

Р. А. Дүрпеv, Д. Г. Бейсеноv²

«ПНХЗ» ЖШС-де каталитикалық крескин шикізатын гидротазарту процесіне жеңіл және ауыр газойльдың эсерін талдау

^{1,2}Химиялық технологиялар және жаратылыстану факультеті,

С. Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік университеті,

Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы.

Материал 12.06.19 баспаға түсті.

R. A. Dürpev¹, D. G. Beisenov²

Analysis of the impact of light and heavy gasoil on the process of hydrotreatment of catalytic cracking raw materials

^{1,2}Faculty of Chemical Technologies and Natural Sciences,

S. Torayghyrov Pavlodar State University,

Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan.

Material received on 12.06.19.

Мақалада өндірістік қорлар (қор қайтарымы) мен қызметкерлердің тиімділігін арттыру мәсілі, талан етілетін өнімділік пен минималды тәуекелдерді пайдалануға жұмсалған шығындарды оңтайландыру, сенімділікті арттыру, техникалық ресурсты ұтымды пайдалану ұсынылған.

The method of increasing the efficiency of productive funds (capital productivity) and staff, optimizing operating costs with minimum risks and required performance, improving reliability, and sustainable use of the technical resource is presented in the article.

РНТИ 45.29.31

О. А. Андреева¹, Т. В. Гоненко²¹к.т.н., ассост. профессор (доцент), Энергетический факультет,

Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова,

г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;

²к.т.н., доцент, Факультет информационных технологий и компьютерных систем, Омский государственный технический университет, г. Омск, 644050,

Российская Федерация;

е-mail: andreeva_oa@mail.ru; ²gonenko_tv@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования магнитного поля асинхронного двигателя. В программном комплексе Ansys Maxwell разработаны математические модели, основанные на методе конечных элементов, которые позволяют исследовать внешнее магнитное поле и магнитное поле воздушного зазора асинхронного двигателя. Выявленные в спектре внешнего магнитного поля асинхронного двигателя гармонические составляющие влияют на спектр радиальной составляющей. С их помощью можно выявить наличие обрыва стержней обмотки ротора и оценить влияние эксплуатационных факторов (несимметрия питающего напряжения, изменение нагрузки, статический и динамический эксцентриситет ротора).

Ключевые слова: математическое моделирование, магнитное поле воздушного зазора, повреждение обмотки асинхронного двигателя.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод конечных элементов является основным численным методом, применяемым для моделирования распределения физического поля. Как правило, метод конечных элементов находит решение любой технической задачи, которая может быть описана конечным набором пространственных уравнений частной производной с определенными граничными начальными условиями.

Одной из ведущих компаний, предлагающих эффективные программные средства для моделирования различных процессов с помощью метода конечных элементов, является Ansys. Поэтому для компьютерного моделирования внешнего магнитного поля (ВМП) асинхронного двигателя (АД) был выбран хорошо зарекомендовавший себя программный комплекс Ansys Maxwell, который обладает широкими возможностями по автоматизации создания моделей электрических машин. В данной статье изучено распределение внешнего магнитного поля и магнитного поля воздушного зазора АД, используя программный пакет моделирования Ansys Maxwell.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для моделирования были выбраны два АД с различным числом пар полюсов, параметры которых представлены в таблице 1. Это позволит в дальнейшем сделать вывод о корректности результатов моделирования, полученных с помощью Ansys Maxwell, и целесообразности дальнейшего применения этого программного комплекса.

Таблица 1 – Параметры тестовых АД

№	Параметр	Тип двигателя	
		ЗВР71-2	АИР 71А6
1	Число пар полюсов	1	3
1	Номинальная мощность, Вт	250	370
1	Напряжение, В	380	380
1	Номинальный ток, А	0,56	1,4
1	Номинальная частота вращения, об/мин	2880	900
1	КПД, %	–	0,65
1	Коэффициент мощности, о.е.	0,83	0,63
1	Число пазов статора	24	36
1	Число стержней обмотки ротора	19	33

На начальном этапе моделирование АД осуществлялось с помощью специального расчетного модуля Ansys Rmxprt, который использует классическую аналитическую теорию электрических машин и метод эквивалентной магнитной цепи для вычисления рабочих характеристик машин с учётом таких эффектов, как нелинейность электротехнической стали, несинусоидальность магнитного потока в зазоре и вытеснение тока в массивных проводниках. Исходные данные, необходимые для создания моделей АД в программном комплексе Ansys Maxwell, взяты из справочной

литературы [2]. С помощью инструмента Rmxprt были рассчитаны основные рабочие характеристики АД, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры АД

Параметр	Тип двигателя	
	ЗВР71-2	АИР71А6
Мощность, Вт	250	370
Фазный ток статора в номинальном режиме, А	0,567	1,38
Частота вращения в номинальном режиме, об/мин	2881,1	945,6
КПД, %	82,4	64,7
Коэффициент мощности в номинальном режиме, о.е.	0,8	0,623

Полученные расчетные характеристики АД оказались весьма близки к номинальным параметрам, представленным в таблице 1.

После подтверждения соответствия расчетных характеристик АД их номинальным значениям, с помощью инструмента Rmxprt было выполнено создание конечноэлементных моделей, в основе которых лежит численное решение дифференциальных уравнений Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями методом конечных элементов [2, 3]

$$\begin{aligned}
 \nabla \times H &= J + \partial D / \partial t, \\
 \nabla \times E &= \partial V / \partial t, \\
 \nabla \times D &= \rho, \\
 \nabla \times J + \partial \rho / \partial t &= 0, \\
 D &= \epsilon \cdot E, \\
 V &= \mu \cdot H, \\
 J &= \sigma \cdot E,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где H – напряженность электрического поля;

J – плотность тока;

D – электрическая индукция;

E – напряжённость электрического поля;

V – магнитная индукция;

ρ – объёмная плотность стороннего электрического заряда;

ϵ – диэлектрическая проницаемость;

μ – магнитная проницаемость;

σ – удельная проводимость.

Помимо самих АД также были смоделированы реальные датчики. В воздушном зазоре каждого АД размещен внутренний индуктивный датчик (ВИД), представляющий собой два витка провода, намотанных на зубец статора. Вблизи корпуса АД размещена точка, имитирующая датчик Холла (ДХ), в которой регистрируется радиальная составляющая индукции магнитного поля. Обрыв стержня ОР моделировался путем удаления одного из стержней из геометрии модели. Геометрия моделей АД вместе с сеткой конечных элементов представлена на рисунке 1, на рисунке 2 показано расположение датчиков.

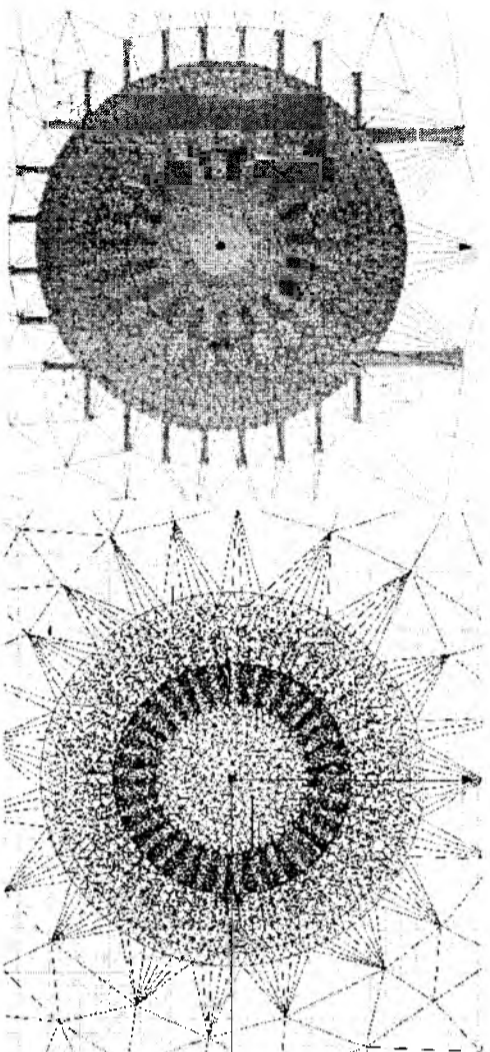


Рисунок 1 – Геометрия математической модели первого (а) и второго (б) АД

Исходными данными являются напряжение, приложенное к выводам обмотки статора в начальный момент пуска, момент сопротивления на валу ротора, геометрия АД и характеристики конструктивных материалов (корпуса, магнитопроводов статора и ротора, проводников обмоток статора и ротора, вала ротора).

Модель первого АД выполнена с обрешечением корпуса, однако эксперименты показали, что обрешечение, выполненное из немагнитных материалов (в данном случае это силумин), практически не влияет на результаты моделирования, поэтому при создании модели второго АД в целях упрощения геометрии и уменьшения количества конечных элементов, корпус АД был сделан гладким.

Геометрия модели второго АД вместе с сеткой конечных элементов представлена на рисунке 1, б, расположение датчиков аналогично рисунку 2.

Разработанные математические модели АД позволяют моделировать процесс пуска машины и ее работу в установившемся режиме. В качестве

граничного условия было принято, что на расстоянии 1 м от корпуса АД векторный магнитный потенциал равен нулю, так как электромагнитные поля исследуемых АД невозможно зарегистрировать при удалении датчика поля от корпуса на расстояние более 40 см. При этом, согласно [1, 2, 3] связь векторного магнитного потенциала A с магнитной индукцией описывается как $B = \nabla \times A$. Ввиду двумерной постановки задачи скос пазов ротора не учитывается.

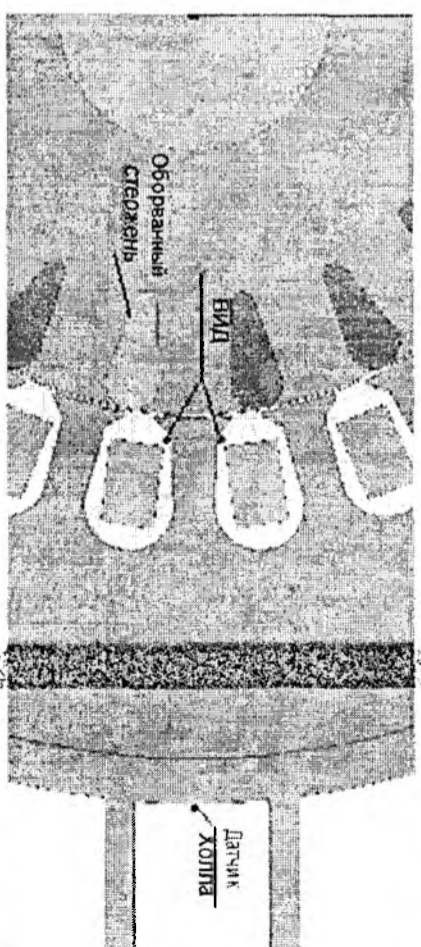


Рисунок 2 – Расположение датчиков на модели двигателя

Согласно [5-6], обрыв стержня клетки ротора вне зависимости от полноты машины приводит к перераспределению тока по стержням. Новое распределение тока можно математически представить в виде суммы первоначального тока (при отсутствии обрыва стержня) и фиктивного (добавочного) тока от оборванного стержня, причем в оборванном стержне фиктивный ток равен и противоположен первоначальному, что обеспечивает равенство нулю тока в оборванном стержне. Из сказанного следует, что обмотку ротора с поврежденными стержнями можно представить двумя обмотками – одна из которой будет исправной, а другая – фиктивной (ФОР), в которой по оборванным стержням протекают фиктивные токи, которые далее замыкаются по исправным стержням. Фиктивные токи наводят в воздушном зазоре машины свое магнитное поле.

Частоты гармоник магнитного поля, вызванного фиктивными токами при любом числе оборванных стержней и расположении их по отношению друг к другу, описываются формулой

$$f_{\text{ФОР}}^{(v \pm)} = f_c \left(\frac{1-s}{p} v \pm s \right) \quad (2)$$

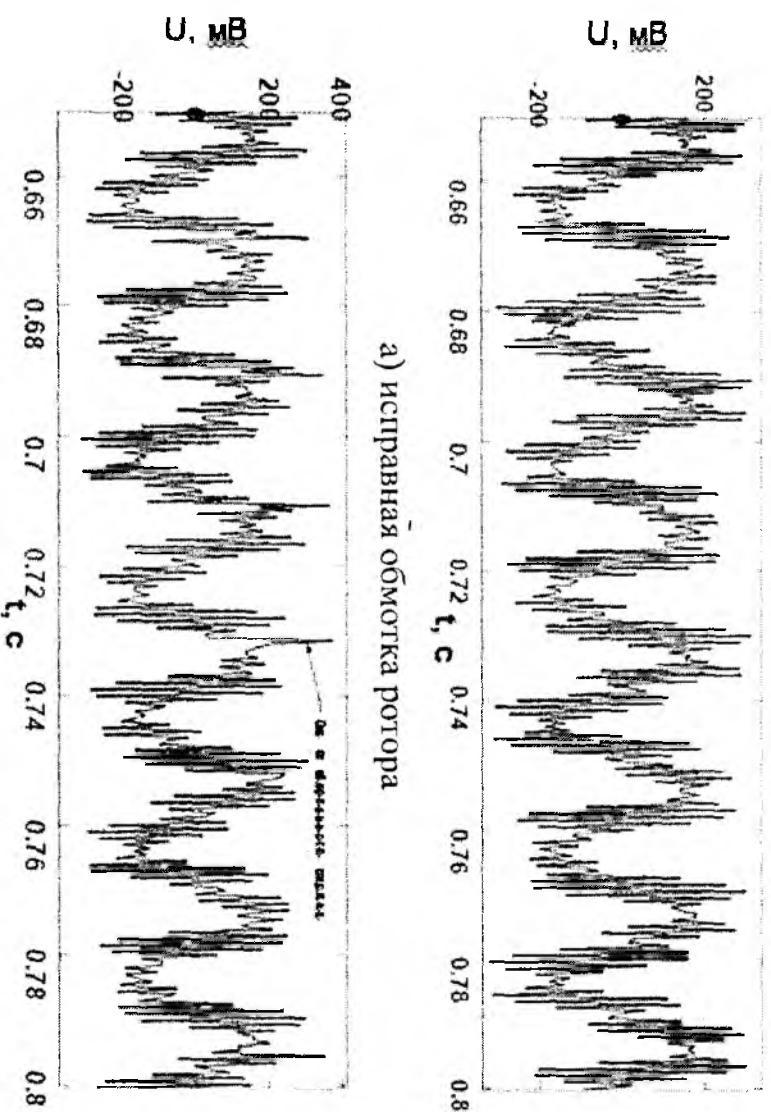
где f_c – частота сети;

s – скольжение;

v – порядок гармоники.

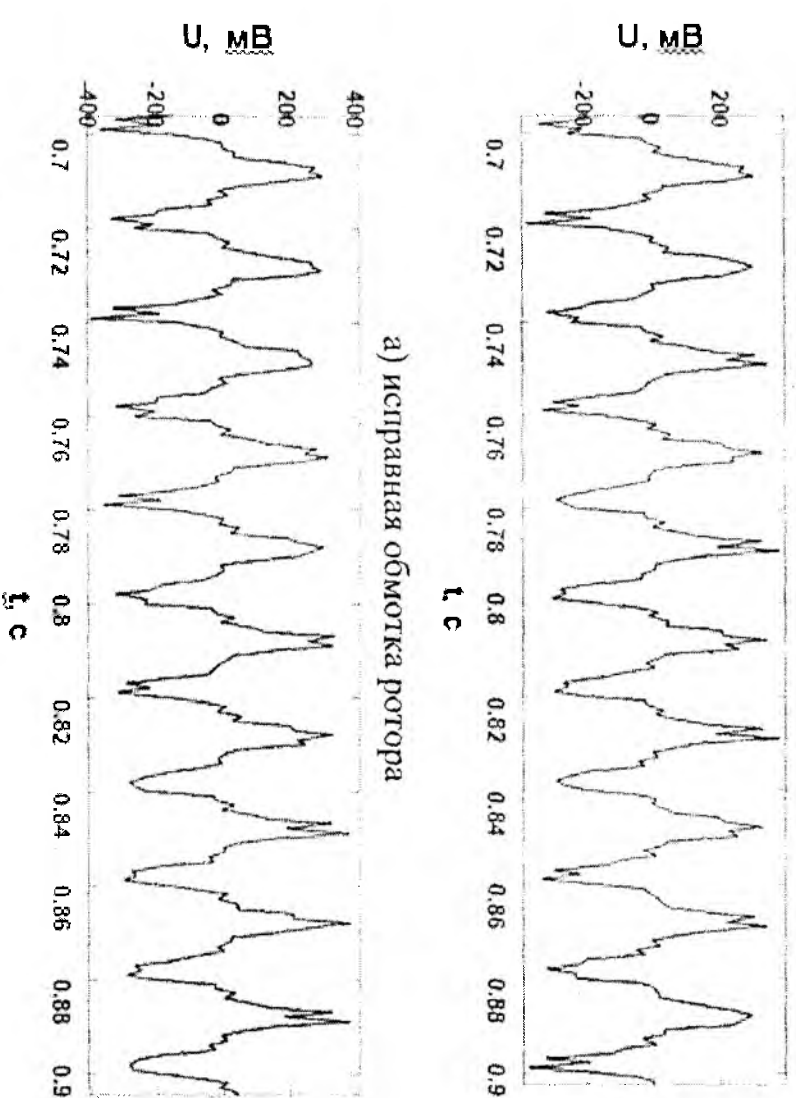
Каждому порядку гармоник амплитудного спектра, генерируемого фиктивными токами, принадлежит две гармоники, одна из которых имеет нижнюю боковую частоту $f_{\text{ФОР}}^{(v-)}$, а другая – верхнюю боковую частоту $f_{\text{ФОР}}^{(v+)}$, значения которых отличаются на величину $\Delta f^{(v)} = 2f_{\text{с}}$. В целях упрощения приняты следующие обозначения гармоник – ФОР_{вд}, где ФОР_{вд} будет обозначать гармонику ФОР v-ого порядка на нижней боковой частоте соответственно, а ФОР_{вн} – на верхней боковой частоте $f_{\text{ФОР}}$.

На рисунках 3 и 4 показаны формы сигналов, полученных с датчиков ВИД АД №1 и АД №2 соответственно при номинальной нагрузке на валу ротора.



б) обмотка ротора с одним оборванным стержнем
Рисунок 3 – Форма сигнала с датчика ВИД АД № 1 при номинальной нагрузке

Для подтверждения корректности работы модели произведем анализ виртуальных сигналов, полученных с датчика ВИД, и сравним их с результатами, полученными из известных литературных источников [4, 5, 6]. Анализ виртуальных данных измерений, полученных в ходе компьютерного моделирования, был произведен с помощью разработанного анализатора спектра, принципы работы которого рассмотрены в [9].



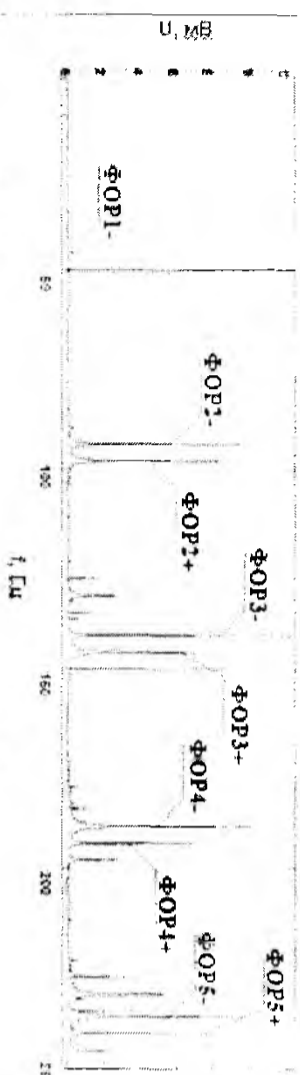
б) обмотка ротора с одним оборванным стержнем
Рисунок 4 – Форма сигнала с датчика ВИД АД № 2 при номинальной нагрузке

С помощью спектрального анализа полученных сигналов произведено исследование воздействия обрыва стержней ОР АД на спектр магнитного поля воздушного зазора.

На рисунках 5, 6 показаны спектры сигналов, полученных с датчиков ВИД АД № 1 и АД № 2 соответственно при номинальной нагрузке. Проанализируем полученные результаты. Из рисунков 5 и 6 видно, что обрыв стержня обмотки ротора действительно существенно влияет на магнитное поле воздушного зазора АД, что выражается в существенном увеличении амплитуд определенных гармонических составляющих сигнала. Например, значительный рост продемонстрировали гармоники, частоты которых совпадают с частотами гармоник ФОР, определяемых выражением (2), при этом относительное увеличение амплитуд может составлять 10 и более раз.



а) исправная обмотка ротора

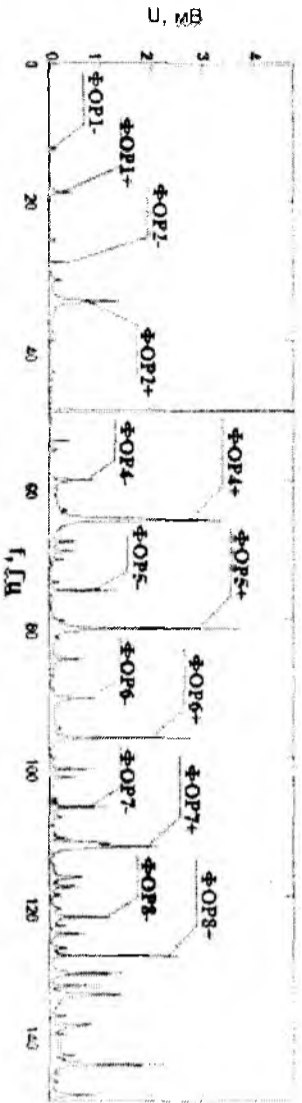


б) обмотка ротора с одним оборванным стержнем

Рисунок 5 – Спектр сигнала с датчика ВИД АД № 1 при номинальной нагрузке



а) исправная обмотка ротора



б) обмотка ротора с одним оборванным стержнем

Рисунок 6 – Спектр сигнала с датчика ВИД АД № 2 при номинальной нагрузке

Полученные результаты согласуются с данными из открытых источников [4, 5, 6] и результатами экспериментов. Таким образом, можно сделать вывод, что обнаруженные гармоники действительно являются гармониками ФОР, а компьютерное моделирование магнитного поля воздушного зазора АД с поврежденной ОР с помощью Ansys Maxwell является корректным.

Из результатов исследований, приведенных в [5], следует, что величина амплитуды какой-то одной конкретной гармоники ФОР зависит от числа и места расположения оборванных стержней в ОР. Поэтому в некоторых случаях ее величина при наличии поврежденных стержней может быть близка к нулю.

Ввиду вышесказанного, с точки зрения обеспечения достоверности результатов контроля, полагаются на измерение какой-то одной гармоники нерационально, поэтому целесообразно подобрать такой диагностический параметр обрыва стержней обмотки ротора, который учитывал бы амплитуды сразу нескольких гармоник ФОР.

В качестве такого диагностического параметра предлагается интегральный показатель – средняя мощность сигнала индукции ВМП, которая может быть определена по равенству Парсевала [9] по выражению

$$P_{\text{ФОР}} = \frac{1}{2} \left(\sum_{v=1}^n B^{v-2} + \sum_{v \neq n} B^{v+2} \right) \quad (3)$$

где B_v , B_{v+} – амплитуды гармоник ФОР v -го порядка на нижней (v^-) и верхней (v^+) боковой частотах;

n – предельный порядок учитываемых гармоник.

Данная величина позволит оценивать состояние ОР не путём сравнения амплитуды каждой гармонической составляющей с граничными значениями, а путём сравнения значения всего одного параметра с граничным. При этом даже в случае возрастания отдельных гармонических составляющих значение средней мощности сигнала будет определяться совокупностью гармоник, что позволит оценивать состояние двигателя с более высокой достоверностью.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования показали, что обрыв стержня ОР приводит к почти стократному увеличению средней мощности сигнала ФОР. В реальных АД это соотношение должно быть меньше из-за естественной несимметрии ОР, эксцентриситета ротора и иных факторов.

На основании представленных выше результатов можно сказать, что средняя мощность сигнала ФОР может быть использована в качестве диагностического параметра для определения повреждений ОР АД.

Результаты исследования показали, что гармоники высоких порядков практически не оказывают влияния на величину средней мощности, что особенно явно выражено для АД № 1 с одной парой полюсов, поэтому для определения средней мощности сигнала ФОР будет вполне достаточно ограничиться гармониками пятого порядка.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что математические модели, основанные на методе конечных элементов, позволяют получить достоверные результаты при моделировании радиальной составляющей ВМП АД с оборванным стержнем ОР и могут быть использованы на практике для определения пороговых значений диагностического параметра обрыва стержней ОР.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Иванов-Смоленский, А. В.** Электрические машины: Учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- 2 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов / Л. А. Бессонов. – 8-е изд. – М., Высш. шк., 1986. – 263 с.
- 3 **Сильвестер, П.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
- 4 **Расказачиков, А. В.** Разработка и исследование системы эксплуатационного контроля электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. канд. тех. наук: 05.14.02. – ЛПИ, 1982. – 195 с.
- 5 **Скоробогатов, А. А.** Разработка методов контроля состояния короткозамкнуток обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Иваново, 2006. – 155 с.
- 6 Rotor fault and location detector for induction motors: pat. USA US4808932 A G01R 31/02, 1989.
- 7 **Клюков, Б. К.** Ремонт обмоток электрических машин высокого напряжения: Учебное пособие / Б. К. Клюков, Р. Б. Уманцев. – М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.
- 8 **Кузнецов, Н. Л.** Надежность электрических машин: Учебное пособие / О. А. Андреева; О. А. Андреева. – М.: Энергия, 1980. – 191 с.
- 9 **Андреева, О. А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций: Дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. – Новосибирск, 2009. – 159 с. 187
- 10 O'Donnell P. IEEE Reliability Working Group. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part I, II & III. / P. O'Donnell // IEEE Transactions on Industry Applications, 1985. – vol. IA-21. – № 4. – P. 853–872.

- 11 **Tavner, P.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Tavner et al. – The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 543 p.
- 12 **Глазырина, Т. А.** Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: Дис. канд. тех. наук: 05.14.02. – Томск, 2012. – 120 с.

Материал поступил в редакцию 12.06.19.

О. А. Андреева¹, Т. В. Гоненко²

Асинхронды қозғалтқыштың зақымдануын диагностикалау үшін соңғы элементтер әдісімен сыртқы магнит өрісін компьютерлік модельдеуді қолдану

¹Энергетика факультеті,

С. Торайғырова атындағы Павлодар мемлекеттік университеті,
Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы;

²Ақпараттық технологиялар және компьютерлік жүйелер факультеті,
Омбы мемлекеттік техникалық университеті,
Омбы қ., 644050, Ресей Федерациясы.
Материал 12.06.19 бастаға түсті.

О. А. Андреева¹, Т. В. Гоненко²

The use of computer modeling of the external magnetic field by the finite element method to diagnose damage to the induction motor

¹Faculty of Energy Engineering,

S. Torayghyrov Pavlodar State University,
Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan;

²Faculty of Information Technologies and Computer Systems,
Omsk State Technical University,
Omsk, 644050, Russian Federation.
Material received on 12.06.19.

Мақалада асинхронды қозғалтқыштың магнит өрісін математикалық модельдеу мәселелері қарастырылады. Ansys Maxwell бағдарламалық кешенінде асинхронды қозғалтқыштың ауа саңылауының магниттік өрісін және сыртқы магнит өрісін зерттеуге мүмкіндік беретін соңғы элементтердің әдісіне негізделген математикалық модельдер жасалған. Модельдеу нәтижелерін пайдалану асинхронды қозғалтқыштың сыртқы магнит өрісінің спектрінде радиалды құрауыштың спектріне әсер ететін гармоникалық құрауыштар бар екенін көрсетті. Олардың көмегімен