologii, 2014. no. 8. pp. 69–71.

17. Shirokov K.M., Shaykhtudinov D.V., Dubrov V.I., Yanvarev S.G., Akhmedov Sh.V., Shaykhtudinova M.V. Ustrojstvo magnetnogo kontrolya dlia podsystemi upravlenija proizvodstvom elektrotehnicheskikh izdelij // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013. no. 6; URL: www.science-education.ru/113-11665.

18. Shirokov K.M., Grechikhin V.V. Issledovanie bessensornih ustrojstv opredelenija magnetnih harakteristik dlia sistem upravlenija proizvodstvom elektromagnitov // Fudamentalnie issledovanija, 2014. no. 6. pp. 1173–1178.

19. Shaykhtudinov D.V., Gorbatenko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhtudinova M.V., Shirokov K.M. Experimental and Simulation Tests of Magnetic Characteristics of Electrical Sheet Steel // Life Science Journal. 2013. no. 10(4); URL: http://www.lifesciencesite.com/ljs/life1004/361_22173life1004_2698_2702.pdf.

Рецензенты:

Горбатенко Н.И., д.т.н., зав. кафедрой «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск;

Кириевский Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.