

СТРАТЕГИЯ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Черный А.П., д.т.н., проф., Синчук О.Н., д.т.н., проф.

*Кременчугский государственный политехнический университет им. Михаила Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

E-mail: apch@polytech.poltava.ua

Осадчук Ю.Г., к.т.н., доц.

Криворожский технический университет

Показана методологія і принципи побудови систем моніторингу електричних двигунів в комплексі промислових електроприводів. Обґрунтовано структуру силового обладнання і вимірювальних засобів. Виконано економічну оцінку ефективності використання моніторингу при вирішенні задач енерго- і ресурсозбереження.

Ключові слова: енергетичний моніторинг, енергозбереження, діагностика.

The paper presents the methodology and principles of electrical motors monitoring systems design in industrial electrical drives complexes. Power and measuring equipment structure is grounded. The efficiency of monitoring application to solve energy and resources saving problems is estimated.

Key words: power monitoring, energy saving, diagnostics.

Введение. Совершенствование современных энергетических технологий в значительной степени требует наличия полной и достоверной информации о реальных процессах преобразования энергии. Энергетическая диагностика и мониторинг являются важной составляющей системы управления процессами энергопотребления и энергопреобразования в промышленности. Они позволяют оценить энергетические нужды производства и отдельных электроприводов, возможность снижения энергопотребления, повышения производительности, обеспечения энерго- и ресурсосбережения и сформулировать рекомендации, какими мероприятиями можно достичь этих эффектов [1].

Во второй половине 20-го века, с развитием вычислительной техники и микропроцессорных систем управления, в СССР и других странах развивались соответствующие системы контроля и управления, выполняющие задачи информационного обеспечения и нацеленные на поддержание эффективного, действующего в данный период жизненного цикла функционирования системы [2]. Крупные зарубежные фирмы Nippon Steel, Chugai Ro, Ebner, Siemens, ABB, российские фирмы Инкотес и др. имеют испытательные стенды, на которых проводятся комплексные исследования. Ограниченность возможностей такого оборудования связана с их узкой специализацией – применительно к технологиям металлургического производства [3] и вибродиагностики механических узлов электромеханического оборудования [4].

Наиболее близкими по функциональному построению к системам мобильного мониторинга и энергетической диагностики можно отнести электронные системы учета электрической энергии [5-6]. Однако, обладая развитыми функциями измере-

ния и обработки данных, они, с одной стороны, не обеспечивают анализ полученной информации об энергетических процессах, а с другой стороны, – совершенно не предназначены для мониторинга электроприводов, так как лишены функций математического моделирования, проведения лабораторного и промышленного экспериментов.

Цель работы. Целью работы является разработка методологии построения систем энергетического мониторинга электромеханического оборудования, которая может быть положена в основу решения задач энерго- и ресурсосбережения.

Материал и результаты исследований.

Актуальность. Надежность электрических двигателей промышленных электроприводов по всем отраслям промышленности крайне низка. В отдельных случаях, ежегодно выходит из строя и ремонтируется до 30% парка используемых на производстве электрических машин. В подавляющем большинстве, после ремонта они возвращаются на предприятие и эксплуатируются до следующего выхода из строя. Количество ремонтов может составлять 3-4 при времени наработки на отказ 0,5-1,5 года. Такое состояние вопроса вызывает значительные энерго- и ресурсозатраты. Ситуация объясняется тем, что конструктивные материалы (сталь, медь) в процессе ремонта претерпевают изменения и вновь поступившая на производство электрическая машина имеет реальные эксплуатационные показатели значительно хуже, нежели заложенные заводом изготовителем. Поэтому основной целью научных исследований и разработок является применение технологий эффективного использования существующей техники, ее модернизация, повышение надежности и увеличение ресурса работы.

Различные пути решения задачи мониторинга

состояния электрических машин достаточно многообразны, трудоемки и неприменимы в производственных условиях. Выполненный анализ методов диагностирования параметров, их большое число говорят в пользу поиска принципиально новых решений, отличающихся простотой и возможностью частичной или полной автоматизации процесса диагностики.

При анализе подходов к определению рациональных путей следует иметь в виду то обстоятельство, что любой выход из строя электрической машины или ее части является результатом определенных электрических факторов, проявляющихся в форме электрических, электромагнитных воздействий и полей, механических вибраций и др. Однако все, что касается энергетической стороны, рассматривается как результат процессов преобразования энергии в электрической машине. При существующих подходах анализируется электрическая машина как некоторый аппарат с известными электрическими характеристиками, обусловленными непосредственно технологией ее производства, качеством электротехнических материалов, комплектующих деталей, входящих в ее конструкцию. Старение конструкции в целом не анализируется как техническое явление, связанное, с одной стороны, с изменением характеристик элементов в ходе эксплуатации, а, с другой, - с эксплуатационными отказами.

Показатели надежности электрических машин являются характеристикой методов и подходов хозяйствования в соответствующем электротехническом подразделении, участке и т.п. Насыщенность парка электрических машин агрегатами, прошедшими ремонт, необходимо тем или иным путем учитывать при анализе показателей надежности. Учитывая то обстоятельство, что машины, прошедшие ремонт, имеют другие характеристики по сравнению с заводскими, позволяет утверждать неизбежность высокой аварийности систем электропривода. Объективность таких оценок могла бы быть другой, если бы учитывались в процессе эксплуатации изменения характеристик электрических машин по факту ее эксплуатации, ремонта и т.п.

Очевидно, что добиться радикального повышения работоспособности электрических машин можно, если основным критерием их ценностных характеристик является не ожидаемая надежность, как достаточно усредненный параметр, а именно работоспособность как физический контролируемый параметр, например, как сопротивление изоляции, шум и т.п. Рассматривая работоспособность как другой параметр, характеризующий в принципе надежность, отмечаем то, что он является некоторой константой, снижающейся до нуля по мере работы агрегата до ожидаемого выхода в результате аварии и зависящей со всей очевидностью, как от характеристик электромеханического агрегата, так и от качества энергии питания и преобразования ее, и от характеристик технологического механизма.

С учетом сказанного становится ясной и возможная задача, решение которой сулит существенный экономический эффект - задача текущего контроля работоспособности электродвигателей системы привода. Формально, задача может быть решена в случае, если система электропривода снабжена наблюдателем, контролирующим изменение характеристик электрифицированного агрегата, принимающим решение о выводе из эксплуатации электрической машины в планово-предупредительном аспекте или аварийно-предупредительном - когда параметры агрегата изменяются настолько интенсивно, что возможен его аварийный выход ранее возможного планового отключения и соответствующего ремонта.

Принципы построения мобильных систем мониторинга. Важный этап решения этой задачи связан с разработкой и внедрением мобильных диагностических систем мониторинга, обеспечивающих измерение параметров энергопотребления, передачу сигналов измеренных параметров в ЭВМ и расчет показателей энергопреобразования.

Под мониторингом следует понимать сбор и обработку эмпирической информации с целью проведения анализа и выработки последующего управляющего воздействия или диагностики. Диагностика - более специфическое понятие, включающее определение состояния и идентификацию конкретных причин, вызывающих его, с последующей выработкой рекомендаций по коррекции текущего состояния на основе аналитических методов или методов искусственного интеллекта и экспертных систем.

Функции мониторинга и диагностики наиболее полно могут быть реализованы при проведении экспериментальных исследований и работ, включающих наладочные испытания, специальные и комплексные исследования, автоматизированные комплексные промышленные эксперименты.

Процедура мониторинга сопряжена со значительными трудностями, вызванными следующими причинами: многообразие, сильное взаимное влияние и ярко выраженный стохастический характер процессов, протекающих в электрических машинах, большой объем диагностических измерений, применение громоздких расчетных методов для оценки параметров.

На рис.1 показаны основные задачи мобильного комплекса мониторинга.

Для решения каждой из указанных задач требуется набор первичных датчиков и расчетных методов. Вместе с тем, различные задачи формулируются, примерно, одинаково: измерение электрических параметров; определение параметров схемы замещения расчетным путем; расчет номинальных значений в зависимости от состояния электромеханического оборудования; логический поиск причин отклонений параметров от номинальных значений; подготовка и выдача информации в удобной для пользователя форме.



Рисунок 1 – Задачи комплекса мобильного мониторинга

Мобильный комплекс мониторинга представляет совокупность технических и программных средств (рис. 2), основой технических средств являются установленные на объекте, или выполненные в пере-

носном исполнении, силовая установка и персональная ЭВМ, подключаемая через АЦП с блоками гальванической развязки к первичным датчикам.

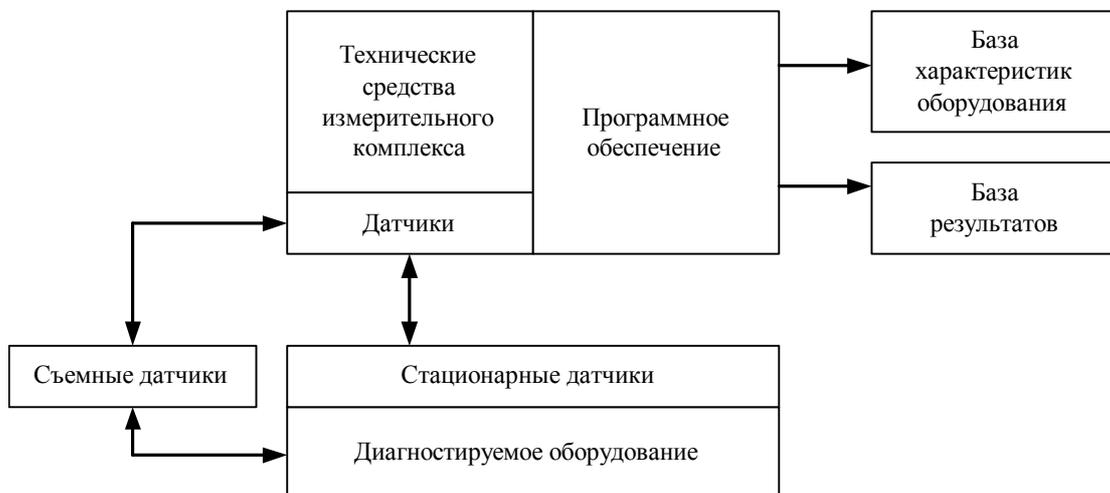


Рисунок 2 – Структура комплекса мобильного мониторинга

Особенностью применяемого математического обеспечения является обработка полигармонических сигналов, что предъявляет требования к используемому силовому оборудованию. Наиболее рациональным является использование преобразовательных устройств, выходное напряжение которых имеет широкий спектр гармоник. При этом возможны модификации: тиристорный регулятор переменного напряжения, выполненный в трехфазном симметричном варианте или однофазном (однофазные ти-

ристорный регулятор); тиристорный (транзисторный) преобразователь частоты (рис. 3). Таким оборудованием оснащены все современные системы электрического привода.

При выполнении мониторинга нерегулируемых электроприводов мобильный комплекс может дополнительно оснащаться преобразовательными установками. Мощность силового оборудования для мониторинга не превышает 5-10% максимальной мощности электрической машины при обследова-

нии в предшествующем пуску режиме системы привода.

Система измерения электрических параметров – фазных токов и напряжений включает в себя три датчика тока и три датчика напряжения аналогового типа класса точности не хуже 0,1 и узел согласования аналоговых сигналов с вычислительным блоком –многоканальный или одноканальный АЦП с числом входных каналов не менее 6 и с возможностью программного управления коммутатором. Необходи-

мая точность достигается при использовании АЦП со временем преобразования, порядка, 5 мкс на 1 канал.

Программные средства комплекса подразделяются на прикладные и системные. Прикладные программы обеспечивают обработку информации в соответствии с поставленными задачами. Системные программы реализуют функции управления вычислительным процессом.

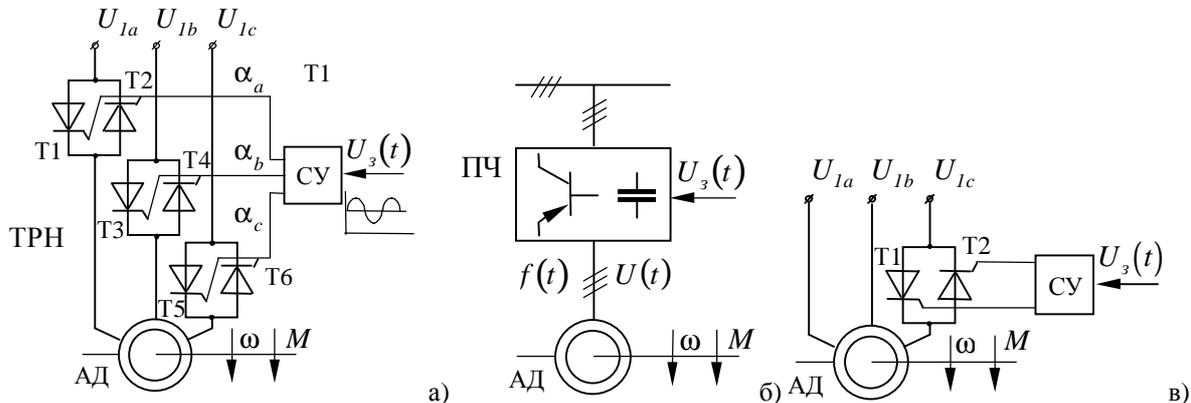


Рисунок 3 – Техническая реализация силовой установки мониторинга двигателей переменного тока: на базе симметричного регулятора переменного напряжения - а); на базе преобразователя частоты - б); на базе однофазного регулятора переменного напряжения - в)

Методическое и нормативно-техническое обеспечение комплекса мониторинга. На всех стадиях функционирования мобильных комплексов возникает необходимость в справочных и нормативно-методических материалах по отдельным видам электромеханического оборудования, процессам, учету, контролю, испытанию, наладке, эксплуатации электромеханического оборудования, расчету энергопотребления. Например, ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», международные стандарты МЭК 861, МЭК 1000-3-2, МЭК 1000-3-3, МЭК 1000-4-1 и публикации МЭК 1000-2-1, МЭК 1000-2-2 в части уровней электромагнитной совместимости в системах электроснабжения и методов измерения электромагнитных помех определяют показатели качества электроэнергии в сетях питания для систем электрического привода, использующих электрическую энергию переменного тока.

Эти нормативные документы определяют влияние качества электроэнергии на исправный, электрически и магнитно-симметричный, электромеханический преобразователь, но только в части увеличения дополнительных потерь и нагрева. По сути, ГОСТ показывает снижение КПД и выход из строя по перегреву, но совершенно не учитывает ту часть энергии, которая преобразована электромеханическим преобразователем, но идет не на выполнение полезной работы, а, например, на вибрацию.

Электромеханическое оборудование, используемое в электроприводах, предназначено для работы в условиях симметрии напряжения, их синусоидаль-

ной формы кривых и уровня, равного или близкого к номинальному значению. При отклонениях показателей качества электроэнергии, превышающих нормируемые стандартом значения, нормальная работа электрооборудования либо вообще невозможна, либо может быть обеспечена только при значительном снижении нагрузки. Снижение эффективности работы электрооборудования проявляется в увеличении потерь активной мощности и электроэнергии; в сокращении срока службы; увеличении капитальных вложений в систему электропривода; в увеличении потребления реактивной мощности; в нарушении нормального хода технологических процессов. Оценка параметров и характеристик электрических машин производится в соответствии с ГОСТами на испытание [7-9]. Например, ГОСТ №7217-85 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний» определяет методы и методики испытаний электрических машин в специальных испытательных лабораториях, при питающем напряжении симметричном и синусоидальном. Проведение указанных испытаний в условиях производства, на месте, в период технического или профилактического осмотра невозможно.

Указанные нормативные документы, ведомственные и отраслевые инструкции, методические и нормативно-технические материалы на конкретное диагностируемое оборудование могут быть использованы при проведении операции мониторинга и энергетической диагностики. Однако требуется разработка ГОСТов и методов анализа работоспособ-

ности электромеханического оборудования с учетом его реального состояния и качества питающей энергии.

Математическое обеспечение комплекса мониторинга. – Единым объективным параметром, характеризующим энергетический процесс, является мгновенная мощность $P(t) = I(t) \cdot U(t)$, равная произведению мгновенных значений тока и напряжения.

$$P(t) = \sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{m_a} \cos(\Omega_{m_a} t) \cdot \sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{n_a} \cos(\Omega_{n_a} t) + \sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{m_a} \sin(\Omega_{m_a} t) \cdot \sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{n_a} \sin(\Omega_{n_a} t) - \sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{m_a} \sin(\Omega_{m_a} t) \cdot \sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{n_a} \cos(\Omega_{n_a} t) - \sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{m_a} \cos(\Omega_{m_a} t) \cdot \sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{n_a} \sin(\Omega_{n_a} t).$$

Уравнение $P(t)$ можно представить в виде:

$$P(t) = \sum_{k=m-n=0}^{k=m+n} P_{k_0} + \sum_{k=m-n \geq 1}^{k=m+n} P_{k_a} + \sum_{k=m-n \geq 1}^{k=m+n} P_{k_u}$$

где P_{k_0} , P_{k_a} , P_{k_u} – постоянная составляющая активной мощности и переменные составляющие мгновенной мощности (косинусная и синусная составляющие соответственно).

Мгновенная мощность является важным информационным показателем. Знакопеременные составляющие мощности, состоящие из произведений разностотных компонент напряжения и тока и измеряемые мощностью искажения, будучи преобразованными, переходят в знакопеременные ортогональные составляющие мощности – активную или реактивную (косинусную и синусную составляющую). Уравнения баланса мгновенных значений составляющих мощности включают параметры токов, напряжений всех гармоник и параметров схемы замещения и являются эффективным средством диагностики параметров электрических машин систем электропривода.

Взаимосвязь между гармоническим составом напряжения, тока, мощности и параметрами электрических машин установлена в виде уравнений энергетического баланса. Параметры электрических машин определяются путем решения систем уравнений относительно неизвестных параметров, причем количество уравнений определяется искомыми параметрами. При этом баланс мгновенной мощности на любой из частот связывает в конкретном уравнении параметры электротехнических систем, что является математической основой для задач эксплуатационного мониторинга.

Задачи управления комплекса мониторинга. Использование диагностических комплексов в задачах мониторинга для сбора и обработки эмпирической информации с целью проведения анализа или

диагностики делает возможным выработку управляющих воздействий на электропривод. Анализ мгновенной мощности и показателей качества преобразования энергии на ее основе [1] и созданный математический аппарат для ее оценки, намечает ряд путей управления процессом преобразования с целью снижения переменных составляющих мощности и момента двигателя с целью обеспечения эффективного функционирования электрооборудования в условиях изменений факторов, влияющих на его нормальную работу.

Снижение величины переменной составляющей мощности и момента двигателя осуществляется путем формирования несимметрии питающего напряжения статора для асинхронных двигателей [10], и регулированием тока возбуждения для синхронных двигателей [11]. Таким образом, задача управления сводится к отысканию таких параметров напряжения питания, при которых выполняется условие:

$$\left\{ \sum_{k=m-n \geq 1}^{k=m+n} P_{k_a} + \sum_{k=m-n \geq 1}^{k=m+n} P_{k_u} \right\} \rightarrow \min.$$

Экономическая эффективность. Применение систем мониторинга поставит перед предприятиями вопросы формирования механизмов энергопотребления, энергоиспользования и энергоуправления и на их основе новых взаимоотношений между энергоснабжающей организацией и предприятием, установление, с учетом тех или иных факторов, тарифов на электроэнергию.

Энергетическая эффективность электромеханической системы может быть определена как сумма:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = a_1 W + a_2 P_m + a_3 Q + a_4 K + a_5 N,$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – постоянные коэффициенты; W – потребляемая из сети энергия; P_m – потребляемая из сети активная мощность; Q – потребляемая (генерируемая) реактивная мощность; K – коэффициент, учитывающий качество потребления электрической энергии; N – число электрических двигателей.

Очевидно, что уровень энергетической эффективности электрохозяйства предприятия должен быть напрямую связан с размером платы за электроэнергию.

Снижение C_1 может быть достигнуто за счет оптимизации энергетических характеристик ЭП, а также за счет управления технологическим процессом средствами ЭП. Очевидно, что снижение C_1 возможно в случае управляемости как электропривода, так и технологических механизмов.

Составляющая C_2 может быть уменьшена за счет наличия систем регулируемого и управляемого ЭП, а также информационно-измерительных систем, обеспечивающих контроль потребления активной мощности в периоды максимума нагрузки.

Составляющая C_3 определяет уровень штрафных санкций за $\text{tg}\phi$. Снижение C_3 достигается за счет установления компенсирующих устройств (ре-

гулируемых и нерегулируемых). Очевидно, что уровень платы за реактивную мощность тем выше, чем выше C_4 и C_5 . Составляющая C_4 формально не входит в оплату за электроэнергию, а оценивает ущерб потребителя от некачественности энергии. Составляющая C_5 определяет размер дополнительной платы за плохое состояние электрооборудования. Эта плата выступает в виде дополнительных затрат на ремонт электрооборудования, выходящего из строя вследствие несоответствия реальных нагрузочных характеристик электрических машин сертификационным. Снижение C_5 достигается путем определения реальной нагрузочной способности электродвигателей, прошедших стадию электроремонта (их диагностики), и формирования технологической нагрузки электропривода в соответствии с сертификационными параметрами.

Экономический эффект от внедрения системы мониторинга и энергетической диагностики достигается за счет:

- повышения качества ремонта электрических машин, благодаря предремонтному определению потерь в стали ремонтируемого двигателя, прогнозированию ресурса работоспособности электрических машин;
- определения реальной нагрузочной способности электрических двигателей, определяющей рациональный режим эксплуатации, исключающий аварийный выход из строя электрических машин;
- возможности определения остаточного ресурса в ходе плановой диагностики находящегося в эксплуатации энергооборудования.

Выводы. Применение систем мониторинга и энергетической диагностики позволит интенсифицировать работы по практическому энергосбережению путем решения задачи сохранения работоспособности электрооборудования, находящегося в эксплуатации. Применение методов эксплуатационного мониторинга и комплекса для реализации этих методов позволяет снизить количество отказов электрических двигателей и связанные с этим энерго- и ресурсозатраты, выработать предложения по улучшению энергетических, производственных или технологических параметров. Эти предложения могут быть сгруппированы следующим образом: предложения, нацеленные на немедленные решения, не требующие капитальных вложений (общая наладка, оптимизация статических или динамических режимов работы и т.п.); предложения по реконструкции

или модернизации оборудования; предложения по замене оборудования. Такой подход позволит решить комплекс вопросов энергопотребления, энергоиспользования потребляемой энергии и энергоуправления процессом энергопотребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный А.П. Показатели качества преобразования энергии при энергомониторинге электромеханического оборудования. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. - Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2(19), Т1. – С. 149-151
2. Система анализа, оптимизации и рационализации энергопотребления на базе мобильных диагностических лабораторий: Тр. Моск. энерг. ин-т, 1990. Вып. 648.
3. Тарбеев Ю.В., Харитонов И.А., Игнатьев В.И. Метрология и научно-технический прогресс (по материалам конгресса ИМЕКО) // Измерит. техника. 1981. №5. С. 67-70.
4. Руссов А.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь. - 1996. 174 с.
5. Многофункциональный микропроцессорный счетчик электрической энергии типа АЛЬФА. Руководство по эксплуатации. Москва. 2001.
6. AlphaPlus-E. Описание программного пакета. Версия 1.20. АББ ВЭИ Метроника, 2001. – 71 с.
7. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. К.: Госстандарт Украины. 1999.
8. ГОСТ №7217-85 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. М.: Издательство стандартов. 1990.
9. ГОСТ №20832-75 Машины электрические вращающиеся допустимая вибрация. М.: Издательство стандартов. 1982.
10. Черный А.П., Сычев С.Д. Управление процессом преобразования энергии в асинхронном двигателе. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ.- Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 1(18), – С. 92-95
11. Черный А.П., Волощенко А.М., Родькин Д.И. К вопросу повышения ресурса работоспособности синхронных двигателей насосных агрегатов. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісник Національного технічного університету. “Харківський політехнічний університет”. Вип. 113, – Харків: ХДПУ, 2000, -С. 302-303.