

Экспериментальные исследования напряженности магнитного поля на электрическом подвижном составе в задачах диагностики и безопасности

И.С. Куприянов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉xpress14@mail.ru

Резюме

В статье представлены результаты исследования магнитного поля внутри локомотива ЭП1П-065. Частотный состав и распределение внешнего магнитного поля, порождаемого различными узлами и агрегатами подвижного состава, в частности асинхронными электродвигателями, могут использоваться в качестве диагностического параметра. Анализ внешнего магнитного поля позволяет проводить диагностику вспомогательных машин подвижного состава, не выводя их из эксплуатации. В то же время магнитное поле, индуцируемое различными агрегатами внутри подвижного состава, требует изучения для определения степени его влияния на точность постановки диагноза. Не стоит забывать и о влиянии магнитных полей на человека, поскольку описанные в нормативной документации пути решения этой проблемы могут внести изменения в конструкцию подвижного состава и тем самым изменить картину распределения магнитного поля. С целью проведения исследований был разработан специализированный прибор для регистрации уровня и временного сигнала напряженности или магнитной индукции наведенного оборудованием подвижного состава магнитного поля и внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей. В результате экспериментальных исследований установлено, что уровень напряженности магнитного поля в подвижном составе во время его работы значительно превышает допустимые значения как в пике, так и в среднем, что создает угрозу здоровью персонала. Однако с точки зрения диагностики вспомогательных машин уровень средней и пиковой напряженности наведенного магнитного поля меньше, чем у магнитного поля, создаваемого асинхронными электродвигателями, что может влиять на результат диагностики на ранних этапах развития дефектов в виду наличия гармоник основной электромагнитной частоты.

Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, наведенное магнитное поле, внешнее магнитное поле, диагноз, дефект, техническое состояние

Для цитирования

Куприянов И.С. Экспериментальные исследования напряженности магнитного поля на электрическом подвижном составе в задачах диагностики и безопасности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 156–164. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).156-164.

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 22.06.2023 г.; принята к публикации: 23.06.2023 г.

Experimental studies of the magnetic field strength on electric rolling stock in problems of diagnostics and safety

I.S. Kupriyanov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉xpress14@mail.ru

Abstract

The article presents the results of a study of the magnetic field inside the locomotive EP1P-065. The frequency composition and distribution of the external magnetic field generated by various components and aggregates of rolling stock and, in particular, asynchronous electric motors, can serve as a diagnostic parameter. The external magnetic field analysis will allow diagnostics of auxiliary vehicles of rolling stock without decommissioning them. At the same time, the magnetic field induced by various aggregates inside the rolling stock requires study to determine the degree of its influence on the accuracy of diagnosis. Also we should not forget about the influence of magnetic fields on humans, since the ways to solve this problem described in the regulatory documentation can require changes in the design of rolling stock and thereby change the picture of the distribution of the magnetic field. A device has been developed to register the intensity and time strength signal or magnetic field induced by the internal equipment of the rolling stock. As a result of experimental studies, it was found that the level of magnetic field strength in the rolling stock, during its operation, significantly exceeds the permissible values both at peak and on average, which poses a threat to the health of personnel. For diagnostics of auxiliary machines, the level of the induced magnetic field strength is less than the field created by induction motors. However, it can affect the diagnostic result at the early stages of the development of defects, since it has harmonics of the main electromagnetic frequency in its composition.

Keywords

induction motor, induced magnetic field, external magnetic field, diagnosis, defect, technical condition

For citation

Kupriyanov I.S. Eksperimental'nye issledovaniya napryazhennosti magnitnogo polya na elektricheskom podvizhnom sostave v zadachakh diagnostiki i bezopasnosti [Experimental studies of the magnetic field strength on electric rolling stock in problems of diagnostics and safety]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 156–164. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).156-164.

Article Info

Received: June 9, 2022; Revised: June 22, 2023; Accepted: June 23, 2023.

Введение

При распространении электрификации на железнодорожном транспорте и обслуживающей инфраструктуре возникают проблемы с взаимным воздействием магнитных полей (МП) оборудования. В результате появилась необходимость в учете электромагнитной совместимости измерительного оборудования [1] и методов проверки этой устойчивости, описанных в [2]. Это существенно влияет на разработку как средств контроля, так и методики их применения в подвижном составе (ПС).

Магнитные и электрические методы контроля асинхронных электродвигателей (АЭД) по фактическому состоянию требуют проведения исследований магнитных полей, действующих около объекта контроля, поскольку необходимо определить влияние наведенных магнитных полей на общий уровень внешнего магнитного поля (ВМП) объекта диагностики. Также не стоит забывать о воздействии магнитного поля на человека, что ставит вопросы электромагнитной экологии и безопасности.

Для решения проблемы воздействия МП на персонал в нормативных актах введены ограничения путем введения предельно допустимых уровней воздействия (ПДУ).

В России система стандартов по электромагнитной безопасности при проектировании измерительного оборудования опирается на [1, 2] и смежные им документы, а с точки зрения обеспечения безопасности персонала – на ГОСТ

12.1.002-84, ГОСТ 12.1.006-84, ГОСТ 12.1.045-84 и санитарные правила и нормы [3, 4].

В качестве допустимых уровней воздействия МП принимаются такие значения, при которых ежедневное постоянное облучение в свойственных для данного источника излучения режимах, не вызывает у персонала заболеваний или отклонений в состоянии здоровья. Подробно и для конкретных ситуаций требования к рабочим местам приведены в [3, 4] и смежных документах.

При этом для измерительных средств стандарты [1, 2] определяют требования не только к полям вокруг объекта измерения, но и к уровню помех, индуцируемых самим средством измерения.

Интенсивность воздействия МП определяется эффективным значением напряженности (H , А/м) или магнитной индукции (B , Тл), связанных выражением (1):

$$B = \mu_0 \cdot H, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Также существует разделение ПДУ воздействия МП для персонала, которые устанавливаются в зависимости от времени и типа воздействия (общий или локальный) (табл. 1).

Целями данной работы являются:

- создание устройства для фиксации физических характеристик МП локомотива;
- получение результатов диагностики АЭД по параметрам ВМП; анализ влияния наведенных МП на параметры ВМП АЭД и персонал путем

Таблица 1. Предельно допустимые уровни магнитных полей
Table 1. Maximum permissible levels of magnetic fields

Время пребывания, ч Stay time, h	Допустимые уровни магнитного поля, Н/В при воздействии Permissible levels of the magnetic field, N/V under exposure	
	Общем General	Локальном Local
≤ 1	1 600/2 000	6 400/8 000
2	800/1 000	3 200/4 000
4	400/500	1 600/2 000
8	80/100	800/1 000

соотнесения их с допустимыми значениями, установленными нормативной документацией;

– предложения по снижению негативного воздействия электромагнитного излучения на работников, обслуживающих ПС железных дорог.

Разработка и настройка прибора

Для проведения регистрации параметров ВМП АЭД и уровня магнитной индукции в ПС был разработан прибор на основе элемента Холла SS94A1F (Honeywell), базовые характеристики которого приведены в табл. 2. Функциональная схема прибора представлена на рис. 1.

Прибор состоит из двух основных элементов цифрового блока (используется персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем) и блока датчика. Блок датчика размещен в экранированном корпусе и состоит из трех субблоков: непосредственно датчика Холла, каскада усиления и фильтрации и элемента питания.

Фильтры каскада усиления выбраны исходя из источников [5–8], поскольку основное назначение прибора – контроль ВМП АЭД.

Внешний вид блока датчика показан на рис. 2.

Таблица 2. Характеристики датчика SS94A1F

Table 2. Sensor Characteristics S94A1F

Характеристика Characteristic	Значение Value
Чувствительность, мВ/Гаусс Sensitivity, mV/Gauss	25±5
Линейность диапазона, % Range linearity, %	–0,8(max 1,5)
Ошибка температуры (при 25 °С) сдвиг нуля, %/°С Temperature error (at 25 °C) sensitivity, %/°C	± 0,1
Ошибка температуры (при 25 °С) чувствительность, %/°С Temperature error (at 25 °C) sensitivity, %/°C	0,055%/0,2
Магнитный диапазон Magnetic range	–10 мТл ... 10 мТл
Диапазон рабочих температур, °С Operating temperature range, °C	–40 ... +125



Рис. 1. Структурная схема прибора регистрации напряженности и индукции магнитного поля
Fig. 1. Block diagram of the device for registering the intensity and induction of the magnetic field



Рис. 2. Внешний вид блока датчика в корпусе:
1 – защитный колпачок чувствительного элемента; 2 – экранированный кабель; 3 – экранированный корпус

Fig. 2. The appearance of the sensor unit in the body:
1 – protective cap of the sensor element; 2 – shielded cable; 3 – shielded body

Проведение настройки и калибровки системы осуществлялось на специализированном стенде с использованием магнитоизмерительного прибора Ф-205.30А и цифрового вольтметра В7-35. Для этого была определена зависимость величины выходного напряжения с аналоговой части прибора от угла поворота датчика (диаграмма направленности) относительно нормали ВМП, приложенного калибровочным стендом, где 0 – перпендикулярное положение блока датчика относительно нормали магнитной индукции калибровочного стенда. Диаграмма направленности для блока датчика приведена на рис. 3.

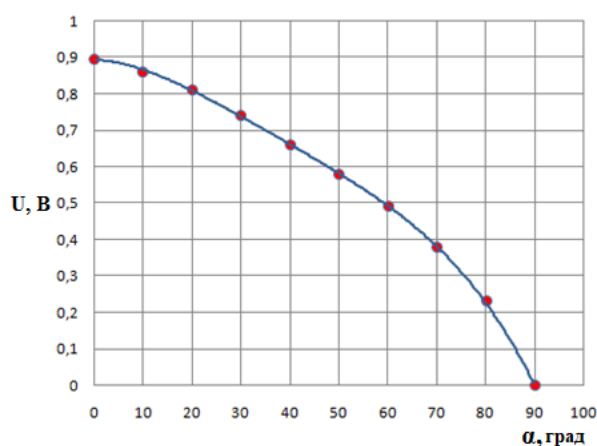


Рис. 3. Диаграмма направленности блока датчика
Fig. 3. Radiation pattern of the sensor unit

График на рис. 3 показывает, что максимальная амплитуда выходного сигнала наблюдается при расположении блока датчика перпендикулярно относительно нормали к источнику магнитной индукции, при параллельном расположении относительно нормали магнитной индукции амплитуда минимальна.

Фильтрация выбросов при оценке погрешности системы осуществлялась по критерию Шовене, в рамках которого из ряда измерений количеством N выбирается аномальное значение измерения x_r и по выражению (2) вычисляется модуль его отклонения от среднего значения Z :

$$Z = \frac{x_r - \langle x \rangle}{S_x}, \quad (2)$$

где $\langle x \rangle$ – выборочное среднее значение величины, S_x – выборочное среднее квадратичное значение отчетов.

Выборочное среднее значение определяется по формуле (3):

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}, \quad (3)$$

где x_n – действительное значение величины (значение отчета).

Выборочное среднее квадратичное отклонение значений отчетов в рамках доверительного интервала $[\langle x \rangle - \Delta, \langle x \rangle + \Delta]$ вычисляется по выражению (4):

$$S_x = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - \langle x \rangle)^2}. \quad (4)$$

Так как выборочное среднее квадратическое отклонение S_x является случайной величиной, то при оценке разброса принимаемых S_x значений относительно истинного значения измеренной величины в рамках доверительного интервала используют выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения, которое вычислим по формуле (5):

$$S_{\langle x \rangle} = \frac{S_x}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

Тогда случайную составляющую погрешности Δ_x для серии измерений вычислим по формуле (6):

$$\Delta_x = \frac{S_x}{\sqrt{N}} \cdot t_a = S_{\langle x \rangle} \cdot t_a, \quad (6)$$

где t_a – безразмерный коэффициент Стьюдента.

Систематическая Δ_C (инструментальная) погрешность прибора определяется по формуле (7):

$$\Delta_C = \frac{k \cdot A}{100}, \quad (7)$$

где k – класс точности средства измерений, A – предел шкалы прибора.

Полная погрешность прибора состоит из систематической Δ_C и случайной погрешности Δ_x и определяется выражением (8):

$$\Delta_S = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta_x^2}. \quad (8)$$

График изменения полной Δ_S погрешности в нормальных условиях, рассчитанной по выражениям (6)–(8) при коэффициенте Стьюдента, принятом $t_a = 0,95$, и пределе шкалы прибора 3 000 А/м, приведен на рис. 4.

Как видно из графика на рис. 4, погрешность прибора находится в пределах 5 % на диапазоне измерений 60–3 000 А/м и резко увеличивается на диапазоне 0–60 А/м. Также наблюдается небольшое увеличение погрешности ближе к пределу шкалы в интервале 2 800–

3 000 А/м. Это объясняется особенностями используемой элементной базы в блоке усилителя сигнала датчика Холла.

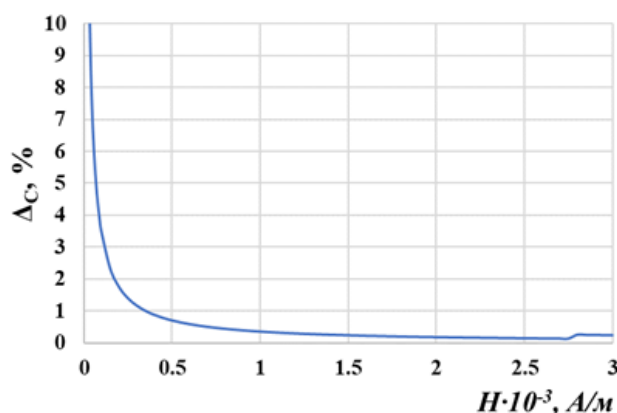


Рис. 4. График изменения погрешности в зависимости от измеряемой величины
Fig. 4. Graph of error changes depending on the measured value

Поскольку условия окружающей среды внутри ПС, помимо кабины машиниста, отличаются от нормальных, это влечет за собой увеличение погрешности измерений. Поэтому для оценки итоговой Δ_{Σ} погрешности необходимо: учитывать погрешность чувствительности элемента Холла и элементной базы каскада усиления и фильтрации от температуры окружающей среды. Исходя из этого примем, что дополнительная погрешность $\Delta_{\text{доп}}$ прибора в крайних точках температурного диапазона работы от -20 до $+50$ $^{\circ}\text{C}$ будет не более основной Δ_{Σ} (полной) погрешно-

сти. То есть итоговую погрешность прибора Δ_{Σ} на всем диапазоне температур его работы примем равной сумме основной Δ_{Σ} (полной) и дополнительной и вычислим по формуле (9):

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\Sigma} + \Delta_{\text{доп}} = 2\Delta_{\Sigma}, \quad (9)$$

Тогда интервал измерений, на котором погрешность Δ_{Σ} не превышает 5 %, т.е. на котором возможна уверенная регистрация уровня напряженности МП, смещается в интервал 100–3 000 А/м, что, согласно [9, 10], не приведет к проблемам при регистрации напряженности ВМП АЭД, используемых в качестве вспомогательных машин в ПС [8–10].

В то же время погрешность в диапазоне границы ПДУ (для переменных МП, согласно [3, 4], составляющей 80 А/м) при расчете погрешности Δ_{Σ} в диапазоне 80–100 А/м по формуле (9) составит 8 %. Это не позволит уверенно регистрировать незначительные превышения уровня МП, небезопасного для персонала.

Экспериментальные исследования

Оценка влияния электромагнитного фона на возможность измерения ВМП АЭД и соответствия нормам [1–4] при полностью включенном оборудовании в ПС проводилась в электровозе ЭП1П-065 в зимнее время года в трех точках (рис. 5).

Положение и ориентация в пространстве блока датчика прибора выбиралась с учетом диаграммы направленности (см. рис. 3) для регистрации максимального уровня напряженности МП. Временные сигналы напряженности МП,

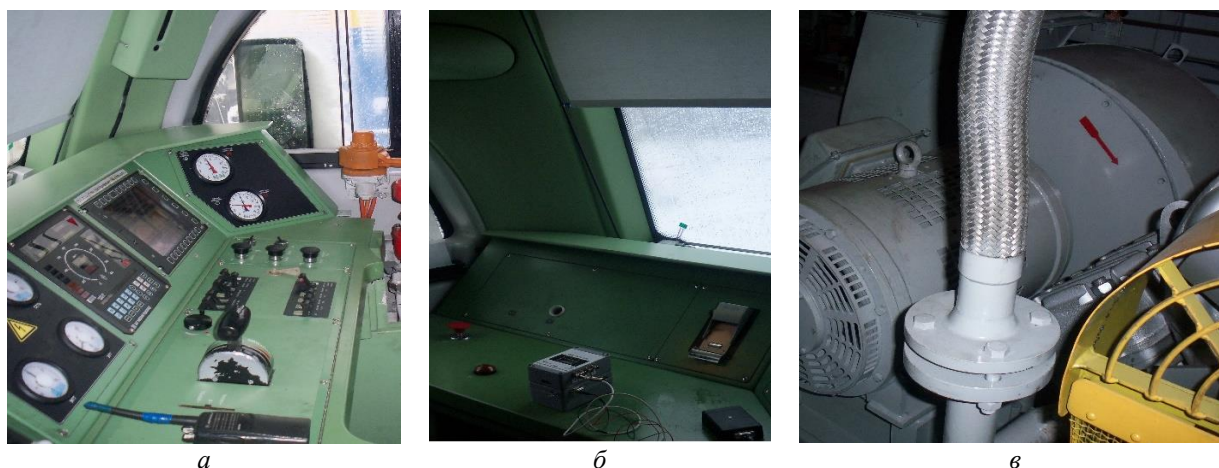


Рис. 5. Зоны измерения магнитного поля в локомотиве ЭП1П-065:

a – зона машиниста; *б* – зона помощника машиниста, *в* – зона вспомогательных машин

Fig. 5. Magnetic field measurement zones in the locomotive EP1P-065:

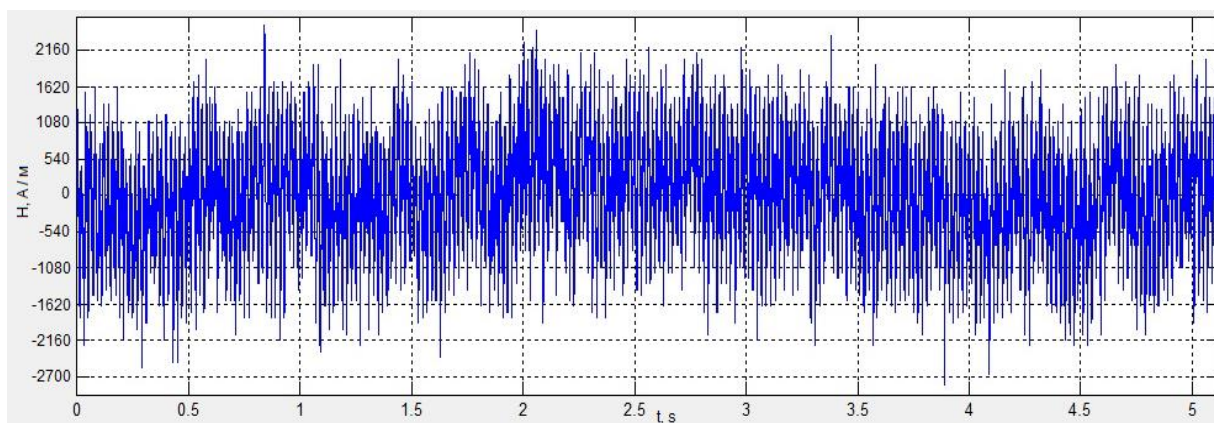
a – zone of the driver; *b* – zone of the assistant driver; *c* – zone of auxiliary machines

полученные в результате измерений, представлены на рис. 6.

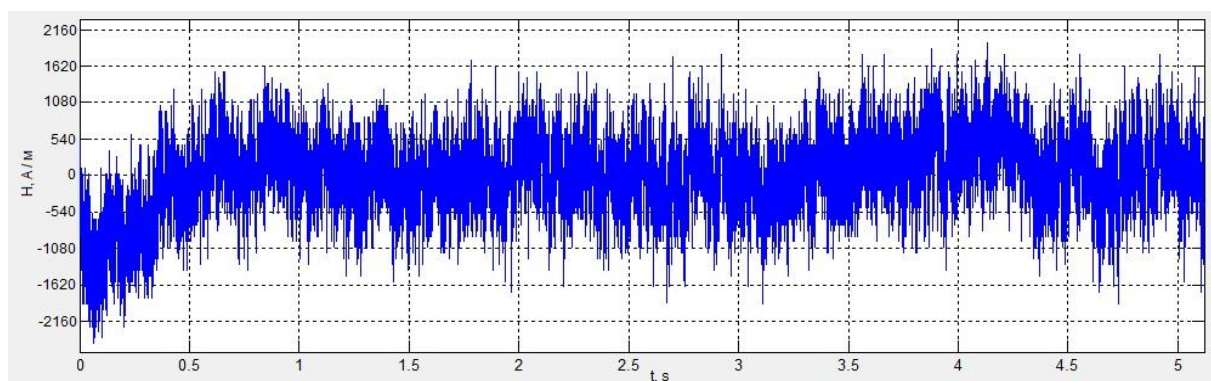
Как видно из представленных графиков в зоне кабины машиниста пиковое значение напряженности магнитного поля достигает 2160 А/м, а в зоне помощника машиниста – 1620 А/м. Данные значения превышают допустимые нормы [3, 4] в 27 и 20 раз соответственно, но эти МП не действуют постоянно.

Уровень напряженности постоянно действующего МП находится в диапазоне 200–500 А/м, что также превышает допустимые нормы более чем в 5 раз.

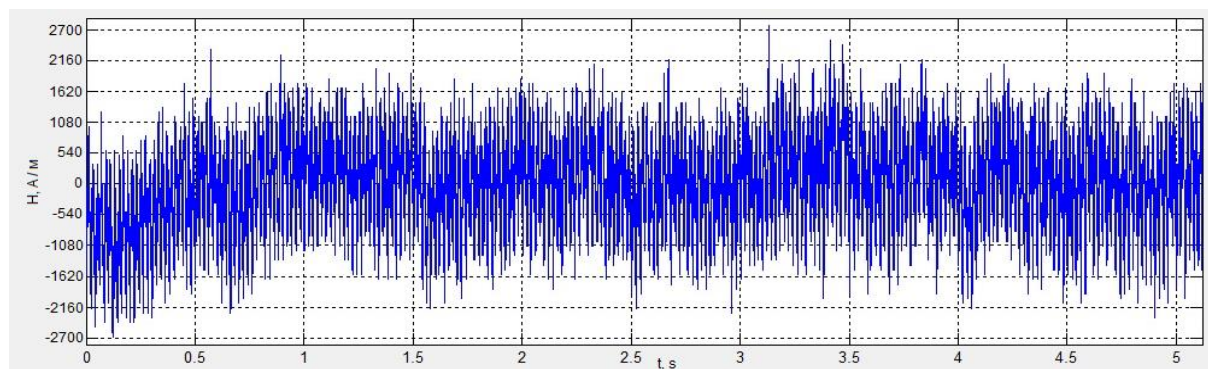
Причиной этого могут служить, например, колебания контактной сети в результате движения локомотива, что приводит к колебаниям воздушного зазора. Изменение величины зазора в условиях повышенной влажности или



а



б



в

Рис. 6. Временной сигнал магнитной индукции в электровозе ЭП1П-065:

а – зона машиниста; б – зона помощника машиниста; в – зона вспомогательных машин

Fig. 6. Time signal of magnetic induction in electric locomotive EP1P-065:

а – driver's zone; б – driver's assistant zone; в – zone of auxiliary machines

запыленности приводит к возникновению дуговых процессов или искрению, которые в свою очередь провоцируют всплеск напряженности МП. Также порождающие всплески напряженности МП кратковременные электрические дуги между контактной сетью и токоприемником могут возникнуть как следствие некачественного токосъема.

При этом в качестве основного источника повышенного электромагнитного фона в кабине стоит рассматривать тяговый двигатель, контактную сеть, вспомогательное оборудование и их дефекты: искрение щеток тягового двигателя, нарушение симметрии фаз внутренней питающей сети локомотива, короткие замыкания.

В зоне расположения вспомогательных машин (машинном отделении) (см. рис. 6, в), максимальное значение напряженности МП достигает 2 700 А/м. Это также превышает допустимый уровень согласно в 34 раза [3, 4], но данная зона не является зоной длительного пребывания человека в процессе работы ПС. Поэтому подобные значения напряженности МП можно принять условно допустимыми при соблюдении правил и ограничении времени пребывания в данной зоне [3, 4]. Средний уровень напряженности наведенного МП находится в пределах значений диапазона 200–500 А/м.

Пики напряженности МП, амплитуда которых превышает уровень 1 600 А/м, не могут являться признаками наличия дефектов АЭД [9–11]. Пики меньше порогового уровня 1 600 А/м могут создавать сложности при диагностике АЭД малой мощности на холостом ходу [12]. Общий уровень индуцируемого ВМП при исправной работе двигателей мощностью до 15 кВт будет, согласно исследованиям [12, 13], примерно соответствовать среднему уровню наведенного МП, что создает сложности в диагностике и может вызвать ошибку в постановке диагноза. Это связано с тем, что наведенное МП имеет в частотном составе гармоники основной электромагнитной частоты АЭД $2f_c$, т.е. частоты nf_c , где $f_c = 50$ Гц.

В то же время у АЭД, используемых в ПС в качестве вспомогательных машин, а именно: НВА-55, АЭ92-4 и АЭД серии АНЭ-255 мощностью 55 кВт, ВМП в режиме холостого хода, согласно [12, 14–16], значительно выше уровня 200 А/м, что снижает влияние наведенного МП на результат их диагностики по параметрам

ВМП. Но особенности частотного состава наведенного МП (наличие гармоник основной электромагнитной частоты АЭД $2f_c$), могут оказывать влияние на результат диагностики на ранних этапах развития дефекта [8, 10, 16, 17].

Методы уменьшения воздействия магнитных полей

Поскольку локомотив представляет собой сложный технический объект с предельной плотной компоновкой узлов, работающих в сложных условиях, то из всех известных методов борьбы с наведенным МП доступными остаются только два: ограничение времени пребывания персонала и экранирование. Способ, предполагающий ограничение времени пребывания актуален лишь для машинного отделения, в котором не требуется постоянное присутствие персонала, но полностью не применим для диагностического оборудования [1, 2]. Также в зоне кабины управления в рамках работы машиниста и помощника ввести ограничение пребывания, равное не более 1 ч [3, 4], не представляется возможным. Поэтому единственным методом снижения уровня напряженности МП для персонала до допустимых значений является экранирование кабины от поля, порождаемого контактной сетью и основными источниками излучения, расположенными в машинном отделении. Для эффективного экранирования необходим метод, позволяющий не разрывать связь экрана с заземлением в процессе движения в широком диапазоне температур и сложных условиях работы подвижного состава, а также не нарушающий работу систем управления ПС [18–20].

Заключение

В результате проведенных исследований МП в ПС было установлено, что уровень напряженности МП в машинном отделении не будет оказывать значительного влияния на возможность диагностики вспомогательных машин по параметрам ВМП, так как уровень напряженности ВМП АЭД, используемых в подвижном составе, значительно выше среднего уровня наведенных МП. В то же время наведенное поле может вызвать ошибку постановки диагноза на ранних этапах развития дефекта, что нежелательно. Для решения этой проблемы наиболее целесообразно:

1. Провести дальнейшие исследования диагностических признаков, проявляющихся в ВМП электродвигателей при наличии дефектов и ввести пороговые уровни диагностических признаков, согласованных с электромагнитной картиной распределения МП в ПС, что позволит снизить ошибку постановки диагноза.

2. Обеспечить экранирование диагностического оборудования, в частности аналогового блока, согласно диаграмме направленности датчиков регистрации ВМП. Это позволит мак-

симально исключить влияние наведенного МП на поле, индуцируемое объектом контроля.

В то же время для персонала уровень напряженности МП в кабине управления превышает допустимые нормы. Для средних значений до 5 раз, а пиковых – до 27 раз, что, согласно принятым санитарным нормам, создает угрозу здоровью персонала. Данная ситуация в современных условиях и в рамках законодательной базы может быть решена экранированием кабины машиниста.

Список литературы

- ГОСТ Р МЭК 61326-1-2014 Оборудование электрическое для измерения, управления и лабораторного применения. Требования электромагнитной совместимости. Ч. 1. Общие требования. Введ. : 2016–01–01. М. : Стандартинформ, 2014. 22 с.
- О введении в действие межгосударственного стандарта : приказ Росстандарта от 31.08.2021 № 894-ст. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети.
- Об утверждении санитарных правил СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи» : постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2020 г. № 28. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети.
- Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» : постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети.
- Аполлонский С.М., Горский А.Н. Электромагнитная среда на электрифицированном транспорте // Развитие устройств электрической тяги : сб. науч. трудов. СПб., 2004. С. 28–37.
- Аполлонский С.М., Горский А.Н. Методы анализа электромагнитной совместимости // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 5. С. 33–38.
- Аполлонский С.М., Горский А.Н. Проблемы электромагнитной безопасности в урбанизированном пространстве // Электричество. 2020. № 7. С. 65–73.
- Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 61–69.
- Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
- Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors : doctoral dissertation. Stockholm : Royal Institute of Technology, 2000. 209 p.
- Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // IEEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. P. 32–37. DOI 10.1109/TEC.2005.847955.
- Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
- Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999. Vol. 14, Is. 4. P. 1065–1074. DOI 10.1109/60.815029.
- Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах. М. : Энергия, 1970. 520 с.
- Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. Л. : Энергия, 1979. 176 с.
- Liang B., Ball A.D., Iwnicki S.D. Simulation and fault detection of three-phase induction motors // IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCOM' 02). Beijing, 2002. Vol. 3. P. 1813–1817. DOI: 10.1109/TENCON.2002.1182688.
- Сурков Д.В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей : дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2008. 126 с.
- Конструирование экранов и СВЧ-устройств / А.М. Чернушенко, Б.В. Петров, Л.Г. Малорацкий и др. М : Радио и связь, 1990. 350 с.
- Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 223 с.
- Горский А.Н., Васильева Л.К. Электромагнитные излучения и защита от них. СПб. : ПГУПС, 2000. 100 с.

References

- GOST R MEK 61326-1-2014 Oborudovanie elektricheskoe dlya izmereniya, upravleniya i laboratornogo primeneniya. Trebovaniya elektromagnitnoi sovmestimosti. Chast' 1. Obshchie trebovaniya [IEC 61326-1: 2012 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements – Part 1: General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 22 p.
- Prkaz Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 31.08.2021 g. N 894-st «O vvedenii v deistvie mezhgosudarstvennogo standarta» [Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated August 31, 2021 N 894-st «On the introduction of the interstate standard»].

3. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.09.2020 g. N 28 «Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil SP 2.4.3648-20 «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizatsiyam vospitaniya i obucheniya, otdykha i ozdorovleniya detei i molodezhi» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated September 28, 2020 N 28 «On the approval of the sanitary rules 2.4.3648-20 «Sanitary and epidemiological requirements for organizations of upbringing and training, recreation and health improvement of children and youth»].
4. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 g. N 2 «Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredi obitaniya» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 N 2 «About the approval of sanitary rules and norms 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans»].
5. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Elektromagnitnaya sreda na elektrifitsirovannom transporte [Electromagnetic environment on electrified transport]. *Sbornik nauchnykh trudov «Razvitie ustroystv elektricheskoi tyagi»* [Proceedings «Development of electric traction devices»]. Saint Petersburg, 2004, pp. 28–37.
6. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Metody analiza elektromagnitnoi sovmestimosti [Methods of electromagnetic compatibility analysis]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2016, no. 5, pp. 33–38.
7. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Problemy elektromagnitnoi bezopasnosti v urbanizirovannom prostranstve [Issues of electromagnetic safety in urbanized space]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2020, no. 7, pp. 65–73.
8. Luk'yanov A.V., Mukhachev Yu.S., Bel'skii I.O. Issledovanie kompleksa parametrov vibratsii i vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei [Investigation of the complex parameters of vibration and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 2 (22), pp. 61–69.
9. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
10. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation // Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000. 209 p.
11. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005, vol. 20, no. 4, pp. 32–37.
12. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p.
13. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.
14. Ul'yanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transient processes in electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 520 p.
15. Bryn'skii E.A., Danilevich Ya.B., Yakovlev V.I. Elektromagnitnye polya v elektricheskikh mashinakh [Electromagnetic fields in electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1979. 176 p.
16. Liang B., Ball A.D., Iwnicki S.D. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. *2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCOM' 02)*. Beijing, 2002, vol. 3, pp. 1813–1817. DOI: 10.1109/TENCON.2002.1182688.
17. Surkov D.V. Elektromagnitnye sposoby opredeleniya ekscentriciteta i nesimmetrii korotkozamknutoi kletki rotora asinkhronnykh dvigatelei [Electromagnetic methods for determining the eccentricity and asymmetry of a short-circuited rotor cage of asynchronous motors]. Ph.D.'s thesis. Orenburg, 2008, 126 p.
18. Chernushenko A.M., Petrov B.V., Maloratskii L.G., Melanchenko N.E., Bal'sevich A.S. Konstruirovaniye ekranov i SVCh-ustroystv [Designing screens and microwave devices]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1990. 350 p.
19. Apollonskii S.M. Spravochnik po raschetu elektromagnitnykh ekranov [Handbook on the calculation of electromagnetic screens]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1988, 223 p.
20. Gorskii A.N., Vasil'eva L.K. Elektromagnitnye izlucheniya i zashchita ot nikh [Electromagnetic radiation and protection against them]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2000. 100 p.

Информация об авторах

Куприянов Иван Сергеевич, старший преподаватель кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: xpress14@mail.ru.

Information about the authors

Ivan S. Kupriyanov, Assistant Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: xpress14@mail.ru.