

Замечания на диссертацию Курьянова В.Н.
ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ
РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук,
защищена в диссертационном совете Д.212.028.04 при ВолГТУ, 2012 г.

все ссылки относятся к автореферату, если прямо не сказано иное

http://www.vstu.ru/files/autoabstract/3000/diagnostika_i_prognoz_vremeni_effektivnoy_raboty_rotornogo_oborudovaniya.pdf

Ошибки в автореферате

1. Рисунок 2 противоречит пояснениям, согласно которым: « ΔC – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов); $C_{\text{доп.пот}}$ – стоимость потерь электроэнергии, зависящих от дефектов. ... С развитием дефектов стоимость оплаты потерь возрастает, а разница между стоимостью ремонтных работ и оплатой потерь электроэнергии снижается и достигает минимального значения в точке x_2 . При дальнейшем развитии дефектов затраты на оплату потерь превышают стоимость проведения ремонтных работ.»

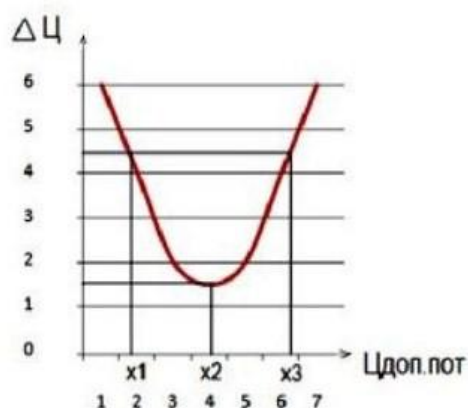
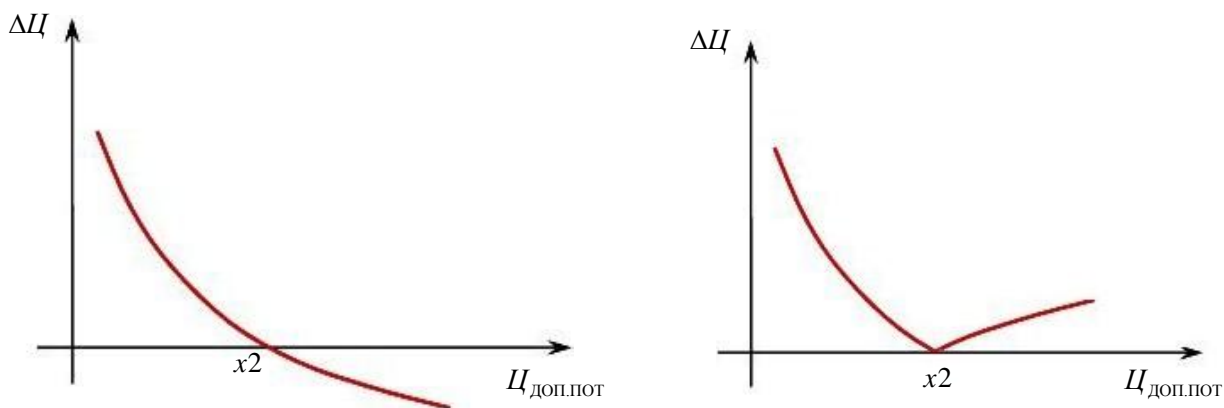


Рисунок 2 – Анализ затрат
на эксплуатацию роторного
оборудования

Согласно вышесказанному, график должен пересекать ось абсцисс в точке x_2 (левый рисунок):



Если автор имел ввиду, что величина $\Delta Ц$ считается по модулю, то график должен иметь излом в точке x_2 (правый рисунок). Согласно рис. 2 автореферата, по мере приближения $Ц_{доп.пот}$ к значению x_2 темп уменьшения $\Delta Ц$ стремится к нулю. Этот эффект не имеет объяснения. Рис. 2 также противоречит рис. 15:

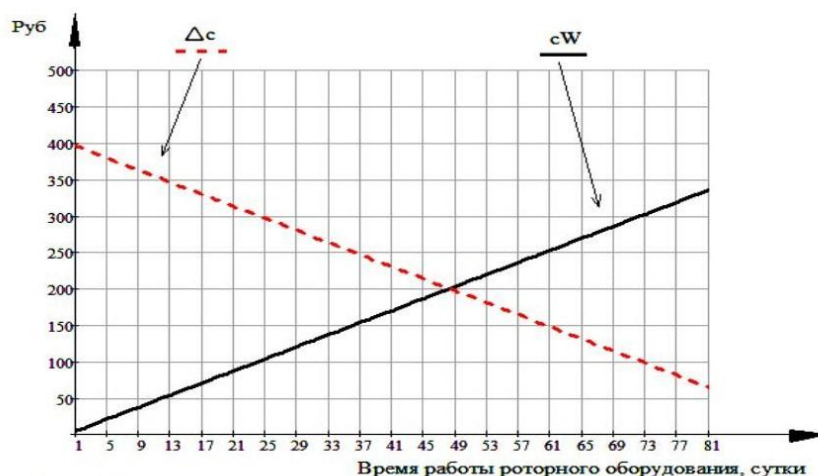


Рисунок 15 – Прогноз времени вывода роторного оборудования на ремонт

Здесь: « $сW$ – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; $\Delta с$ – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.»

Как следует из рис. 15, зависимость $\Delta Ц$ от $Ц_{доп.пот}$ является линейной, что несовместимо с рис. 2. По-видимому, график на рис. 2 был нарисован произвольно.

2. С рисунком 15 связано еще одно противоречие. Согласно тексту, точка пересечения прямых определяет время работы (48 суток), после которого замена подшипника станет экономически оправданной. Однако легко видеть, что этой точке отвечает вдвое большая цена замены подшипника, чем стоимость электроэнергии, потерянной из-за его дефектов. Поэтому,

в соответствии с рис. 15, замена подшипника станет экономически оправданной не через 48 суток, а через 96.

3. Рис. 14 выглядит весьма странно. Очевидно, что уменьшения количества уже потерянной энергии произойти не может. Однако, это явление наблюдается на графиках. Возможно, что здесь описка и по оси ординат должна откладываться не энергия в кВт*ч, а мощность в кВт. Эта ошибка дважды повторяется под рисунком, поэтому возможно, что автор не осознает разницу между кВт*ч и кВт.

4. Формулу (1), которая выражает потери энергии от дефектов к подшипникам, можно записать в виде:

$$\Delta W(t) = (R \cdot I^2(t)) \cdot K \cdot \Delta I(t) \cdot t \quad (1)$$

Здесь $I(t)$ - действующее значение тока в обмотке электродвигателя, $\Delta I(t)$ - отклонение этого значения, обусловленное дефектами подшипника. Коэффициент K выражается через другие коэффициенты, а именно

$$K = \frac{K_{н.с.}}{\sum_{i=1}^n K_i} \quad (2)$$

Видимо автор полагает, что потери энергии пропорциональны полученной из сети энергии $R \cdot I^2(t) \cdot t$, а коэффициент $(K \cdot \Delta I(t))$, в свою очередь, пропорционален отклонению тока $\Delta I(t)$. На первый взгляд простейшая, «линейная» модель. Однако формула (1) некорректна, т.к. для выражения потерь энергии за время t используется текущее (действующее) значение тока $I(t)$, а также его текущее отклонение $\Delta I(t)$.

Влиянием вибраций на магнитный поток можно пренебречь, т.к. их частоты имеют порядок частоты вращения, а амплитуда вибро-колебаний относительно мала. Поэтому потери энергии из-за дефектов подшипников вызваны только тем, что возрастает трение. Разница в энергии, затраченной за время t :

$$\Delta \tilde{W}(t) = \int_0^t R \cdot (I(\tau) + \Delta I(\tau))^2 \cdot d\tau - \int_0^t R \cdot I(\tau)^2 \cdot d\tau = 2R \cdot \int_0^t I(\tau) \cdot \Delta I(\tau) \cdot d\tau + R \cdot \int_0^t (\Delta I(\tau))^2 \cdot d\tau$$

при достаточно большом t можно считать $I(t) = I_0 = const$, тогда

$$\Delta \tilde{W}(t) = 2R \cdot I_0 \cdot \int_0^t \Delta I(\tau) \cdot d\tau + R \cdot \int_0^t (\Delta I(\tau))^2 \cdot d\tau \quad (3)$$

Очевидно, что $\Delta\tilde{W}(t)$ равно потерям энергии из-за дефектов в подшипниках за время t . Это существенно отличается от (1), независимо от значения K , даже если принять

$$\Delta\tilde{W}(t) \approx 2R \cdot I_0 \cdot \int_0^t \Delta I(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

или умножить $\Delta\tilde{W}(t)$ на какой-нибудь коэффициент.

5. При этом в автореферате нет сведений о том, сравнивались ли расчетные значения $\Delta W(t)$ с фактическими перерасходами энергии, определенными с помощью счетчика 12 (рис. 7).

Для заданного электродвигателя с почти неизменной нагрузкой (в виде децентрированного диска), при достаточно большом времени t с начала работы можно считать, что $I(t) = I_0 = const$ и среднее значение $\Delta I(t)$ является константой ΔI_0 . Тогда из (4) получаем:

$$\Delta\tilde{W}(t) \approx 2R \cdot I_0 \cdot \Delta I_0 \cdot t$$

Если теперь принять $K = 2/I_0$, то $\Delta\tilde{W}(t) \approx \Delta W(t)$. Коэффициенты, через которые K выражается в силу (2), являются «коэффициентами адаптации». Значения последних могли быть автоматически подобраны так, чтобы обеспечить приблизительное попадание расчетных значений по формуле (1) в реальный перерасход энергии.

Таким образом, физически безграмотная формула (1), лежащая в основе всей работы, могла дать приближенно верный результат за счет «адаптации» к почти неизменным условиям экспериментов на лабораторной установке. Однако в случае, когда полезная нагрузка и, соответственно, среднее значение $\Delta I(t)$ существенно меняются, или величиной $\Delta I^2(t) \cdot t$ пренебречь нельзя, никакая подгонка K не позволит сблизить значения $\Delta\tilde{W}(t)$ и $\Delta W(t)$ настолько, чтобы формула (1) давала приемлемый результат.

6. Если заменить (1) на формулу (3), то не понадобятся фокусы с «коэффициентами адаптации», которые скрывают физическую неадекватность данной математической модели. Однако нет необходимости исправлять эту работу. Легко понять, что она изначально не имела практического значения.

Ток возрастает в связи с тем, что уменьшение частоты вращения ротора приводит к уменьшению ЭДС индукции в обмотке статора, снижающей силу тока. Таким образом, дефекты подшипника замедляют вращение ротора. Если потери электроэнергии в асинхронном двигателе становятся заметными, то заметно уменьшается и частота вращения. Существующие методы вибрационной диагностики направлены на выявление дефектов,

ведущих к поломкам или нарушениям нормальной работы электродвигателей. Поэтому нет необходимости в том, чтобы определять перерасход энергии, возникший от таких дефектов. До того, как он проявит себя экономически, двигатель потеряет способность работать в штатном режиме. Последнее определяемо обычными средствами диагностики, а также непосредственно наблюдаемо в процессе эксплуатации (двигатель греется и т.д.) .

Результаты диссертации, опубликованные в журналах

Статья 1. Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система энергоэффективности вращающихся механизмов // Энергетик, ежемесячный производственно-массовый журнал, № 7 / Москва, 2012. – с. 23-26 http://extremal-mechanics.org/wp-content/uploads/2014/11/energetik_2012_no7.pdf.

В этой статье подробно описаны эксперименты в лаборатории «Волжского подшипникового завода». Сначала на подшипник электродвигателя 12309КМ был нанесен один дефект в виде раковины, затем второй, в дополнение к этому менялось давление масла. При этом измерялись действующее значение тока в каждой из трех фаз и активная, реактивная, полная мощность. Результаты измерений дали статистику, отображенную на рис. 3 – 5 автореферата. Помимо электрических измерений проводилась вибродиагностика с помощью датчика СД-12М и программного комплекса DREAM. Был также проведен опыт с подшипником 6-7506А, который не описан.

Как результат экспериментов, в статье представлена «классификация дефектов роторного оборудования, учитывающая их влияние на увеличение расхода электрической энергии». Эта классификация воспроизведена в таблице 1 автореферата и отнесена к результатам диссертации (стр. 18). По существу она не содержит новой информации, поскольку все эти дефекты известны и описаны в книгах. Каждый из них может повлиять на энергоэффективность – больше или меньше. К тому же эксперименты проводились лишь с двумя или тремя типами дефектов из тридцати, указанных в таблице. Таким образом, статья и диссертационная работа используют слишком скудные, опытные данные, чтобы претендовать на классификацию дефектов по их влиянию на энергоэффективность роторного оборудования. Само это влияние почти не отражается в таблице.

Примечание «Исследования по выявлению влияния дефектов на расход электроэнергии в данной работе не завершены» (таб. 1 автореферата) относится к подавляющему большинству дефектов, собранных в этой таблице. Новая информация содержится только в числах 10, 20 и 30. О происхождении этих данных ничего не сказано.

Очевидно, что из экспериментов невозможно получить такие круглые значения. По-видимому, они являются нечеткими, экспертными оценками значимости трех видов дефектов по их влиянию на потери энергии, где в роли эксперта выступил сам автор или его научный руководитель. Опытных данных явно недостаточно, чтобы надежно обосновать эти оценки. Таким образом, данный результат статьи (и диссертации) выглядит неубедительно. Все остальное в классификации дефектов, очевидно, было переписано из книг.

Далее утверждается, что статья показала наличие связи между дефектами роторного оборудования и потерями электроэнергии. Данный факт очевиден и не нуждается в обосновании. Для количественной оценки потерь приводится формула

$$\Delta W = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \cdot T_{p.o} \cdot \left[\sum_{i=1}^n d_x + \left(1 - \sum_{i=1}^n d_x \right) \cdot K_{н.с} \right] \quad (5)$$

со ссылкой на книгу Железко, Артемьева, Савченко «Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях». Но в этой книге такой формулы нет. В ней есть только одна похожая формула, которая в обозначениях автора записывается так:

$$\Delta W = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \cdot T_{p.o} \quad (6)$$

Символ d_x в формуле (5), в котором пропущен номер дефекта i , выражает доли потерь энергии, приходящихся на каждый дефект. Поэтому очевидно, что множитель

$$\sum_{i=1}^n d_x + \left(1 - \sum_{i=1}^n d_x \right) \cdot K_{н.с} \quad (7)$$

должен быть равен единице, что означало бы $K_{н.с} = 1$. Сравнивая (5) с формулой (1) из автореферата легко видеть, что т.н. «коэффициент настройки системы» $K_{н.с}$ является множителем правой части (5), а не только слагаемого в квадратных скобках. В таком случае использование чисел d_{xi} бессмысленно, поскольку (7) сводится к $K_{н.с}$. Если же (7) верно, то (5) противоречит формуле (1) из автореферата. Впрочем, эта формула также неверна (см. выше **5, 6**).

Очевидно, что автор запутался в т.н. настроечных и адаптивных коэффициентах. Формула (5) из обсуждаемой статьи (там она без номера) является физически безграмотной, т.к. относит основную часть активной мощности к потерям (при $K_{н.с} \approx 1$ почти всю). В электродвигателе активная мощность расходуется, в основном, на выполнение полезной работы. Формула (6) годится, например, для расчета потерь в силовых линиях, но не потерь от трения в подшипнике электродвигателя, вокруг которого «вращается» диссертация.

Таким образом, статья **1** не содержит правильных результатов в отношении энергетических потерь. В других публикациях формула (1) не затрагивается. Поэтому можно сделать вывод о том, что основные результаты диссертации не прошли независимой, научной экспертизы.

В **статье 1** в качестве результата указан «алгоритм контроля оптимального расхода и потерь электроэнергии». Но только один блок на рис. 6, а именно «расчет доли электроэнергии в потерях от наличия дефекта», является чем-то новым в «алгоритме». Этот «черный ящик» основан на ложной формуле (1), поэтому нет оснований доверять его работе. Программный комплекс (АРМ энергетика + ППП), в силу вышесказанного, не решает свои задачи в том, что касается оценок энергоэффективности и прогнозов ремонта.

Статья 2. Шевчук В.П., Комиссарова Д.В., Курьянов В.Н. Погрешности обработки информации виброакустического измерительного канала // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 6 (79) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – с. 84-87 <http://extremal-mechanics.org/wp-content/uploads/2014/11/kur2.pdf>.

В статье выводятся формулы для автокорреляционной функции и погрешности виброакустического канала (уравнения (4) и (7) в статье). Все эти результаты, фактически, были получены в диссертации Е.Н. Бельчанской <http://www-old.vstu.ru/research/avtoreferat/2008/belchanskaya.pdf>, которая защищена в 2008 под руководством В.П. Шевчука (научного руководителя обсуждаемой работы). В статье **2** они лишь проверялись в ходе опытов на подшипнике, поэтому личный вклад В.Н. Курьянова (если он существует) состоит **только** в этих измерениях. Последние описаны в статье **1**.

Статья имеет отдаленное и формальное отношение к теме диссертации: предложено использовать оценку погрешности для сравнения вибрационных процессов с эталонными моделями. За исключением этого предложения и деклараций о том, что данный результат позволяет: «выйти на методiku текущей диагностики» и «выйти на создание интеллектуального измерительного канала-датчика», связь с диссертацией отсутствует. В нее перенесен рис. 2 из статьи **2** (рис. 9 в автореферате), но он иллюстрирует понятие цифровой фильтрации данных и не несет конкретной информации.

Статья 3. Шевчук В.П., Бельчанская Е.Н., Курьянов В.Н. Алгоритм диагностики роторного оборудования автоматизированного рабочего места энергетика // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 10 (97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – с 139-143 <http://extremal-mechanics.org/wp-content/uploads/2014/11/kur1.pdf>.

В этой статье представлено АРМ энергетика с возможностями диагностики роторного оборудования. Центральная проблема диссертации затронута в одном предложении: «...база знаний (рис. 1), с одной стороны, пополняется ... пользователем (энергетиком), который осуществляет контроль данных экспериментальной базы, анализирует и принимает решения о состоянии энергоэффективности оборудования, ...».

Остальной текст описывает общие, математические принципы интеллектуально-измерительной диагностики дефектов, а также схему функционирования программного комплекса. По существу статья лишь анонсирует АРМ энергетика и утверждает, что оно имеет преимущества над другими.

В начале статьи: «Существующие системы позволяют решать только часть задач отдела энергетика на предприятии. Как правило, решаются лишь задачи учета и документооборота, сводя все введенные оператором данные в статическую базу данных и выводя отчеты и бланки, сгруппированные заданным способом».

В конце статьи: «Таким образом, основным отличием предлагаемого алгоритма диагностики роторного оборудования является использование информации поставляемой в базу данных в реальном масштабе времени непосредственно из информационно-измерительных подсистем АСУТП».

Эти высказывания выдают поверхностное знание предмета или недобросовестно искажают факты, поскольку существующие разработки решают **все** задачи, на первенство в которых претендует статья **3**, например http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/12-4/Klinkmann.pdf. В том числе в области мониторинга энергоэффективности, например [http://www.iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/NIPOM_2\(1\).pdf](http://www.iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/NIPOM_2(1).pdf).

В подробностях об использовании технологии DDE и других деталях программирования также нет ничего нового. Не вполне ясно, кто из соавторов писал коды? Предположительно, в этом участвовала Е.Н. Бельчанская, имеющая опыт такого программирования (рис. 1 в статье **3** почти идентичен рисунку на стр. 10 в <http://www-old.vstu.ru/research/avtoreferat/2008/belchanskaya.pdf>).

«Научные труды в других изданиях» являются тезисами 11-ти конференций, 8 из которых прошли в ВФ НИУ «МЭИ» (по месту выполнения диссертации). В двух из них автор обошелся без соавторов, при этом пп. 11 и 13 списка в автореферате не связаны с темой работы, а пп. 9, очевидно, является изложением результатов Е.Н. Бельчанской (**2**).

На защиту были вынесены следующие результаты

<http://www.dissercat.com/content/diagnostika-i-prognoz-vremeni-effektivnoi-raboty-rotornogo-oborudovaniya>

1. Критерий энергоэффективности функционирования роторного оборудования;
2. Модели измерительной информации, по которым целесообразно проводить диагностику;
3. Алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования при помощи высокочастотных, среднечастотных и низкочастотных сигналов;
4. Алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт.

Анализ главных результатов

в дальнейшем все ссылки на формулы, рисунки и таблицы относятся к автореферату

Результат 1. Критерий энергоэффективности явно не сформулирован. Но видно, что подразумевается превышение стоимости замены подшипников над стоимостью перерасхода электроэнергии, который следует вычислять по формуле (1). «Критерий энергоэффективности» основан на формуле (1) и только на ней. Однако, как показано выше в **4, 5**, она является ошибочной и применению не подлежит. Формулу (1) можно было бы заменить на (3) или (4). Однако, согласно сказанному в **6**, в этом нет никакой практической необходимости.

Результат 2. Моделями измерительной информации автор называет результаты моделирования последствий случайного процесса - вибрации двигателя от вышеуказанных дефектов. Однако математические модели, которые использовались в этой работе, являются не результатами, а инструментами исследования. Они не содержат в себе ничего нового с точки зрения ТАУ, а также теории и алгоритмов моделирования случайных процессов. Более того - лежащий в основе метод моделирования ведет к противоречиям (см. ниже).

Поэтому «модели измерительной информации» можно было выдвигать на защиту только в случае, если бы они имели практическую ценность. Но в силу сказанного выше, полезность диссертации близка к нулю. База знаний о дефектах подшипников далека от заполнения. Те знания, которые в данный момент заложены в систему, доверия не вызывают (см. комментарии к **статье 1**). Даже если система способна накапливать и систематизировать информацию в процессе эксплуатации, о чем нет объективных данных, пришлось бы провести значительно больше реальных экспериментов, чтобы она могла стать практически полезной.

Рассмотрим ближе «*модели измерительной информации*». Рассматривается случайный процесс вибраций в асинхронном электродвигателе, возникающих из-за дефектов подшипника. Они заданы амплитудой механических колебаний $X(t)$. Случайный процесс $X(t)$ рассматривается, как входной сигнал в систему управления (электродвигатель), где выходными сигналами являются действующие значения тока $Y_2(t)$ и входного напряжения $Y_1(t)$, коэффициент мощности $Y_3(t)$ и температура $Y_5(t)$ (таблица 3). Вибрация также рассматривается, как выходной сигнал $Y_4(t)$, поскольку сигнал $X(t)$ пропускается через датчик вибрации и на выходе выражается в децибелах (относительных единицах амплитуды по логарифмической шкале). Все эти функции предполагаются стационарными, эргодическими, случайными процессами. В качестве моделей преобразования сигналов приняты апериодические звенья I порядка с запаздыванием, так что передаточные функции имеют вид:

$$W(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1} \cdot \exp(-\tau \cdot p) \quad (8)$$

Для моделирования принята типичная **гипотеза** о том, что автокорреляционная функция входящего сигнала имеет простейший вид:

$$K_x(t) = \sigma^2 \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \quad (9)$$

Среднеквадратическое отклонение σ получается статистически из выборки реального процесса, а константа α подбирается методом наименьших квадратов при аппроксимации выборочной, корреляционной функции посредством функции (9).

Модель процесса представляет собой последовательности чисел, например x_n для вибраций $X(t)$, которая подается на вход виртуального контроллера с интервалом времени дискретизации Δt и определяется рекуррентно:

$$x_{n+1} = \sigma \cdot \sqrt{1 - \exp(-2 \cdot \alpha \cdot \Delta t)} \cdot w_n + \exp(-\alpha \cdot \Delta t) \cdot x_n, \quad x_1 = 0 \quad (10)$$

Здесь w_n - белый шум, т.е., любая последовательность псевдослучайных чисел, которая имеет нормированное, гауссово распределение. Полученная так, случайная величина имеет нулевое мат. ожидание. Поэтому нужно прибавить к ней $M(X)$, т.е, следует прибавить $M(X)$ к каждому числу x_n , так получается дискретизированная модель процесса $X(t)$.

Последовательность (10) имеет корреляционную функцию вида (9), на этом основании она считается моделью случайного процесса $X(t)$. Аналогично моделируются процессы $Y_k(t)$ (таб. 3). Их корреляционные функции представлены в таблице 2.

С целью контроля адекватности этих моделей в работе применяется критерий Стьюдента (проверка совпадения мат. ожиданий реального и моделирующего процессов) и критерий Фишера (проверка совпадения дисперсий). В таблице 3 даны итоги этого теста, где положительный исход выражается неравенствами $t < t_{кр}$ и $F < F_{табл.}$. Корректнее использовать обозначения t_ε и F_ε . Здесь ε - уровень значимости критерия, а t_ε и F_ε есть квантили распределений Стьюдента и Фишера. В комментариях к таблице 3 уровень значимости не указан, поэтому ссылки на эти критерии почти бессодержательны.

Судя по таб. 3, в данном случае приблизительно $\varepsilon = 0.02$. Чем меньше ε , тем лучше. Однако, значение критериев Стьюдента и Фишера не следует преувеличивать. Предположим, что $\varepsilon = 0.001$ (высокий уровень значимости). Если две случайные величины, реализованные последовательностью сигналов

$$X_n = X((n-1) \cdot \Delta t)$$

и имитирующей последовательностью x_n , имеют нормальные распределения с равными мат. ожиданиями, то выборочное значение t статистики Стьюдента с вероятностью 0.999 не превысит $t_{0.001}$. Если это событие осуществилось, так что в тесте имеет место $t \leq t_{0.001}$, то отсюда отнюдь **не следует**, что с вероятностью не меньше 0.999 имеет место $M(X_n) = M(x_n)$ (здесь не вполне корректно случайные величины обозначены также, как реализующие их последовательности). На самом деле, единичный успех теста по критерию Стьюдента (и Фишера) является не более, чем обнадеживающим результатом. Намного более информативным было бы получение отрицательного результата $t > t_{0.001}$, т.к. в случае $M(X_n) = M(x_n)$ (и при условии гауссовости) это означало бы наступление события, вероятность которого меньше 0.001. Тогда можно было бы обоснованно утверждать, что $M(X_n) \neq M(x_n)$. Но положительный исход теста Стьюдента скажет лишь о том, что мы не обнаружили причину отвергать гипотезу $M(X_n) = M(x_n)$.

Многократное повторение положительных тестов повышает уверенность в том, что $M(X_n) = M(x_n)$. Однако, единичные проверки по критериям Стьюдента и Фишера, представленные в таб. 3, ничего не говорят об адекватности моделей. Близость дисперсий двух процессов изначально заложена в модели (9), а способ построения последовательности (10) приводит к близости мат. ожиданий. Следует также заметить, что, добавляя к $X(t)$ произвольную константу, мы не изменим корреляционную функцию (9). Поэтому, даже надежно установленное совпадение мат. ожиданий реального и моделирующего процессов никак не подтверждает адекватность гипотезы (9).

Таким образом, критерии Стьюдента и Фишера de'facto не связаны с вопросом об адекватности математической модели случайного процесса. На самом деле эта модель **не адекватна**. В самом деле, спектральная плотность корреляционной функции вида (9) равна:

$$S_x(\omega) = \frac{\sigma^2 \cdot \alpha}{\pi \cdot (\alpha^2 + \omega^2)} \quad (11)$$

Известно, что спектральные плотности входящего $X(t)$ и выходящего $Y(t)$ сигналов связаны уравнением

$$S_y(\omega) = |W(i\omega)|^2 \cdot S_x(\omega) \quad (12)$$

где $W(i\omega)$ - частотная характеристика преобразователя. В работе все случайные процессы моделируются корреляционными функциями вида (9), в том числе входящий сигнал $X(t)$ (формула (1) в **статье 3**). Тогда в силу (8), (11) и (12), для любого из выходных сигналов $Y_k(t)$ имеем:

$$\frac{(\sigma_k)^2 \cdot \alpha_k}{\pi \cdot ((\alpha_k)^2 + \omega^2)} = \frac{(K_k)^2}{(T_k)^2 \cdot \omega^2 + 1} \cdot \frac{\sigma^2 \cdot \alpha}{\pi \cdot (\alpha^2 + \omega^2)} \quad (13)$$

Получилось тождество по ω , которое возможно только при $T = T_k = 0$. Отсюда следует, что все передаточные функции должны быть масштабирующими множителями (безинерционные звенья), поэтому (8) не имеет места. Тогда в силу (13) все константы α равны между собой, и также равны все дисперсии σ^2 . Поэтому должны быть равны между собой все корреляционные функции (8), используемые в работе, но это далеко не так, как видно из таблицы 2. Полученные, грубые **противоречия** доказывают неадекватность моделей случайных процессов, которые использованы в диссертации. Следовательно, все ее результаты, связанное с «*моделями измерительной информации*» являются ошибочными.

Немного больше физики. Аналогичное противоречие отражает непонимание физики асинхронного двигателя, которое проявилось в формуле (1) (см. **5**). В самом деле, действующее напряжение питания двигателя является стабильной величиной. Она может колебаться только вследствие явлений, происходящих во внешней цепи. Поэтому под напряжением U , которое меняется под действием дефектов подшипника (таб. 2, 3), следует понимать разность между напряжением питания и ЭДС противоиндукции, которая наводится в обмотке статора вращающимся ротором. Как известно, если рассматривать такое $U(t)$ в качестве входящего сигнала, а ток $I(t)$ в обмотке в качестве выходящего сигнала, то получится апериодическое звено I порядка с передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{1}{L \cdot p + R}$$

Можно добавить звено запаздывания (8) или не добавлять, в любом случае из (11) и (12) получим зависимость вида (13) между спектральными характеристиками напряжения и тока, которая противоречит моделям корреляционных функций вида (8).

На это можно попытаться возразить, что автор рассматривает не мгновенные, а действующие значения тока и напряжения, а также коэффициент мощности $\cos(\phi)$, как случайные функции времени t . Коэффициент мощности определяется только сопротивлением R обмотки статора и ее индуктивностью L , а также частотой переменного тока Ω . Эти величины не подвергаются воздействию вибраций, поскольку возмущения магнитного потока от колебаний обмотки будут пренебрежимо малы. Поэтому $\cos(\phi)$ является константой, если не происходит возмущений частоты Ω в связи с событиями во внешней цепи. От состояния подшипников это не зависит. Таким образом, модель случайного процесса $Y_3(t)$ является физически неадекватной (таб. 2, 3), а $\cos(\phi)$ следует считать константой. Тогда зависимость действующих значений тока $I_d(t)$ и напряжения $U_d(t)$ будет следующей:

$$I_d(t) = \frac{U_d(t)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_d(t) \cdot R}{R \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_d(t) \cdot \cos(\phi)}{R} = \text{const} \cdot U_d(t)$$

Отсюда следует, что автокорреляционные функции случайных процессов $I_d(t)$ и $U_d(t)$ отличаются лишь постоянным множителем, что несовместимо с данным из таб. 2.

В действительности мгновенные значения $I_d(t)$ и $U_d(t)$ не имеют физического смысла, поскольку эти величины используются только **в среднем**, для вычисления энергии E за период колебаний T или за время $t \gg T$. Мгновенные значения $U(t)$ и $I(t)$ связаны уравнением:

$$U(t) = R \cdot I(t) + L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Отсюда за период T имеем:

$$E = \int_0^T U(t)I(t)dt = R \cdot \int_0^T I^2(t)dt + L \cdot \int_0^T I(t) \frac{dI}{dt} dt = I_d^2 \cdot R \cdot T + \delta E$$

где δE - изменение энергии магнитного поля за период, вызванное изменением тока,

$$I_d = \sqrt{\frac{\int_0^T I^2(t)dt}{T}}$$

Из этой формулы видно, что действующее значение тока имеет смысл только в среднем за период. Однако колебания этой величины, которые предполагаются в работе, происходят в

течение каждого периода. В таких условиях, очевидно, нельзя рассматривать случайную функцию $I_d(t)$, пренебрегая ее колебаниями «внутри» интервалов времени T .

Вывод: Попытка рассматривать действующие значения тока и напряжения, а также коэффициент мощности, как случайные функции с автокорреляцией вида (8), была физически безграмотной. Следовало считать $\cos(\phi)$ константой и рассматривать мгновенные значения $U(t)$ и $I(t)$. Но в этом случае математически модели случайных процессов («модели измерительной информации») являются неадекватными и внутренне противоречивыми.

Результат 3. Разработанные автором (?) программы (АРМ энергетика + ППП) не предлагают ничего нового в том, что касается собственно диагностики. Предметная область – вибрационная диагностика подшипников в электродвигателях едва ли изучалась глубже, чем на уровне формального, патентного поиска систем, определяющих перерасход энергии: *«Имеются патенты по распознаванию дефектов, но патентов по информационно-измерительной системе, определяющей энергоэффективность роторного оборудования, не обнаружено»*. Как следствие, автор пытался решать неактуальную задачу (см. **6**).

Очевидно, что существующие системы вибрационной диагностики обеспечивают надежное распознавание дефектов в подшипниках, располагая глубокими базами знаний http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/12-4/Klinkmann.pdf. При этом база знаний АРМ энергетика, представленного в этой работе, является весьма поверхностной. Система не распознает большинство дефектов из тех, которые собраны в «классификации», поскольку они не были изучены (таб. 1). При этом способность надежно распознавать 2 - 3 «изученных» типа дефектов сомнительна из-за скудности опытных данных, а также полной неадекватности «моделей измерительной информации» (см. **результат 2**).

Диссертация претендует на новизну в использовании действующего значения тока в качестве диагностического признака. Но попытка рассматривать действующее значение тока, как случайную функцию с автокорреляцией вида (8), была физически безграмотной и привела к ложным результатам (см. **результат 2**).

В то же время очевидно, что превышение тока в обмотке асинхронного двигателя может свидетельствовать о дефектах подшипника. Однако работа не содержит сведений о том, как именно определить наличие и оценить дефекты, используя данные о силе тока и ее отклонениях от нормы. То же касается диагностики по данным о перерасходе энергии, возможность которой декларируется на стр. 18: *«... взглянуть по новому на проблему управления ремонтами по энергопотреблению как по важному диагностическому признаку состояния объекта»*. Ясно, что перерасход энергии может свидетельствовать о наличии

дефектов. Но проблема такой диагностики, на самом деле, в этой работе не изучалась. Рассматривалась обратная задача: влияние дефектов подшипника на расход электроэнергии.

Научная и практическая новизна «алгоритмов диагностики» состоит **только в том**, что для оценки перерасхода энергии использовалась формула (1). Ее применение иллюстрируют блок-схемы на рис. 11 и 13. Поскольку формула (1) является ошибочной, то эти алгоритмы и ППП нельзя использовать по назначению.

АРМ энергетика привязано к лабораторной установке, которая была создана на кафедре АТП в ВФ МЭИ (т.е., по месту выполнения диссертации). Этот программный комплекс не проверялся в условиях реального производства и не внедрен **нигде**, за исключением ВФ МЭИ. Свидетельство о регистрации № 2012617022 фиксирует авторское право, но не является сертификатом качества и/или новизны компьютерных программ. По-видимому, эта система сравнивалась с другими только в отношении способности считать перерасход энергии от дефектов в подшипниках. Предположительно, последнее не заложено в существующие системы в силу того, о чем сказано в п. 6. Но существующие АРМ энергетика, тем не менее, обеспечивают мониторинг энергоэффективности [http://www.iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/NIPOM_2\(1\).pdf](http://www.iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/NIPOM_2(1).pdf).

Результат 4. «Новый алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт» целиком основан на формуле (1) (рис. 13). Как было показано в 4 и 5, эта формула является ошибочной. Алгоритм также содержит ошибку, отмеченную в 2. Таким образом, результат несостоятелен и бесполезен.

Заключительные замечания

Исходя из пп. **результаты 1, 2, 3, 4** приходится констатировать, что диссертация не содержит ни одного нового результата из тех, которые были представлены к защите, за исключением ложных. К ошибкам относится почти все, что связано с моделированием случайных процессов. Эти модели неадекватны и, более того, внутренне противоречивы.

Название работы слишком общо, т.к., фактически, в ней изучалась только проблема потерь энергии в асинхронных электродвигателях, возникающих от дефектов в подшипниках. Вопрос о связи дефектов с затратами энергии имеет научно-практическое значение, однако диссертация не продвинулась в этом направлении ни на шаг. Более того, она уводит в сторону. При этом создается ложное впечатление о том, что разработана перспективная система, готовая к практическому применению с доработкой в производственных условиях.

С точки зрения физики работа выглядит безграмотно. Очевидно, что автор и его научный руководитель взяли за проблему, не разобравшись в физических принципах

асинхронного электродвигателя и переменного тока. Возможно, что с программированием дело обстоит несколько лучше, но в силу сказанного в **результате 3**, практическая ценность АРМ энергетика близка к нулю. К тому же речь идет о научно-практических результатах, а не об инструментах исследования. В той части, в которой диссертация заслуживает похвалы, она не поднимается выше уровня бакалаврской работы по кафедре АТП

Следует отметить лингвистические усилия, с которыми автор рекламирует свою работу. Например, на стр. 18: *«Показано, что в качестве диагностического признака можно эффективно использовать действующее значение тока, которое несет важную диагностическую информацию о потерях электроэнергии дефектного объекта ...»*. Понятно, что превышение действующего значения силы тока при заданной нагрузке свидетельствует о дополнительных потерях энергии. Эту информацию можно назвать диагностической, т.к. перерасход энергии связан с наличием дефектов (не обязательно в подшипнике). Но если ничего более конкретного сказать нельзя, то для чего писать эти банальности?

На момент защиты автор диссертации имел три журнальных публикации по 4 стр., которые некорректно и неполно отражают основные результаты (пп. **статьи 1, 2, 3**). Поэтому можно утверждать, что диссертация не проходила независимую, научную экспертизу. В связи с отсутствием статей без соавторов трудно понять, какие из результатов принадлежат лично автору, а какие ему не принадлежат. Важность данного вопроса обусловлена тем, что в автореферате и диссертации по этому поводу ничего не сказано. Анализ публикаций дает основания усомниться в том, что автор не использовал чужие программные коды, а также самостоятельно выполнил все расчеты.

Продукты диссертации проходили опытную проверку и были внедрены только в Волжском филиале НИУ «МЭИ», т.е., по месту выполнения работы. Они используются в учебном процессе, а также в демонстрационных целях. Поэтому говорить о реальном, практическом эффекте не приходится. За два года после защиты вышла еще одна статья автора <http://isjaee.hydrogen.ru/pdf/isjaee-14-2013/36-39.pdf>, согласно которой результаты диссертации были адаптированы к ветрогенератору на т.н. полигоне ВФ НИУ «МЭИ». Данная установка применяется исключительно в учебных целях, а также для демонстрации инновационных исследований. Об уровне этих исследований можно судить по диссертации.

Данная работа не отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

д.ф.-м.н. Д.Б. Зотьев
профессор каф. общей физики
Волжского филиала НИУ «МЭИ»

15 ноября 2014