

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ

В.В. Бобров, В.Н. Веденев

В статье рассматривается процесс образования гармоник во внешнем магнитном поле асинхронного двигателя. Производится расчет магнитного поля зазора и осевой составляющей внешнего магнитного поля, а также предлагается универсальный диагностический параметр – коэффициент гармоники.

Ключевые слова: электродвигатель, гармоники, диагностика, внешнее магнитное поле.

В современных условиях сельхозпроизводителям, ученым, отраслевым организациям и органам управления агропромышленного комплекса (АПК) важно объединить усилия в повышении эффективности производства сельскохозяйственной продукции на всех этапах от производства продукции до эксплуатации применяемого оборудования.

Анализ современных средств и методов ремонта, технического обслуживания и диагностики, применяемых в агропромышленном комплексе, показывает их недостаточную развитость в сравнении с остальными сферами хозяйства страны.

Широкое применение инноваций является наиболее действенным и эффективным средством решения социально-экономических задач АПК по обеспечению населения продовольствием, увеличению уровня жизни сельского населения, повышению эффективности агропромышленного производства, сохранению окружающей среды. Вследствие этого, одной из первостепенных задач стоит разработка средств и методов по повышению качества ремонта, технического обслуживания и диагностики электрооборудования.

Анализ применяемого в сельском хозяйстве электрооборудования показывает, что короткозамкнутый асинхронный двигатель (АД) является наиболее распространенным видом привода. Наряду с распространенностью, АД является еще и одним из слабых звеньев в любом технологическом процессе. Связанно это с тем, что отказы электрического двигателя вызывают нарушение технологического процесса, что наносит значительный ущерб предприятию из-за невыпуска продукции. Кроме того, для восстановления электродвигателей затрачивается большое количество материалов (обмоточного провода,

электротехнической стали, изоляционного материала), электроэнергии, рабочего времени.

Так, при среднем (расчетном) сроке службы 15 лет (наработка 40 тысяч часов) около 20 % электродвигателей ежегодно выходят из строя. Неисправности двигателей обычно возникают в результате износа деталей и старения материалов, а также при нарушении правил технической эксплуатации.

Успех и своевременность ремонта во многом зависят от правильного установления причин всех неисправностей и повреждений поступающего в ремонт АД. Но существующие методы диагностики имеют множество недостатков, вследствие чего не удается получить значительного сокращения числа поломок. Для решения данной проблемы в настоящее время на кафедре электроснабжения промышленных предприятий АлтГТУ разрабатывается несколько высокоперспективных методов оценки технического состояния АД. Одним из них является магнитодиагностика.

Магнитодиагностика (назван по аналогии с вибродиагностикой) – это новый метод оценки технического состояния асинхронного двигателя на основе анализа его внешнего магнитного поля (ВМП).

Несмотря на то, что данный метод диагностики является высокоэффективным, он не лишен недостатков. Основными недостатками магнитодиагностики на сегодняшнем этапе разработки являются: а) измерение внешнего магнитного поля должно производиться по периметру кожуха АД, что не всегда возможно; б) измеряемая составляющая ВМП, несмотря на большую информативность, имеет и большую зашумленность, а также на поле сильно сказывается форма кожуха АД; в) применяемый диагностический параметр (амплитуда гармоник ВМП) зависит от качества электрической энергии, подаваемой на

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ

АД; г) отсутствует подтвержденная экспериментами модель или зависимость между параметрами АД и характером спектра ВМП.

Вследствие этого возникает противоречие: с одной стороны, есть высокоперспективный метод оценки технического состояния асинхронных двигателей, а с другой – применение его сильно ограничено существующими недостатками данного метода.

Таким образом, целью настоящей работы является решение вышеизложенных проблем и расширение сферы применения магнитодиагностики.

Как известно, обмотки любой электрической машины представляют собой проводники, соединенные определенным образом и расположенные по обеим сторонам воздушного зазора. Протекающий по этим проводникам электрический ток создает магнитное поле, изменение которого во времени и пространстве представляет собой один из наиболее важных факторов, определяющих характеристики машины [1].

Выделяют три составляющие внешнего магнитного поля: радиальную составляющую H_r , тангенциальную H_t и осевую H_o (рисунок 1) [2]. Многочисленные эксперименты показали, что наиболее информативной является осевая составляющая. Кроме того, она характеризуется однородностью поля в пространстве и небольшой амплитудой [3].

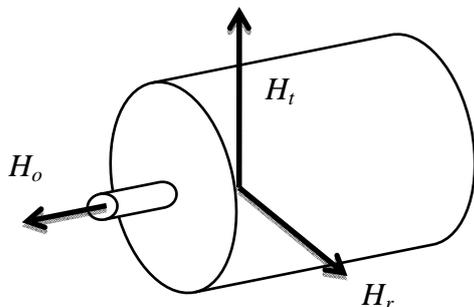


Рисунок 1 – Внешнее магнитное поле асинхронного двигателя

Внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя образуется в пространстве вокруг двигателя в процессе его эксплуатации и представляет собой отголоски мультипликативного поля магнитного зазора. Поэтому для изучения ВМП с целью его дальнейшего использования для оценки состояния АД необходимо исследовать магнитное поле зазора.

Для нахождения распределения линейной нагрузки вдоль окружности воздушного

зазора необходимо детальное изучение обмотки машины. Поэтому удобнее рассмотреть сначала магнитное поле, создаваемое одним проводником, расположенным в точке P с координатами $(1, \alpha)$, по которому протекает ток i (рисунок 2). Магнитное поле, создаваемое произвольной системой проводников, может быть получено методом наложения полей отдельных проводников.

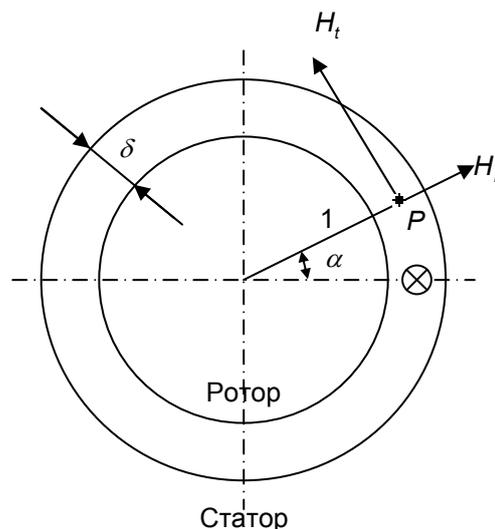


Рисунок 2 – К расчету поля одного проводника

В любом замкнутом контуре ротора электрический ток отсутствует ($\int H dl = I = 0$).

Следовательно, не существует магнитного потока, замыкающегося только по самому ротору, т.е. напряженность магнитного поля в роторе не имеет тангенциальной составляющей H_t . С другой стороны, в статоре любая окружность, concentричная воздушному зазору, охватывает полный ток, т.е. в статоре всегда существует замкнутый магнитный поток и магнитное поле имеет составляющую H_t .

С учетом этих положений, а также принимая во внимание, что функции H_r и H_t должны быть симметричными и нечетными для любого замкнутого контура, проходящего через ротор и статор и симметричного относительно проводника, можно записать

$$2 \left(H_r \delta + r \int_0^\alpha H_t d\alpha \right) = i. \quad (1)$$

Решая данное уравнение, получаем

$$H_r(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right). \quad (2)$$

Распределение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемого одним проводником с током i , показано на рисунке 3.

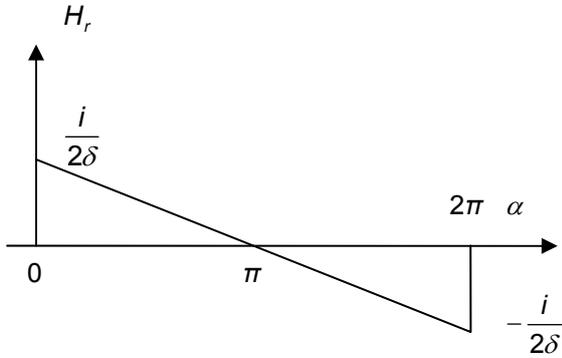


Рисунок 3 – Распределение напряженности магнитного поля одного проводника

Как видно из рисунка 3, функция $H_r(\alpha)$, заданная в интервале $0 < \alpha < 2\pi$, может быть разложена в ряд Фурье

$$H_r(\alpha) = \frac{i}{\pi\delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v\alpha, \quad (3)$$

где $v = 1, 2, 3, \dots$

Кривая напряженности магнитного поля одного проводника содержит все (четные и нечетные) гармоники, из которых основная гармоника порядка $v = 1$ имеет период, равный 2π , т.е. полной длине внутренней окружности сердечника статора.

Магнитное поле в воздушном зазоре, создаваемое одним витком с током, может быть определено как сумма полей двух проводников, сдвинутых друг относительно друга на угол α_y , по которым протекает один и тот же ток, но в противоположных направлениях. Полагая снова ток в проводниках равный i и учитывая (2), можем записать для витка, согласно рисунку 4, следующие уравнения:

– напряженность магнитного поля, создаваемого током в проводнике 1,

$$H_{r1}(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left[1 - \frac{(2\alpha + \alpha_y)}{2\pi} \right]$$

в интервале $0 < \alpha < \left(2\pi - \frac{\alpha_y}{2} \right)$;

$$H'_{r1}(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left[3 - \frac{(2\alpha - \alpha_y)}{2\pi} \right]$$

в интервале $\left(2\pi - \frac{\alpha_y}{2} \right) < \alpha < 2\pi$;

– напряженность магнитного поля, создаваемого током в проводнике 2,

$$H_{r2}(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left[1 + \frac{(2\alpha - \alpha_y)}{2\pi} \right]$$

в интервале $0 < \alpha < \frac{\alpha_y}{2}$;

$$H'_{r2}(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left[-1 + \frac{(2\alpha - \alpha_y)}{2\pi} \right]$$

в интервале $\frac{\alpha_y}{2} < \alpha < 2\pi$.

Тогда результирующая напряженность:

$$H_r(\alpha) = H_{r1}(\alpha) + H_{r2}(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left[2 - \frac{\alpha_y}{\pi} \right]$$

в интервале $0 < \alpha < \frac{\alpha_y}{2}$;

$$H'_r(\alpha) = H'_{r1}(\alpha) + H'_{r2}(\alpha) = -\frac{i}{2\delta} \frac{\alpha_y}{\pi}$$

в интервале $\frac{\alpha_y}{2} < \alpha < \left(2\pi - \frac{\alpha_y}{2} \right)$;

$$H''_r(\alpha) = H'_{r1}(\alpha) + H'_{r2}(\alpha) = \frac{i}{2\delta} \left[2 - \frac{\alpha_y}{\pi} \right]$$

в интервале $\left(2\pi - \frac{\alpha_y}{2} \right) < \alpha < 2\pi$.

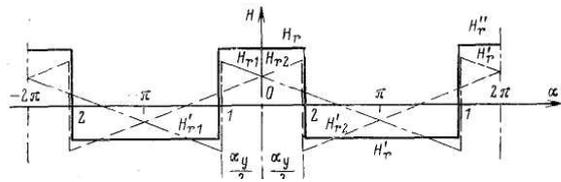


Рисунок 4 – Распределение напряженности магнитного поля одного витка

Напряженность результирующего магнитного поля в воздушном зазоре двигателя, определенная в системе координат с началом на оси витка, является периодической функцией, которая может быть разложена в ряд Фурье [1]

$$H_r(\alpha) = \frac{2i}{\pi\delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \cos v\alpha, \quad (4)$$

где $v = 1, 2, 3, \dots$

Магнитное поле группы, состоящей из N витков, сдвинутых друг относительно друга на постоянный угол α_1 , по которым протекает

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ
РАЗРАБОТКИ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ

один и тот же ток i , легче всего определить, пользуясь методом наложения, как сумму полей отдельных витков

$$H(\alpha) = \frac{2i}{\pi\delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \times \{ \cos v\alpha [1 + \cos v\alpha_1 + \dots + \cos v(N-1)\alpha_1] + \sin v\alpha [\sin v\alpha_1 + \sin v2\alpha_1 + \dots + \sin v(N-1)\alpha_1] \}.$$

Суммируя ряды в квадратных скобках, получаем выражение

$$H(\alpha) = N \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\sin Nv \frac{\alpha_1}{2}}{N \sin v \frac{\alpha_1}{2}} H'_v(\alpha'), \quad (5)$$

где $H'_v(\alpha) = \frac{2i}{\pi\delta} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \cos v\alpha'$ представляет собой напряженность гармоники v магнитного поля витка, симметричного относительно оси группы витков [2].

Рассмотрим 3 группы по N витков в каждой. Оси групп сдвинуты на угол $2/3 \cdot \pi$ друг относительно друга. В каждой группе из N витков протекает ток одной фазы симметричной 3-фазной системы, т.е. токи в каждой группе витков имеют амплитуду $\sqrt{2}I$, угловую частоту ω и сдвинуты во времени друг относительно друга на угол $2/3 \cdot \pi$ [4]. В соответствии с (5) для напряженности магнитного поля обмотки двигателя можно написать следующее уравнение

$$H(\alpha, t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi\delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \times \left\{ I_1 \frac{\sin N_1 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left((\omega t + v\alpha) - (v+1) \frac{0}{3} 2\pi \right) + \sin \left((\omega t - v\alpha) + (v-1) \frac{0}{3} 2\pi \right) \right] + I_2 \frac{\sin N_2 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left((\omega t + v\alpha) - (v+1) \frac{1}{3} 2\pi \right) + \sin \left((\omega t - v\alpha) + (v-1) \frac{1}{3} 2\pi \right) \right] + I_3 \frac{\sin N_3 v \frac{\alpha_1}{2}}{\sin v \frac{\alpha_1}{2}} \left[\sin \left((\omega t + v\alpha) - (v+1) \frac{2}{3} 2\pi \right) + \sin \left((\omega t - v\alpha) + (v-1) \frac{2}{3} 2\pi \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Анализ уравнения (6) показывает, что магнитное поле в зазоре содержит бесконечное число гармоник, при этом их порядок для 3-х фазной машины равен $v = p(6c \pm 1)$, где $c = 1, 2, \dots$. Основным источником гармоник является форма магнитного поля зазора, создаваемого обмоткой статора. Помимо формы, гармоники создаются еще рядом факторов, но они не учитываются, так как имеют или относительно высокий порядок, или их влияние минимально. Следует отметить, что отмотка ротора также создает гармоническое магнитное поле, но так как гармоники имеют высокий порядок равный $v = cZ_2 \pm p$, где Z_2 – число пазов ротора, $c = 1, 2, \dots$, то они не учитываются.

В процессе работы АД, гармоники, образовавшиеся в зазоре, наводят ЭДС в обмотке статора, что можно зафиксировать по спектральному анализу потребляемого электрической машиной тока.

В результате при протекании тока по обмотке, в лобовой части формируется осевая гармоническая составляющая ВМП, представляющая сумму магнитных полей, создаваемых каждым проводником лобовой части.

Авторами аналитически была выбрана “диагностическая” точка, в которой необходимо определять гармонический состав ВМП – это конец оси вала АД. Выбор данного места связан с тем, что расстояние до него от каждого из проводников лобовой части одинаково, а также ось ротора в данном случае выступает в роли магнитного сердечника.

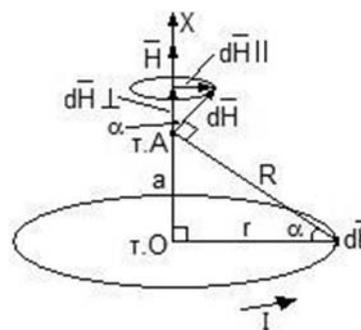


Рисунок 5 – Напряженность, создаваемая проводником I в точке A

Напряженность в точке A , создаваемая одним проводником, согласно теореме циркуляции магнитного поля и закону Био-Савара-Лапласа равна

$$dH_o(t) = \frac{I(t)dl}{4\pi R^2}, \quad (7)$$

где $I(t)$ – переменный ток в проводнике, R – расстояние от точки А до проводника с током.

Эту напряженность можно разложить на две составляющие, одна из которых направлена вдоль оси OX (dH_{\perp}), а другая лежит в плоскости, параллельной плоскости контура (dH_{\parallel}). Из рисунка 5 находим:

$$dH_{\perp} = dH_o \cos \alpha, \quad dH_{\parallel} = dH_o \sin \alpha,$$

где $\cos \alpha = r/R$, $\sin \alpha = a/R$.

Итоговая напряженность складывается из суммы векторов напряженностей, создаваемых элементарными участками. Легко заметить, что напряженности dH_{\parallel} , создаваемые противоположными элементарными участками контура, одинаковы по величине и противоположны по направлению, поэтому они взаимно компенсируются, и итоговая составляющая напряженности, в плоскости параллельной плоскости контура, равна нулю.

Составляющие же dH_{\perp} , создаваемые различными элементарными участками (dl), одинаковы по величине и по направлению (вверх вдоль оси OX), поэтому результирующая напряженность одного витка (H') направлена вверх вдоль оси OX и равна

$$H'_o(t) = dH_o(t) \cos \alpha = \frac{rI(t)}{4\pi R^3} \alpha_y r = \frac{I(t) \alpha_y r^2}{4\pi R^3}, \quad (8)$$

где α_y – шаг обмотки в радианах (для марки АИР71А2 $Z = 24$, $y = 9, 11$ (2-11, 1-12), $\alpha_y(y_1 = 9) = 2,356$ рад, $\alpha_y(y_2 = 11) = 2,880$ рад), R – расстояние от проводника с током до точки А, $R = \sqrt{r^2 + a^2}$, где r – средний радиус лобовой части обмотки, a – длина наружной части оси вала [4].

Напряженность для группы витков N будет равна

$$H_o(t) = H'_o(t)N = NI(t) \frac{\alpha_y r^2}{4\pi R^3}.$$

На одну фазу приходится $2q$ групп по N витков, расположенных друг напротив друга. Исходя из этого, можно записать

$$H_o(t) = qN_1 I(t) \frac{\bar{\alpha}_y r^2}{4\pi R^3} - qN_2 I(t) \frac{\bar{\alpha}_y r^2}{4\pi R^3} =$$

$$= qI(t) \frac{\bar{\alpha}_y r^2}{4\pi R^3} (N_1 - N_2), \quad (9)$$

где $\bar{\alpha}_y$ – средний шаг обмотки для q групп, $N_{1,2}$ – количество витков групп.

Для каждой фазы получаем:

$$H_A = I_A \frac{\bar{\alpha}_y r^2}{4\pi R^3} (qN_{1A} - qN_{2A});$$

$$H_B = I_B \frac{\bar{\alpha}_y r^2}{4\pi R^3} (qN_{1B} - qN_{2B}); \quad (10)$$

$$H_C = I_C \frac{\bar{\alpha}_y r^2}{4\pi R^3} (qN_{1C} - qN_{2C}).$$

Исходя из выражения (10) видно, что при условии идеальности состояния изоляции обмотки статора и качества подводимого напряжения, сумма напряженностей внешнего магнитного поля электрического двигателя равна нулю.

На практике большое влияние на симметричность фаз оказывает качество изготовления электродвигателя, поэтому даже у нового двигателя в спектре напряженности присутствует, как минимум, основная гармоника 50 Гц, хотя она и имеет очень малую амплитуду.

Рассмотрим случай образования межвиткового замыкания. В данном случае количество витков обмотки становится равным $N_m - N'_m$, где N'_m – количество короткозамкнутых витков. За счет снижения количества витков обмотки снижается амплитуда создаваемого магнитного поля. Кроме того, в короткозамкнутом контуре, по правилу Ленца, наводится индукционный ток, который сдвигает магнитный поток, создаваемый обмоткой, на угол φ' . Исходя из этого, а также учитывая уравнения (5) и (10), получаем математическую зависимость осевой составляющей внешнего магнитного поля от параметров обмотки статора и образовавшегося в одной из групп обмотки межвиткового замыкания

$$H'_m(t) = I_m N'_m \frac{\sqrt{2} \bar{\alpha}_y r^2}{2\pi R^3} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin v \frac{\alpha_y}{2} \times$$

$$\times \frac{\sin N'_m v \frac{\alpha_1}{2}}{N'_m \sin v \frac{\alpha_1}{2}} [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \varphi')]. \quad (11)$$

При этом порядок гармоник удовлетворяет условию $v = p(6c \pm 1)$.

Многочисленные опыты показали, что абсолютное значение напряженности несколько отличается от расчетного. Происходит это по причине влияния лобовой крышки АД. Ввиду этого вводится дополнительный коэффициент k_3 – коэффициент затухания

$$H'_{mn}(t) = k_n H'_m(t).$$

Анализ разработанной модели показал, что у идеального двигателя амплитуда любой гармоники будет равна нулю. При этом ухуд-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2012

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ИХ СОСТОЯНИЯ

шение качества подводимого напряжения не будет оказывать какого-либо влияния. С другой стороны, при появлении дефекта влияние качества напряжения будет существенно, что может сказаться на оценке технического состояния АД в худшую сторону. Для решения данного противоречия вводится диагностический параметр – коэффициент гармоника

$$k_v = \frac{H'_v}{H'_1}. \quad (12)$$

Суть данного коэффициента заключается в приведении амплитуды исследуемой гармоники к базовой.

Для подтверждения адекватности полученной математической модели и предложенного диагностического параметра автором была проведена серия опытов, в которых производилось физическое моделирование образования дефектов обмотки статора и изменение качества подводимого напряжения. Результаты опытов подтвердили сделанные ранее предположения (рисунок 6).

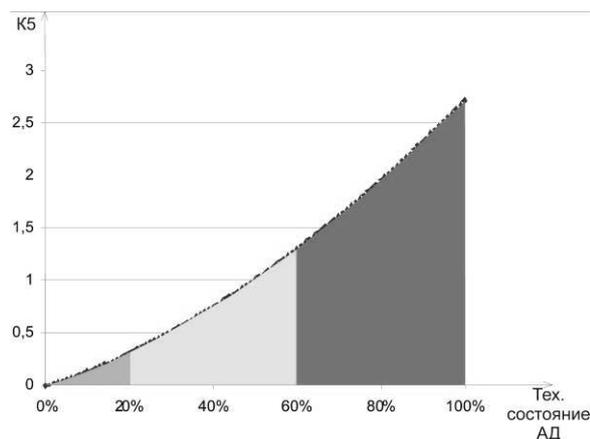


Рисунок 6 – Влияние технического состояния двигателя на коэффициент гармоник K5

Таким образом, результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволили предложить коэффициент гармоник, который является наилучшим диагностическим параметром при диагностике АД на основе анализа характеристик его внешнего магнитного поля.

Основываясь на данном параметре, была разработана диагностическая система, благодаря которой открывается возможность осуществления диагностики низковольтных асинхронных электродвигателей без проведения периодических осмотров [5, 6]. Другими словами, созданная диагностическая сис-

тема, внедряемая в производство на любой стадии эксплуатации оборудования, может выявить зарождающиеся дефекты обмотки и подшипникового узла асинхронного двигателя и, как следствие, значительно повысить его энергоэффективность. Кроме того, в настоящее время проводятся исследования по адаптации предлагаемой системы диагностики изоляции применительно к высоковольтным (6 и 10 кВ) электрическим двигателям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек, А. И. Электрические машины: учеб. пособие для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Высшая школа, 1974. – 824 с.: ил.
2. Геллер, Б. Н. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Б. Н. Геллер, В. Г. Гамата; под общ. ред. З. Г. Каганова. – пер. с англ. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.: ил.
3. Бобров, В. В. Внешнее магнитное поле асинхронного двигателя как отголосок поля в зазоре [Текст] // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: сборник трудов Международной научно-практической конференции / В. В. Бобров, И. Ю. Братухин, В. Н. Веденев, С. О. Хомутов / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд-ние. – Новосибирск, 2009. – С. 289-292.
4. Веденев, В. Н. Расчет внешнего магнитного поля асинхронного двигателя [Текст] // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: сборник трудов Международной научно-практической конференции / В. Н. Веденев, С. О. Хомутов / Россельхозакадемия. Сиб. регион. отд-ние. – Новосибирск, 2009. – С. 292-298.
5. Хомутов, С. О. Комплекс мероприятий по повышению надежности электрических двигателей в сельском хозяйстве на основе достоверных методов диагностики и эффективных технологий восстановления изоляции [Текст] / С. О. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4. – С. 15-21.
6. Бобров, В. В. Зависимость спектра напряженности внешнего магнитного поля от технического состояния электродвигателя [Текст] / В. В. Бобров // Наука, технологии, инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях. – Новосибирск: Изд-во НКТУ, 2010. – Часть 2. – С. 207-209.

Бобров Владислав Владимирович¹ – ведущий специалист, E-mail: bobrov@ake.ttb.ru

Веденев Владимир Николаевич² – ведущий проектировщик, E-mail: vedenev@soyuzenergo.ru

¹ ОАО "Сетевая компания Алтайкрайэнерго" Барнаул

² ООО "Союзэнергопроект", Барнаул