

## TÁBIYIY HÁM TEXNIKALÍQ ILIMLER

Fizika-matematika. Texnika. Informatika

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТОКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Н.М.Арипов – доктор технических наук, профессор

Ташкентский государственный транспортный университет

М.К.Отажонova – докторант

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

**Таянч сўзлар:** асинхрон двигатель, ҳолат мониторинг, юқори гармоникалар, ток спектори тахлили (MCSA).**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, мониторинг состояния, высшие гармоники, анализ спектра тока (MCSA).**Key words:** asynchronous motor, state monitoring, higher harmonics, Motor Current Signature Analysis (MCSA).

**Введение.** Оценка технического состояния асинхронного двигателя (АД) представляет собой важную задачу, решение которой способствует повышению надежности, снижению аварийных ситуаций, сокращению расходов и потерь рабочего времени, связанных с внеплановыми ремонтами оборудования и технологическими неполадками. Диагностика технического состояния АД, работающих в качестве ответственных приводов, является важной задачей, авария которых может вызвать задержку целого технологического процесса. Проблема обеспечения высокой надежности работы АД с каждым годом становится все более актуальной во всем мире.

Наряду с этим эксплуатация неисправного АД также приводит к косвенным непродуктивным затратам электроэнергии, вызванным снижением коэффициента полезного действия (КПД) ввиду дополнительных потерь, и как следствие повышения потребляемых токов.

Методы электромагнитной диагностики АД основаны на измерении электрических и магнитных величин, зависящих от прогрессивности дефекта. Данные методы позволяют обеспечить точную диагностику, так как измеряемые величины непосредственно зависят от дефекта [1-3].

Новые информационные технологии позволяют проводить автоматический мониторинг технического состояния машины и при установке системы оперативной диагностики повысить надежность работы АД.

**Литература и методология.** В большинстве современных автоматических систем управления технологическим процессом предусмотрены функции измерения токов и напряжений двигателей технологических агрегатов, что позволяет в ряде случаев снизить затраты на внедрение систем токовой диагностики и делает данный метод диагностирования перспективным. Создание диагностических методов токовой диагностики с применением алгоритмов искусственного интеллекта способствует в перспективе к их использованию в современных электроэнергетических системах [4, 8].

Достоинствами токовой диагностики являются [9]: возможность выполнения измерений без непосредственного доступа к двигателю, определение технического состояния электрической и механической части двигателя. К недостаткам можно отнести [7]: наличие доминирующей составляющей тока с частотой питающей сети, превышающей на несколько порядков

другие составляющие тока, отвечающие за появление повреждений в машине; изменения в силовом токе приводного двигателя из-за износа и дефектов могут иметь как периодический, так случайный и импульсный характер.

Последние годы в большинстве научных работах [4-6] рассматривается метод анализа спектра потребляемого тока, называемого Motor Current Signature Analysis – MCSA. Наличие в спектре тока двигателя характерных частот определенной величины свидетельствует о неисправности в работе двигателя. Следует подчеркнуть, что метод MCSA основан на анализе тока только одной фазы, и его применение в ряде случаев не всегда может обеспечить достаточный уровень диагностирования асинхронного двигателя. В большинстве случаев метод MCSA основан на сопоставлении спектров диагностируемого асинхронного двигателя с его эталонным спектром, полученным при вводе двигателя в эксплуатацию.

**Методология.** При работе АД происходит генерация естественных возмущений в виде возникающих колебаний, отражающих электромагнитные и электродинамические силы, которые в конечном счете оказывают влияние на гармонических состав потребляемых токов. В связи с этим предполагается, что является необходимым краткое описание возникающих процессов в работе АД.

В машинах переменного тока электромагнитные силы имеют частоту в два раза выше частоты магнитного поля, так как они пропорциональны величине магнитного поля без учета его направления:  $f_{\text{эм}} = 2f_1$ .

При симметричной обмотке ротора электродинамические силы не имеют переменных составляющих, а формируют только рабочий момент. Если наведенные в обмотке токи несимметричны, то появляется низкочастотный пульсирующий момент с двойной частотой скольжения:

$$f_{2s} = f_1 \cdot 2s, \quad (1)$$

где  $s = (f_1 - f_r)/f_1$  – скольжение ротора;  $f_1$  – частота питающей сети, Гц.

Колебания в АД, обусловленные электродинамическими силами, также возникают на удвоенной частоте сети. Сила электродинамического воздействия между двумя проводниками с синусоидальными токами имеет удвоенную частоту относительно частоты сети  $f_{\text{эм}} = 2f_1$ .

Колебания, возбуждаемые подшипниками качения представляют собой упругие волны в диапазоне

средних и высоких частот, распространяющиеся по элементам конструкции. Низкочастотные колебания вызываются эксцентриситетом и неуравновешенностью вращающихся масс, а также несовершенством подшипников качения. Среднечастотные колебания возникают вследствие динамического взаимодействия между ротором и статором из-за высших гармоник. При изготовлении деталей подшипников неизбежны отклонения от геометрических форм и размеров в пределах допусков. Эти отклонения вызывают дополнительную вибрацию и, как следствие, износ подшипникового узла [7].

Возникающие неисправности в работе АД, обусловленные механическими и электрическими повреждениями, приводят к возникновению дополнительных колебаний, появляются дополнительные высшие гармоники в магнитном поле, что приводит к изменению спектрального состава потребляемых токов.

В реальных машинах в воздушном зазоре наряду с основной гармоникой имеется бесконечное число гармоник поля. Эти гармоники имеют частоты выше и ниже основной, называемых высшими гармониками. Высшие гармоники отличаются между собой амплитудами и частотами, и принято их делить на временные и пространственные.

Временными гармониками называют гармоники, которые возникают в воздушном зазоре со стороны выводов машины (со стороны сети, вала и теплового вывода). Пространственные гармоники обусловлены конструктивными особенностями и нелинейными параметрами машины.

Пространственные гармоники поля индуцируют в обмотке статора высшие гармоники электродвижущих сил (ЭДС). Для снижения, которых и как следствие улучшения формы кривой ЭДС применяют укорочение шага, скос пазов и распределение обмотки по пазам, чтобы число катушек в катушечной группе было  $q > 1$  и т.д.

Пространственные гармоники, появившиеся из-за конструктивных особенностей и нелинейности параметров машины, оказывают значительное влияние на процессы преобразования энергии в воздушном зазоре.

Кроме того, существуют гармоники более высокого порядка меньшие по амплитуде и другие комбинационные составляющие.

Следует отметить, что гармонический состав реального спектра тока статора АД является результатом электромагнитных явлений, условий питания и специфики механической системы привода. Спектр гармонических составляющих тока содержит гармоники, связанные с конструктивными особенностями двигателя [5,7]:

– высшие гармоники порядков  $6s \pm 1$ , обусловленные соответствующими гармониками магнитодвижущих сил (МДС) обмотки статора:

$$f_{\text{МДС}} = f_1(6 \cdot s \pm 1), \quad (4)$$

где  $s = 1, 2, 3 \dots$  (целые числа). Гармоники кратны частоте 50 Гц.

Гармоники порядка  $6s+1$  вращаются с частотой в 7, 13, 19, ... раз меньшей, чем частота основной гармоники, и в ту же сторону, что и гармоника первого

порядка, гармоники порядка  $6s-1$  вращаются с частотой в 5, 11, 17, ... раз меньшей гармоники первого порядка и в противоположном направлении.

– высшие гармоники, вызванные изменением взаимного расположения пазов статора и ротора:

$$f_{\text{ЗГС - ЗГР}} = f_1 \left( 1 \pm \frac{k \cdot Z_s}{p} \pm \frac{k \cdot Z_r}{p} \right), \quad (7)$$

как правило, на амплитуды зубцовых гармоник значительное влияние оказывает соотношение чисел пазов на статоре и роторе, некоторые соотношения недопустимы, т.к. вызывают значительные вибрации и шум.

– высшие гармоники, вызванные насыщением сердечников:

$$f_{\text{нас}} = f_1 \cdot (p \cdot (2 \cdot k - 1)), \quad (8)$$

в АД малой мощности влияние насыщения путей потоков рассеяния в интервале скольжения  $s=0 \div 1$  является малым и его можно не учитывать.

– высшие гармоники, характеризующиеся числом пар полюсов, вызванные взаимодействием гармоник насыщения с обмоткой ротора:

$$f_{\text{нас, OP}} = f_1 \cdot (p \cdot (2 \cdot k - 1) \pm k \cdot Z_r), \quad (9)$$

так как амплитуды высших гармоник (9) относительно невелики, то ими можно пренебречь [120].

– высшие гармоники, вызванные дискретностью расположения стержней короткозамкнутой обмотки ротора:

$$f_{\text{OP}} = f_1 \left( 1 \pm \frac{k \cdot Z_r}{p} \right). \quad (7)$$

– гармоники с частотами, зависящими от частоты вращения ротора:

$$f_m = |k \cdot f_1 + n \cdot f_r|, \quad (8)$$

где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$  (целые числа).

Следует учитывать гармоники тока, частоты которых связаны с третьей гармоникой по отношению к  $f_1$ , которые могут возникнуть вследствие питания обмоток статора напряжениями, содержащими третью гармонику, также второй причиной их появления является насыщение магнитной цепи.

**Обсуждение.** Разработка методов мониторинга состояния АД без остановки их работы является важной задачей, направленной на повышение надежности и эффективности производственных процессов. Токовая диагностика, включая метод анализа спектра тока (MCSA), представляет собой перспективный подход благодаря возможности проведения измерений без физического доступа к двигателю и способности выявлять как электрические, так и механические неисправности. Однако, как было отмечено, ограничения метода MCSA, такие как доминирование основной частоты питающей сети и сложность интерпретации изменений в спектре тока, требуют дальнейших исследований и усовершенствований.

Одним из ключевых направлений дальнейших исследований является разработка систем оперативной диагностики, интегрированных в существующие системы управления технологическими процессами. Это позволит минимизировать затраты на внедрение и повысить доступность таких решений для различных отраслей промышленности. Кроме того, важно

учитывать влияние внешних факторов, таких как качество питающей сети и условия эксплуатации, на результаты диагностики, чтобы повысить достоверность получаемых данных.

**Заключение.** Мониторинг состояния АД с использованием методов токовой диагностики, таких как MCSA, демонстрирует значительный потенциал для повышения надежности и эффективности работы оборудования. Применение алгоритмов искусственного интеллекта и диагностических систем в автоматические системы управления технологическими процессами позволяют минимизировать риски аварий, сократить

энергопотребление и уменьшить затраты на внеплановые ремонты. Несмотря на ограничения, связанные с анализом спектра тока и влиянием внешних факторов, дальнейшее развитие методов диагностики, включая учет высших гармоник и комбинацию различных подходов, будет способствовать созданию более точных и надежных систем мониторинга. Эти усилия направлены на обеспечение устойчивой работы асинхронных двигателей в различных производственных условиях, что имеет важное значение для современной промышленности.

#### **Литература**

1. Арипов Н.М., Отажоннова М.К. Влияние режимов работы и характерных повреждений прядильных агрегатов на генерирование высших гармонических составляющих токов и напряжений. // «Журнал проблемы текстиля» научный-технический журнал. –Ташкент: 2025, № 1. – С.90-96. (05.00.00. №17)
2. Арипов Н.М., Отажоннова М.К., Ниязова Н.А. Применение метода ранговой корреляции для предварительной оценки характера отказов в электродвигателях. // Actual scientific research in the modern world, Pereiaslav, Issue 9(89), Part 1, September 2022. – P. 82-86.
3. Otajonova M.K., Tojiyev B.M. Диагностика неисправностей электроприводов на основе данных. // Modern education and development – journal. –Tashkent: Volume 3, Issue 6, June 2024. – P.14-20.
4. Барков А.В. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. / Н.А.Баркова, А.А.Борисов, В.В.Федорищев, Д.В.Грищенко. – НОУ «Северо-Западный учебный центр», ООО «Вибротехника», – Санкт-Петербург: 2012.
5. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя. // Металлургические процессы и оборудование, 2013. № 1(31). – С. 61-65.
6. Вейнреб К.Б. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора: дисс. в виде научного доклада на соискание уч. степени докт. техн. наук: 05.09.01. – Москва: 2012.
7. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Надежность электрических машин. – Москва: «Академия», 2010.
8. Никиян Н.Г. Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики: монография. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003.
9. Петушков М.Ю. Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. – Магнитогорск: 2015.

**РЕЗЮМЕ.** Ҳозирги вақтда асинхрон двигателлар (АД) ишлаб чиқаришнинг барча соҳаларида кенг қўлланилмоқта. Ускуналарга ҳаражатларни камайтириш мақсадида двигателлар ҳолатини тўхтамасдан мониторинг қилишнинг янги усуллари ишлаб чиқиш долзарб ҳисобланади.

**РЕЗЮМЕ.** В настоящее время асинхронные двигатели (АД) широко используются во всех областях производства. В целях снижения затрат на оборудование актуальна разработка новых методов мониторинга состояния двигателей без остановок.

**SUMMARY.** Nowadays, asynchronous motors (AM) are widely used in all areas of production. In order to reduce equipment costs, the development of new methods is relevant for monitoring the state of engines without stopping.

#### **GaSb ASOSIDAGI TUNNEL DIODLARI VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASINING DEFORMATSIYA TA'SIRIDA O'ZGARISHI**

**M.G.Dadamirzayev** – fizika-matematika fanlari doktori, professor

**M.O.Kosimova** – fizika-matematika fanlari nomzodi

**A.K.G'aniyeva** – tayanch doktorant

**N.A.Xojiakbarova** – magistr

*Namangan davlat texnika universiteti*

**Tayanch so'zlar:** GaSb tunnel diodi, Esaki modeli, deformatsiya, volt-ampere xarakteristika (VAX), effektiv massa.

**Ключевые слова:** туннельный диод GaSb, модель Эсаки, деформация, вольт-амперная характеристика (BAX), эффективная масса.

**Key words:** GaSb tunnel diode, Esaki model, deformation, current-voltage characteristic (I-V), effective mass.

**Kirish.** Tunnel diodlari o'ziga xos VAXsi bilan yarimo'tkazgich elektronikasida alohida o'rin tutadi. Ushbu qurilmalarda kuzatiladigan negativ differensial qarshilik hodisasi birinchi marta Esaki tomonidan kashf etilgan [1:2], bu esa ularning yuqori tezkorlik va past quvvat sarfi bilan ishlashini ta'minlab, nanoelektronika va optoelektronika sohalarida katta qiziqish uyg'otdi. Keyinchalik Pitteliy va Rindner klassik eksperimentlarida nisbiy deformatsiya ostida tunnel diodlarning xatti-harakati o'rganilib, tunnel

tokning o'zgarishi va VAXning siljishi qayd etgan [2:3]. So'nggi yillarda tunnel diodlarning yangi materiallarda, xususan, GaSb asosidagi variantlari keng tadqiq etilmoqda. GaSb/InAs geterostrukturalari yuqori tezkorligi va past kuchlanishda ishlash qobiliyati sababli istiqbolli hisoblanadi. Masalan, Hosseini va hammualliflar nisbiy deformatsiya ta'siri ostida GaSb asosidagi tunnel diodlarda tunnel tokning kamayishi va ortiqcha tokning kuchayishini ko'rsatgan [3:3]. Deformatsiya nafaqat tunnel diodlar,