

Возражения 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.

http://extremal-mechanics.org/wp-content/uploads/2015/03/Dissert_Kur_1.pdf

http://extremal-mechanics.org/wp-content/uploads/2015/03/Dissert_Kur_2.pdf

Ссылки на формулы из диссертации имеют двойную нумерацию (например (2.1)), формулы отзыва пронумерованы подряд (например (1)).

На защиту были вынесены следующие результаты (стр. 7, 156):

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 результатов

1. Под критерием энергоэффективности подразумевается формула (2.1) на стр. 59, которая выражает потери энергии вследствие дефектов. С учетом (2.2) она эквивалентна:

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

где $I(t)$ - действующее значение тока в обмотке электродвигателя, $\Delta I(t)$ - отклонение этого значения, обусловленное дефектами, константа K выражается через т.н. коэффициенты адаптации K_i и настройки системы $K_{н.с.}$:

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

Критерий энергоэффективности (1) встречается также на стр. 97 и в блок-схеме (3.16) на стр. 128. Очевидно, что формула (1) физически бессмысленна. Потери энергии за время t , возникшие вследствие превышения тока из-за дефектов, выражаются следующим образом:

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

Здесь $\tilde{I}(\tau)$ и $\Delta\tilde{I}(\tau)$ - мгновенные значения тока и его отклонения.

Легко видеть, что формулы (1) и (3) противоречат друг другу. Например, пусть ток синусоидален, $\Delta\tilde{I}(\tau) = \varepsilon \cdot \tilde{I}(\tau)$ для некоторой константы $\varepsilon \approx 0$ и t кратно периоду. Тогда, пренебрегая переходным процессом и полагая $\varepsilon^2 = 0$, из (3) получим следующий перерасход энергии:

$$\Delta\tilde{W}(t) = \Delta W(t) = 2 \cdot R \cdot I^2 \cdot \varepsilon \cdot t$$

При этих же предположениях из формулы (1) получим:

$$\Delta W(t) = K \cdot R \cdot I^3 \cdot \varepsilon \cdot t$$

Таким образом, коэффициент K должен зависеть от действующего значения тока I , однако он является константой (2), которая не зависит от тока.

В тексте диссертации нет сведений о том, откуда взялась зависимость (1) (эквивалентная (2.1) и (2.2)). Термин «*модель развития*», по существу, является декоративным и ничего не объясняет. На стр. 54 приводится формула (1.8):

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R$$

из книги Железко, Артемьева, Савченко «*Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов*». Из нее следует, что при $I(t) = const$ затраты электроэнергии за время t составят

$$\Delta W(t) = R \cdot (I(t))^2 \cdot t \quad (4)$$

Формула (4) дана на стр. 54 под номером (1.10), как якобы вытекающая из (1.8). При этом не учитывается противо-ЭДС, которая наводится в обмотке статора вращающимся ротором. Поскольку в (1.8) символом U обозначено напряжение питания электродвигателя, из этой формулы не вытекает (1.10). Формула (1.8) давала бы потери мощности только при неподвижном роторе, например в момент включения.

Следует также заметить, что из (1.8) не ясно, какое U имеется ввиду: линейное или фазное? Судя по тому, что всюду фигурирует ≈ 380 В, рассматривается линейное напряжение. На это, вслед за автором, не будем обращать внимания.

Очевидно, что из (4) не следует (1). На стр. 54 также приводится формула (1.9) из книги Железко «*Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов*», которая никак не связана с (1). Таким образом, ссылки на литературу не ведут к обоснованию формулы (1)

В статьях по теме диссертации нет уравнений (2.1) и (2.2) (список в конце отзыва). С критерием энергоэффективности связана только формула (5) из [1]. По поводу (5) авторы ссылаются на книгу Железко, Артемьева, Савченко, в которой такого соотношения **нет**:

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

Здесь $T_{p.o} = t$ и символ d_x выражает доли потерь энергии, приходящихся на каждый дефект (пропущен номер дефекта i). Налицо противоречие с формулой (1).

Кроме того, поскольку U обозначает напряжение питания, в (5) не учитывается противо-ЭДС асинхронного мотора. Последствия этой ошибки иллюстрирует приложение Д (стр. 202 - 204), где применяется (5) и принято $K_{н.с.} = 0.9$, $n = 1$, $d_x = 0.3$. В этой ситуации формула (5) относит к потерям 93% потребляемой электроэнергии что, разумеется, абсурдно.

Таким образом, в статье [1] нет оправданий для (1), но есть странная формула (5) для вычисления потерь энергии. Она не представлена в тексте диссертации, но в приложении Д дан документ MathCad, в котором (5) используется следующим образом :

$$\Delta W_{i, \text{Трд}} \leftarrow \frac{(P_i)^2 + (Q_i)^2}{(U_i)^2} \cdot R_i \cdot \text{Трд} \cdot 24 \cdot [d_x + (1 - d_x) \cdot 0.9] \quad (6)$$

Здесь $\Delta W_{i, \text{Трд}}$ - потери энергии за Трд суток, а смысл индекса i не поясняется. Судя по рисункам (4.3), (4.4) (стр. 135, 136), он нумерует моменты времени с интервалом 1 или 2 сек, в которые производились измерения мощностей P, Q (кВт, кВар) и напряжений U (кВ) (R измеряется в кОм). Очевидно, что значения $\Delta W_{i, \text{Трд}}$ при фиксированном Трд и переменном i не имеют смысла.

Как видно из приложения Д, при вычислениях по формуле (6) использовалось фиксированное значение $d_x = 0.3$. Откуда взялась эта оценка, а также «коэффициент настройки системы» $K_{н.с.} = 0.9$? Сведений об этом нет, однако видно, что они не вычисляются, а **назначаются** ($d_x := 0.3$). По-видимому, эти числа являются нечеткими (fuzzy) оценками. Такой подход допустим при условном разделении $\Delta W(t)$ между дефектами, однако ясно, что потери энергии в целом нельзя определять на основе субъективных данных.

При отсутствии дефекта подшипника формула (6) используется с $d_x = 0$, это дает массив $\Delta W 0_{i, \text{Трд}}$. После этого вычисляется стоимость повышенных потерь электроэнергии

$$cW_{i, \text{Трд}} = (\Delta W_{i, \text{Трд}} - \Delta W 0_{i, \text{Трд}}) \cdot c ,$$

обусловленных дефектами в подшипнике, что подразумевает формулу для таких потерь:

$$\Delta E(t) = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \cdot \sum_{i=1}^n d_{xi} \cdot (1 - K_{н.с.}) \cdot t \quad (7)$$

При этом потери энергии при отсутствии дефектов подшипника даются формулой

$$\Delta W_0(t) = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \cdot K_{н.с.} \cdot t$$

которая относит на бездефектные потери 90% потребляемой энергии, что является абсурдом.

Согласно (7), при $d_x = 0.3$ потери от дефекта подшипника составят 3% активной мощности. Этот результат не выглядит абсурдным, однако формула (7) противоречит (2.1). Кроме того, она нуждается в коэффициентах $K_{н.с.}$ и d_{xi} , для которых не указаны методики. Если методикой вычисления d_{xi} считать «*модель развития дефекта*» (2.2) (на это в приложении Д нет никаких намеков), то получим ложную формулу (1). Уравнение (2.2)

$$d_{xi} = \frac{\Delta I}{K_i}$$

является произвольной гипотезой, которая не имеет под собой физических оснований. Из нее и (7) следует, что потери активной мощности от дефектов пропорциональны $I^2 \cdot \Delta I$. Это противоречит тому, что при $\Delta I \ll I$

$$\Delta P = \Delta(I^2 \cdot R) \approx 2 \cdot R \cdot I \cdot \Delta I$$

где I - действующее значение тока при отсутствии дефектов подшипника, ΔI - превышение I , обусловленное дефектами.

На стр. 135 и 136 приводятся графики, отображающие потери электрической энергии при наличии дефектов (4.3) и без них (4.4). Утверждается, что они были получены с помощью уравнения (2.1). Более правдоподобно, что для этого использовался двумерный массив (6), вычисляемый в приложении Д (возможно при других значениях констант). Рисунки (4.3) и (4.4) почти не отличаются между собой, поэтому высказывание на стр. 135 «*Далее кривые в последующие сутки приобретают более явные пики и минимумы, что связано с неоднозначным проявлением влияния имеющихся дефектов на изменение потерь электрической энергии*» является плодом воображения. График на рис. 4.3 выглядит, как чуть приподнятый график на рис. 4.4, но это различие не соответствует 10% разницы, о которой идет речь в предпоследнем абзаце на стр. 136.

Другая странность этих рисунков заключается в том, что уменьшения количества уже потерянной энергии произойти не может. Однако, именно это явление наблюдается на графиках (4.3) и (4.4), где значения потерь за время t колеблются.

При этом в диссертации **нет** сведений о том, сравнивались ли расчетные значения $\Delta W(t)$ по формулам (2.1) + (2.2) с фактическими перерасходами энергии, определенными с помощью счетчика 12 лабораторной установки (рис. 2.30 стр. 89). Весьма странно, что критерий энергоэффективности (1) не проходил экспериментальную проверку.

Название параграфа 2.1. *Экспериментальные исследования моделей дефектов* (стр. 59 - 77) лишь вводит в заблуждение, т.к. «модели дефектов» в нем не упоминаются. 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. Также проводилась вибро-диагностика с помощью датчика СД-12М и программного комплекса DREAM. Аналогичные опыты были проведены с подшипником 6-7506А.

Почти весь § 2.1 заполнен графиками с однообразными комментариями. Следующее пояснение, например, повторяется 8 раз :

« I_a - ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, А;

I_b - ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, А;

I_c - ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, А;

P - активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт;

S - полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВА;

Q - реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.»

По существу § 2.1 – это раздутый отчет об экспериментах с парой подшипников и тремя видами дефектов. Поскольку собранная статистика в дальнейшем **не** используется, ценность этих опытов сомнительна. Критерий энергоэффективности в них не проверялся. Кроме банальностей последнего абзаца на стр. 76, продуктом опытов стал вывод на стр. 77:

«Таким образом, проведение испытаний двух типов подшипников показали наличие влияния дефектов роликов подшипников на потребляемый ток испытательной установки, а следовательно и на расход электрической энергии. Нет нужды проводить эксперименты, чтобы сделать такое умозаключение – достаточно школьных знаний физики.

Как результат опытов с парой подшипников и одним электромотором, заявлена *«классификация дефектов роторного оборудования, учитывающая их влияние на увеличение расхода электрической энергии»* (таб. 2.1 стр. 77). Все эти дефекты известны и описаны в книгах. Каждый из них может влиять на энергоэффективность – в большей или меньшей мере. К тому же эксперименты проводились только с тремя типами дефектов из тридцати трех,

указанных в таблице. Поэтому классификация, на самом деле, является умозрительной и не основанной на проведенных опытах.

Примечание *«Исследования по выявлению влияния дефектов на расход электроэнергии в данной работе не завершены»* относится к большинству дефектов, собранных в таблице 2.1. Новая информация содержится только в числах 10, 20 и 30, которые дают значения $d_{xi} = 0.1$, 0.2 и 0.3 соответственно. Однако, из-за отмеченной выше неразберихи с формулами перерасхода энергии не ясно, куда эти числа следует подставлять. Прямо в (2.1), что противоречило бы (2.2), или в формулу (7), которая неявно применяется в приложении Д? О происхождении параметров 10, 20 и 30 ничего не сказано. Опытных данных явно недостаточно для того, чтобы обосновать эти значения. Очевидно, что они являются нечеткими оценками значимости дефектов по их влиянию на потери энергии, где в роли эксперта выступил автор. Таким образом, классификацию таб. 2.1 едва ли можно признать новым результатом, а ее научно-практическая ценность близка к нулю.

В § 2.3 обсуждаются эксперименты на лабораторном стенде, созданном студентами ВФ МЭИ. На стр. 88 в предпоследнем абзаце упоминается *«интеллектуальный счетчик электрической энергии СЕ 303»*, указанный на схеме стр. 89. Однако, в работе нет сведений о том, сравнивались ли потери энергии, измеренные счетчиком с теми, которые были получены по «критерию энергоэффективности» (1) или какой-нибудь из формул (7) и (2.1) с нечеткими оценками коэффициентов d_{xi} .

Следующее утверждение на стр. 97 является примером лингвистических ухищрений, создающих дымовую завесу над бессодержательностью этой работы: *«Экспериментальные исследования, проведенные в главе 2.2, показали, что расход электрической энергии, потребляемый электроприводом, изменяется в процессе развития дефекта, что позволяет сделать вывод о том, что расход электроэнергии можно использовать для прогноза развития дефекта»*.

В тексте нет **никакой** информации о том, как именно перерасход энергии диагностирует дефекты, за исключением тривиального суждения о наличии причинно-следственной связи. Но это не мешает автору рекламировать свою работу, как содержательную в отношении диагностики. Примером служит еще один лингвистический изыск на стр. 18 автореферата: *«Показано, что в качестве диагностического признака можно эффективно использовать действующее значение тока, которое несет важную диагностическую информацию о потерях электроэнергии дефектного объекта ...»*.

Первый абзац § 2.4 на стр. 96: «На рисунке 2.1 показано существование минимальной точки в которой оплата потерь электрической энергии возрастает, а разница между стоимостью ремонтных работ и оплатой потерь электроэнергии снижается и достигает минимального значения ...» В автореферате этот рисунок имеет номер 2:

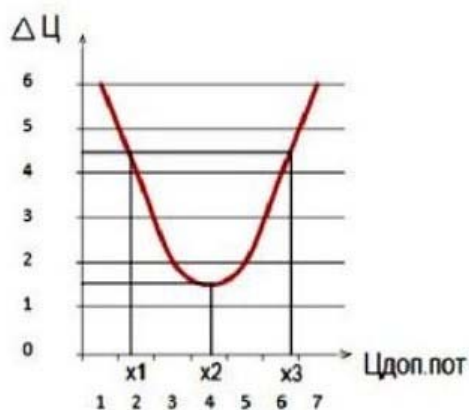
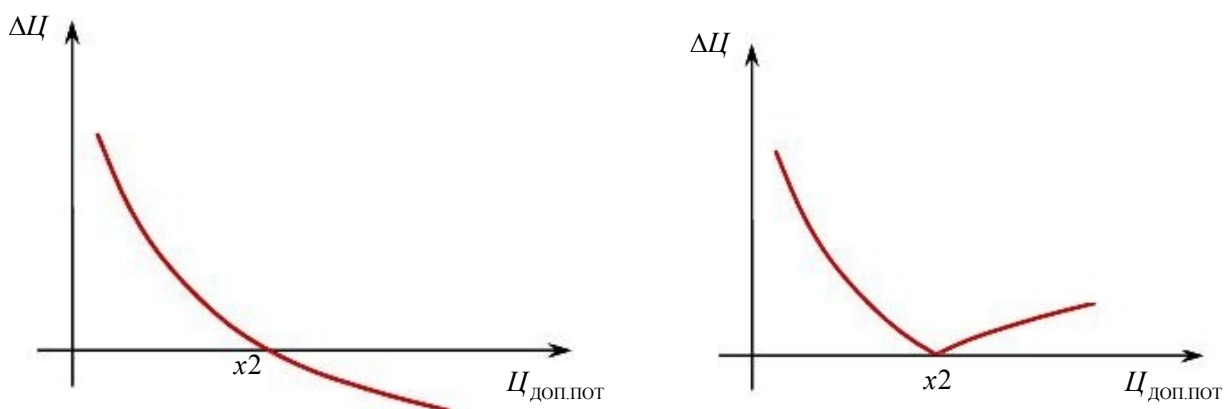


Рисунок 2 – Анализ затрат на эксплуатацию роторного оборудования

Рисунок противоречит пояснениям « $\Delta Ц$ – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов); $Ц_{\text{доп.пот}}$ – стоимость потерь электроэнергии, зависящих от дефектов», согласно которым график должен пересекать ось абсцисс в точке x_2 :



Если же автор имел ввиду, что величина $\Delta Ц$ считается по модулю, то график должен иметь излом в точке x_2 . Однако, согласно рис. 2.1, по мере приближения $Ц_{\text{доп.пот}}$ к значению x_2 темп уменьшения $\Delta Ц$ стремится к нулю. Этот эффект не имеет объяснения. Таким образом, рис. 2.1 был нарисован произвольно и неверно, а связанное с ним утверждение в § 2.4 является бессодержательным. На стр. 97 в качестве критерия энергоэффективности повторяется формула (2.1).

Таким образом, «критерий энергоэффективности функционирования роторного оборудования» сводится к **ложной** формуле (1). Одновременно присутствует путаница в отношении того, как именно считать перерасход энергии. На это неявно претендует формула (7), использованная в приложении Д, а также (2.1) стр. 59, используемая без (2.2). Эти две формулы противоречат друг другу, т.к. содержат множители $1 - K_{н.с}$ и $K_{н.с}$ соответственно, а также потому, что в асинхронном электродвигателе

$$\frac{P^2 + Q^2}{U^2} \neq I^2 \quad (\text{из-за наличия противо-ЭДС}).$$

За исключением физически необоснованной «*модели развития дефектов*» (2.2) стр. 59, ведущей к нелепой формуле (1), для вычисления значений d_{xi} нет никаких рецептов. По-видимому, они определяются методом экспертных оценок, что в сущности сводится к угадыванию. Такой подход приемлем лишь в том случае, если полученные формулы подтверждены экспериментами. Однако, судя по тексту и релевантным статьям, ни один из «критериев энергоэффективности» не проходил опытной проверки. То, что написано по поводу экспериментов, лишь маскирует данный факт.

2. Моделями измерительной информации являются результаты мат. моделирования случайных процессов - вибраций асинхронного двигателя от дефектов подшипника и связанных с ними колебаний параметров. Однако, использованный метод ведет к противоречиям, которые опровергают основополагающее утверждение этой и других диссертаций, защищенных под руководством В.П. Шевчука: «*Аппроксимация корреляционных функций экспоненциальной формой не только справедлива для большинства параметров технологических процессов, но и может быть использована как универсальная форма описания измерительной информации в системах управления*» (из книги «Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах», авторы Капля Е. В., Кузеванов В. С., Шевчук В. П. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2009).

Здесь подразумевается аппроксимация выборочной АКФ с помощью функции

$$K(\tau) = \sigma^2 \cdot \exp(-\alpha |\tau|) \quad (8)$$

В конце стр. 80 приводится смелое суждение, предположительно, из той же книги: «*Любой стационарный случайный процесс может быть с необходимой степенью точности описан корреляционной функцией*»:

$$K(\tau) = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot \exp(-\alpha_i \cdot |\tau|) \quad (9)$$

Сумма взаимно коррелированных, стационарных случайных процессов с АКФ (8) не будет иметь АКФ (9) даже приближенно.

Вибрации подшипника с амплитудой $X(t)$ рассматриваются, как случайный процесс и входной сигнал (3.26), а выходными сигналами являются действующие значения тока $Y_2(t)$, напряжения $Y_1(t)$, коэффициент мощности $Y_3(t)$ и температура $Y_5(t)$ (таб. 2.3) на стр. 96, таб. 2.2 на стр. 85). Вибрация в децибелах также рассматривается, как выходной сигнал $Y_4(t)$, поскольку $X(t)$ пропускается через датчик. Все эти случайные процессы предполагаются стационарными и эргодическими, имеющими АКФ (8).

В качестве моделей управления приняты апериодические звенья I порядка, так что передаточные функции имеют вид:

$$W(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1} \cdot \exp(-\tau_0 \cdot p) \quad (10)$$

Но модели (8) не могут быть адекватными для всех сигналов сразу, т.к. это привело бы к противоречиям. В самом деле, спектральная плотность АКФ вида (8) равна

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

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 силу (11) и (12), для любой пары сигналов с АКФ (8) и константами $\alpha_i \neq \alpha_j$, связанных звеном (10), имеет место:

$$\frac{\sigma_j^2 \cdot \alpha_j}{\pi \cdot (\sigma_j^2 + \omega^2)} = \frac{K^2}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} \cdot \frac{\sigma_i^2 \cdot \alpha_i}{\pi \cdot (\alpha_i^2 + \omega^2)}$$

Полученное тождество по ω возможно только при $T = 0$, что несовместимо с понятием апериодического звена. Одновременно видно, что случайные сигналы с АКФ (8) могут быть связаны только линейным преобразованием определенного вида, для которого $|W(i\omega)|^2$ равно отношению функций (11). Апериодические звенья к этому классу не относятся.

В работе прямо не сказано о том, какие из рассматриваемых сигналов с АКФ (8) связаны звеном (10). Судя по уравнениям (3) в [2] и (1), (2) в [3], измеряемый сигнал $X(t)$ и результат его измерения $Y(t)$ считаются связанными каналом (10). Но из схемы (3.11) акустического канала (стр. 120) не вытекает, что (без восстанавливающего элемента) он имеет передаточную функцию вида (10). Дело в том, что АЦП, вообще говоря, не является безинерционным звеном

и может иметь различные модели (см. таб. 1 http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=8239&option_lang=rus)

В силу (3.24) передаточная функция акустического измерительного канала имеет вид:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \quad (13)$$

Как известно, передаточная функция физически осуществимого канала управления выражается отношением двух многочленов, так что степень числителя не превышает степень знаменателя. Данное свойство имеет каждая из функций $W_i(p)$ в правой части (13), при этом хотя бы один из сомножителей является аperiодическим звеном I порядка. Таков, например, цифровой фильтр с весовой функцией (19) на стр. 123. Его передаточная функция имеет вид (10) (при $\tau_0 = 0$), поэтому степень числителя равна нулю, а степень знаменателя - единице. Следовательно, степень числителя функции

$$W(p) = \frac{Q(p)}{R(p)}$$

строго меньше степени знаменателя. Пусть $n = \deg(Q)$ и $m = \deg(R)$, тогда $n < m$ и

$$|W(i\omega)|^2 = W(i\omega) \cdot \overline{W(i\omega)} = \frac{Q(i\omega)}{R(i\omega)} \cdot \frac{\overline{Q(i\omega)}}{\overline{R(i\omega)}} = \frac{Q(i\omega)}{R(i\omega)} \cdot \frac{Q(-i\omega)}{R(-i\omega)} = \frac{q_n \cdot \omega^{2n} + \dots}{r_m \cdot \omega^{2m} + \dots}$$

где q_n и r_m - старшие коэффициенты многочленов Q и R . Таким образом, степень числителя рациональной функции $|W(i\omega)|^2$ строго меньше степени знаменателя ($2n < 2m$). Это несовместимо с уравнением

$$\frac{\sigma_j^2 \cdot \alpha_j}{\pi \cdot (\sigma_j^2 + \omega^2)} = |W(i\omega)|^2 \cdot \frac{\sigma^2 \cdot \alpha}{\pi \cdot (\alpha^2 + \omega^2)}$$

которое следует из (12) и связывает спектральные плотности измеряемого сигнала $X(t)$ и результата его измерения $Y_j(t)$. Тот факт, что $X(t)$ имеет АКФ вида (8) следует из (3.26).

Доказано, что модели измерительной информации, используемые в диссертации, взаимно противоречивы. АКФ вида (8) **нельзя** использовать для моделирования всех случайных процессов из таб. 2.3 на стр. 96, как это делает автор, ссылаясь на ошибочное, принципиальное положение, выделенное красным цветом выше.

Рассмотрим практические результаты такого моделирования. В качестве экспериментальной базы использовался лабораторный стенд, имитирующий дефекты подшипника с помощью диска, асимметричного по моментам инерции относительно оси вращения. Схема стенда копируется на стр. 89, 97 и 103, что еще раз характеризует диссертацию, как имеющую избыточный размер.

Результаты моделирования наглядно представлены на рис. 2.24 – 2.28 стр. 82 – 84. Из них видно, что только эмпирическая АКФ напряжения напоминает экспоненту. Особенно эффектно выглядит «аппроксимация» вибраций на рис. 2.27, которая иллюстрирует тезис о невозможности пропускать сигналы с АКФ (8) через акустический, измерительный канал и получать на выходе сигналы с АКФ вида (8).

С целью контроля адекватности этих моделей применяются критерии Стьюдента и Фишера. В таблице 2.3 стр. 96 даны итоги этих тестов, но уровень значимости не указан. Судя по написанному на стр. 92, он равен 5%. На стр. 93 дана формула (2.27) статистики Стьюдента t , которая была использована для проверки близости мат. ожиданий экспериментального и виртуального (моделирующего) процессов. В (2.27) допущена ошибка, т.к. верное выражение t содержит множитель \sqrt{N} , где N - размер выборки. Безотносительно к этому, положительный исход теста по критерию Стьюдента не следует переоценивать. В самом деле, при уровне значимости ε из выполнения условия

$$t < t_{N-1,\varepsilon}$$

где $t_{N-1,\varepsilon}$ - квантиль распределения Стьюдента с $N-1$ степенями свободы (автор обозначает ее $t_{кр}$), следует, что

$$P\{t < t_{N-1,\varepsilon}\} = P\{|\hat{m} - m_0| < t_{N-1,\varepsilon} \cdot \sigma / \sqrt{N}\} \geq 1 - \varepsilon \quad (14)$$

Если случайная величина, для которой получена данная выборка значений, имеет нормальное распределение с мат. ожиданием m_0 и среднеквадратическим отклонением σ , то событие $t < t_{N-1,\varepsilon}$ имеет (достаточно высокую) вероятность $1 - \varepsilon$. Успешный тест Стьюдента означает, что данное событие наступило. Это **обнадеживает** с точки зрения того, что погрешность выборочного среднего \hat{m} по отношению к m_0 не превышает величину $t_{N-1,\varepsilon} \cdot \sigma / \sqrt{N}$.

Однако, единичный успех теста Стьюдента не позволяет утверждать, что (14) действительно имеет место. Отрицательный результат намного более информативен, т.к. он связан с наступлением маловероятного события. По существу, положительный исход теста Стьюдента означает лишь одно: не обнаружена убедительная причина для того, чтобы отвергнуть гипотезу $\hat{m} \approx m_0$. Многократный, успешный повтор теста для различных выборок имел бы доказательную силу, однако автор ограничивается одной проверкой.

Из вышеприведенных рассуждений видно, что ошибка в формуле (2.27) (пропущен множитель \sqrt{N}) делает данный тест бессмысленным. Однако, при не слишком большой

выборке и большой разнице между статистикой (2.27) и $t_{N-1,\varepsilon}$ эта ошибка может оказаться несущественной.

Аналогичные соображения можно высказать и в отношении критерия Фишера, который применяется для проверки близости дисперсий реального и моделирующего процессов. Значимость тестов Стьюдента и Фишера для проверки адекватности моделей измерительной информации ничтожна еще и потому, что близость мат. ожиданий и дисперсий реального и моделирующего процессов заложена в способе получения последнего. Виртуальный сигнал формируется именно так, чтобы давать близкие значения этих статистик и тех, которые получаются из экспериментальных данных ((2.20), (2.22) на стр. 87, 88). Если бы нас интересовало только хорошее «попадание» в опытные мат. ожидание m_0 и дисперсию D_0 , то в качестве модели, например, годился бы гауссов белый шум с $m = \hat{m}$ и $\sigma = \sqrt{\hat{D}}$.

Единственное дополнительное условие, которое автор накладывает на моделирующий сигнал (помимо воспроизведения мат. ожидания (2.10) и дисперсии (2.11)), это АКФ вида (8), хорошо аппроксимирующая эмпирическую АКФ (2.12). Тесты Стьюдента и Фишера, на самом деле, не подтверждают выполнение данного условия.

Действительно, моделирующий сигнал имеет среднеквадратическое отклонение σ , полученное по эмпирической выборке, которое является параметром его АКФ (8). Поэтому естественно, что дисперсии реального и виртуального процессов оказываются близкими между собой. Теоретически они должны совпадать.

Что касается близости мат. ожиданий, то этот вопрос не имеет отношения к моделированию процесса с АКФ заданного вида. Дело в том, что, добавляя к сигналу $X(t)$ произвольную константу, мы не изменим его АКФ. Поэтому, даже надежное совпадение мат. ожиданий реального и моделирующего процессов не подтверждает гипотезу (8).

Таким образом, результаты тестов по критериям Стьюдента и Фишера из таб. 2.3 стр. 96 не подтверждают адекватность моделей, основанных на АКФ вида (8) и, в сущности, лишь имитируют проверку адекватности. О том, что насколько виртуальные АКФ соответствуют реальным (2.12), можно судить по рис. 2.24 – 2.28.

На стр. 95 описана еще одна проверка адекватности моделей измерительной информации, использующая критерий Стьюдента. Фактически, она сравнивает значение нормированных АКФ реального и виртуального процессов в момент времени $\tau_{0.5}$, отвечающий значению реальной АКФ ≈ 0.5 . Возникает вопрос: зачем сравнивать между собой значения двух АКФ в точке $\tau_{0.5}$ с помощью теста, успешный исход которого не дает

никаких гарантий, если достаточно найти относительную погрешность? Предположительно, ответ таков: для большей, хотя и кажущейся убедительности в ситуации, когда аппроксимация реальной АКФ с помощью экспоненты (8) не выглядит достаточно хорошей.

Если экспоненциальная аппроксимация эмпирической (нормированной) АКФ построена так, чтобы две функции имели общее значение ≈ 0.5 в некоторой точке, то в критерии Стьюдента нет необходимости. Как аппроксимировал автор? Из текста это понять сложно. В приложении В, где вычисляются АКФ (8), значения констант $T = 1/\alpha$ присваиваются в готовом виде. По-видимому, они подбирались при визуальной близости двух графиков так, чтобы выполнялось условие о значениях ≈ 0.5 (для ненормированной АКФ $K(t)$ это отвечает значению $\approx 0.5 \cdot K(0)$). Из пяти рисунков 2.24 – 2.28 только 2.27 не удовлетворяет данному условию, однако видно, что в случае подгонки экспоненты под него она бы слишком сильно отличалась от реальной АКФ.

Таким образом, проверка с помощью (2.32), (2.33) выглядит, как имитация с помощью сложного, не всем понятного и потому убедительного теста. Помимо сказанного о критерии Стьюдента, она является неубедительной по следующей причине. Вместо (14) здесь возникает

$$P\{t < t_{f,\varepsilon}\} = P\{|\widehat{K}(\tau_{0.5}) - K_0(\tau_{0.5})| < t_{f,\varepsilon} \cdot \sigma_{K(\tau_{0.5})}\} \geq 1 - \varepsilon$$

где f - число степеней свободы. При положительном исходе теста, т.е., в случае $t < t_{f,\varepsilon}$ мы получили бы реализацию события

$$|\widehat{K}(\tau_{0.5}) - K_0(\tau_{0.5})| < t_{f,\varepsilon} \cdot \sigma_{K(\tau_{0.5})} \quad (15)$$

Это не очень обнадеживает в отношении того, что $\widehat{K}(\tau_{0.5})$ и $K_0(\tau_{0.5})$ близки между собой, поскольку сомножитель $t_{f,\varepsilon}$ (не слишком малого) $\sigma_{K(\tau_{0.5})}$ может увеличить его в разы.

В таблице 2.3, возможно, имеются в виду проверки с помощью (2.32), однако больше похоже на то, что с помощью критерия Стьюдента проверялось совпадение реального и виртуального мат. ожиданий. В приложении Г вычисляется статистика t , числитель которой совпадает с числителем (2.27), а знаменатель выражает непонятно что. Он не похож на среднеквадратическое отклонение σ моделируемого сигнала, но и не похож на (2.33). Что имелось ввиду в приложении Г, когда вычислялось статистика, напоминающая Стьюдента? Возможно, что автор запутался в t -критериях, поскольку применял их неосознанно. Следует заметить, что в приложении Г не видно значений статистик Фишера, присутствующих в таблице 2.3, а формулы для их вычисления записаны неверно.

На рис. 2.31 стр. 90 изображен результат моделирования случайного процесса $Y_1(t)$ -

действующее значение напряжения питания электродвигателя на лабораторном стенде. АКФ (8) сигнала, моделирующего $Y_1(t)$, дана в таб. 2.2 стр. 85. На рисунке видно, что, начиная примерно с 10-й секунды, реальный сигнал становится периодическим (период около 2-х минут). У моделирующего сигнала периодичность не наблюдается. Следовательно, говорить о схожести двух процессов не приходится.

На рис. 2.32 изображен результат моделирования действующего значения тока $Y_2(t)$. Здесь видна грубая, методологическая ошибка. Она заключается в том, что ток измеряется от момента включения электродвигателя. Но на этапе разгона ток снижается от максимального, пускового значения до стационарного, рабочего. Данный эффект связан с нарастанием противо-ЭДС индукции по мере раскрутки ротора. Между тем, применяемая в этой работе теория корреляционных функций и методика моделирования исходят из предположения о стационарности случайного процесса. Таким образом, следовало рассматривать сигнал $Y_2(t)$, начиная с момента завершения переходного процесса, т.е. приблизительно с 10-й секунды.

Как следствие этой ошибки, эмпирическое мат. ожидание силы тока оказалось завышенным (таб. 2.2), что привело к заниженному уровню моделирующего сигнала (который стационарен с самого начала). На рис. 2.32. видно, что моделирующее значение тока ниже, чем реальное, а размах его колебаний больше. Моделирующий процесс полностью неадекватен, что также видно на рис. 2.27.

Заметим, что из-за этой ошибки коэффициент вариации тока 36.3% значительно превосходит аналогичные показатели для напряжения 0.2%, температуры 0,3%, коэффициента мощности 4,1% и вибрации 4,2% (использованы данные таб. 2.2 стр. 85).

На рис. 2.33 изображен результат моделирования коэффициента мощности $Y_3(t)$. Видно, что, начиная примерно с 10-й секунды, реальный сигнал становится периодическим (период около 2-х минут). У моделирующего сигнала периодичность не наблюдается. Кроме того, размах его колебаний заметно больше. Поэтому моделирующий процесс неадекватен.

На рис. 2.34 изображен результат моделирования виброускорения $Y_4(t)$. Реальный сигнал имеет большую амплитуду колебаний, их частота заметно выше (оценочно в 1.5 – 2 раза). По-видимому, моделирующий процесс неадекватен.

На рис. 2.35 изображен результат моделирования температуры $Y_5(t)$. Начиная примерно со 160-й секунды, неадекватность моделирующего процесса становится очевидной.

Таким образом, «*модели измерительной информации*» внутренне противоречивы, что связано с некритическим и необоснованным использованием АКФ (8) в качестве математической основы. Адекватность реальным экспериментам не подтверждена. То, что было сделано в этом направлении, является по большей части имитацией проверки. Судя по рис. 2.31 – 2.34, модели измерительной информации не адекватны реальным процессам, которые эмулировались на лабораторном стенде.

Адекватность экспериментов с асимметричным диском тем процессам, которые происходят в дефектных подшипниках, нуждается в дополнительном исследовании. Мне не удалось найти сведения о том, что этот вопрос серьезно изучался. Поэтому методология исследования, помимо рассмотренных ошибок, сомнительна в том отношении, что мат. модели процессов на лабораторном стенде могут применяться на реальном производстве. При этом статистика экспериментов на испытательной установке ЦКБ-50 Волжского подшипникового завода не применялась для построения моделей измерительной информации.

Таким образом, de'facto были проведены учебные исследования, которые не поднимаются выше уровня стандартной, бакалаврской работы по мат. моделированию случайных процессов. Новых и достоверных, научно-практических результатов в этом направлении диссертация не содержит.

3. Алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования собраны в АРМ энергетика,. Что именно из себя представляет этот комплекс и поднимается ли он выше набора учебных упражнений по программированию микроконтроллеров в среде Trace Mode - об этом судить трудно. Свидетельство о государственной регистрации № 2012617022 на «*Программный комплекс оптимизации затрат на эксплуатацию роторного оборудования по потерям электрической энергии оборудования «РОПОТ*», полученное автором (указаны 4 соавтора), отнюдь не служит аттестатом качества или свидетельством практической полезности. Оно лишь защищает авторские права на случай, если появятся охотники их нарушать. Судя по тому, что в заголовке приложения Д есть ссылка [78] на это свидетельство (стр. 202), в «программный комплекс» включен документ MathCad, в котором выполняются расчеты по «критерию энергоэффективности». Они не являются программами, хотя и содержат фрагменты кода, реализующие циклы вычислений. Здесь смешиваются результат и инструмент исследования, который автор применял для численных расчетов. С таким же успехом можно было бы назвать программными комплексами любые вычисления, которые выполняются с помощью компьютера.

Формальное включение документов MathCad в «комплекс программ» убедительно свидетельствует об отсутствии законченной, интегрированной среды для диагностики

дефектов по их влиянию на энергоэффективность. Блок-схема на рис. 3.2 стр. 102 явно не соответствует экспериментальному материалу и знаниям, которые использовались в работе. О каких цехах № 1, 2 и т.д. может идти речь, если эталонные модели получены из опытов на простейшем, лабораторном стенде с ассиметричным диском в роли дефектного подшипника? При этом статистика испытаний на установке ЦКБ-50 в работе не использовалась, хотя и она не дала бы оснований для того, чтобы претендовать на применение АРМ энергетика в реальном производстве. Заложённая в него база знаний является весьма поверхностной. Система заведомо не распознаёт подавляющее большинство дефектов из тех, которые собраны в «классификации» (таб. 2.1 стр. 77), поскольку они не были изучены. При этом способность распознавать 3 относительно изученных типа дефектов из 33-х крайне сомнительна вследствие скудности опытных данных, а также неадекватности моделей измерительной информации (2). По существу, «программный комплекс» привязан к лабораторной установке, которая была создана студентами кафедры АТП в ВФ МЭИ. Презентованное в работе АРМ энергетика не проверялось в условиях реального производства и не внедрено нигде, за исключением кафедры АТП в ВФ МЭИ. Таким образом, нет ни малейших оснований для того, чтобы рассматривать его, как готовый к применению продукт.

По-видимому, диссертационная работа и презентованное в ней АРМ энергетика не предлагают ничего нового в том, что касается вибродиагностики дефектов в подшипниках. Существующие системы обеспечивают надёжную диагностику, располагая глубокими базами знаний (пример http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/12-4/Klinkmann.pdf.) Они также поддерживают мониторинг энергоэффективности оборудования (пример [http://www.iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/NIPOM_2\(1\).pdf](http://www.iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/NIPOM_2(1).pdf)), поэтому претензии на новизну в этом отношении беспочвенны. Очевидно, что научная и практическая новизна «алгоритмов диагностики» состоит **только в том**, что для оценки перерасхода энергии использовался критерий энергоэффективности (1). Его применение иллюстрирует блок-схема на рис. 3.16 стр. 128. Поскольку критерий энергоэффективности несостоятелен (1), эти алгоритмы нельзя использовать на практике, а также применять в научных исследованиях.

В отношении энергоэффективности автор добавляет тривиальное предложение следить за температурой электродвигателя и принимать меры, когда температура превышает некоторое, допустимое значение (рис. 3.17 стр. 129). Следует заметить, что данный «алгоритм» формально ошибочен, т.к. он предлагает реагировать и на пониженную температуру, которая не должна вызывать беспокойства. Как бы то ни было, трудно рассматривать это иначе, как имитацию серьёзных результатов.

Материал в §§ 3.1 - 3.4 (стр. 102 - 126) усиливает впечатление от диссертационной работы и презентованного в ней АРМ энергетика. Однако легко видеть, что эти результаты автору не принадлежат и присутствуют в других диссертациях, защищенных под руководством В.П. Шевчука. В качестве примера - совпадения с работой И.А. Болдырева <http://extremal-mechanics.org/wp-content/uploads/2014/12/BoldyrevIA.pdf> (выпускник кафедры АТП ВФ МЭИ, формально имел другого научного руководителя, однако из списка публикаций видно, что диссертацией фактически руководил В.П. Шевчук). Ссылки на автореферат выделены красным цветом:

- формула (3.14) отличается от (26) только тем, что в (26) дана дисперсия сигнала от одного канала, а в (3.14) эти выражения суммируются для трех каналов;
- формула (3.18) отличается от (28) только знаком в $-2T_s$;
- формула (3.23) по существу не отличается от (29), хотя возможно, что в одной из двух присутствующих ошибки.

Другим примером служат совпадения с диссертацией Е.Н. Бельчанской <http://www-old.vstu.ru/research/avtoreferat/2008/belchanskaya.pdf>, ссылки на автореферат выделены красным цветом:

Рис. 3.2. на стр. 102 и рис. 3 на стр. 10 отличаются только заменой слов «система» на «цех»;

Рис. 3.11 на стр. 120 и рис. 4 на стр. 10 совпадают.

Легко видеть совпадения с другими диссертациями, касающиеся формул из § 3.2. Информация на стр. 106 вверху явно не соответствует критерию энергоэффективности: *«Таким образом, косвенным показателем текущих потерь может выступать величина текущей активной мощности роторного оборудования:»*

$$P(t) = \sqrt{3} \cdot U(t) \cdot I(t) \cdot \cos\phi(t)$$

В дальнейшем это выражение линеаризуется и применяется для оценки потерь энергии. Очевидно, что здесь автор цитирует работы В.П. Шевчука, но с «критерием энергоэффективности» (1) это не связано.

Таким образом, «алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования» не являются практически полезным результатом и не содержат в себе новых, достоверных научных данных.

4. Алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт является приложением критерия энергоэффективности, рассмотренного в разделе 1. Описание и блок-схема представлены на стр. 133, 134. Предлагается прогнозировать стоимость перерасхода

энергии из-за дефектов в подшипниках по формуле $cW = const \cdot t$, где константа определяется из критерия энергоэффективности.

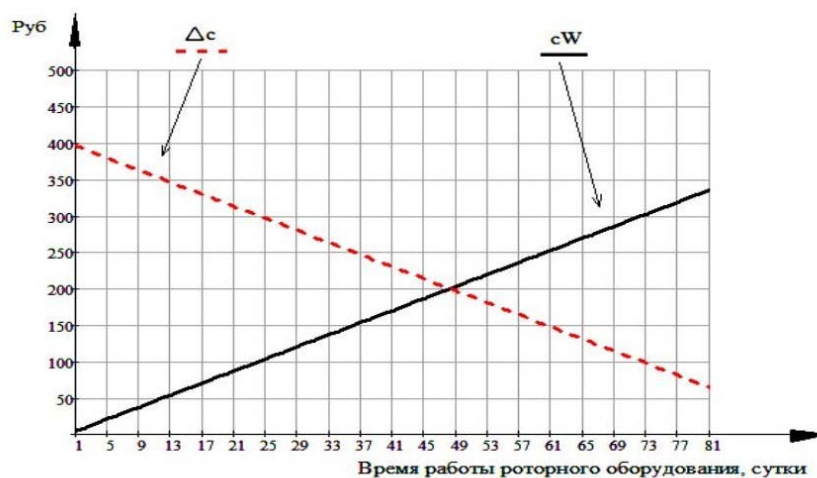


Рисунок 15 – Прогноз времени вывода роторного оборудования на ремонт

Неразбериха с формулами для перерасхода энергии от дефектов наблюдается и в § 4.1. Автор ссылается на (2.1) стр. 59, однако в формуле (4.1) на стр. 138 фигурирует величина ΔW_0 , которая в силу (2.1) равна нулю (при отсутствии дефектов их доли d_{xi} в расходе энергии равны нулю). Поэтому (1.41) бессмысленно или подразумевает использование методики из приложения Д, которая противоречит «критерию энергоэффективности» (1).

Рекомендовано произвести ремонт после того, как половина его стоимости сравнивается с прогнозируемым значением затрат (точка пересечения прямых). Эту тривиальную идею едва ли можно назвать алгоритмом. Кроме того, она не имеет под собой экономических и технологических оснований. Почему замену оборудования следует производить именно тогда, когда накопленные убытки достигнут половины стоимости ремонта? Ответа на этот вопрос в тексте нет. Диссертация опирается на простейшие, учебные опыты, однако претендует на вклад в повышение энергоэффективности промышленного оборудования. Например, электрогенераторов ТЭЦ. Ясно, что предотвращение разрушения подшипника в такой машине является более важной задачей, чем экономия денег на заблаговременной замене.

С другой стороны, расчет экономически оптимального момента для ремонта оборудования должен принимать во внимание прибыль от его эксплуатации. В противном случае откладывать ремонт бесполезно. Зачем ждать накопления убытков до половины его стоимости, если можно заменить подшипник сразу? Алгоритм расчета момента времени для ремонта, предложенный в работе, а такие тонкости не вдается. Автор уверенно декларирует то, что **показалось** ему верным, как новую и важную идею.

Детали интерфейса на рис. 4.7, 4.9 и 4.11, касающиеся реализации «алгоритма» в среде Trace Mode, играют декоративную роль. Таким образом, «алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт» не может рассматриваться, как научный и/или практически полезный результат.

Статьи по теме диссертации

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.
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>.
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>.

«Научные труды в других изданиях» являются тезисами 11-ти конференций, 8 из которых прошли в ВФ НИУ «МЭИ» (по месту выполнения диссертации). Только 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 диссертации Е.Н. Бельчанской <http://www-old.vstu.ru/research/avtoreferat/2008/belchanskaya.pdf>.

Заключительные замечания

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 внутренне противоречивы.

Название работы слишком общо и не соответствует содержанию. 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 (АРМ энергетика), 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. Возможно, что с программированием дело обстоит несколько лучше, но практическая ценность АРМ энергетика близка к нулю. В той части, в которой диссертация заслуживает похвалы, она не поднимается выше уровня бакалаврской работы по кафедре АТП

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 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. «зеленом полигоне» ВФ НИУ «МЭИ». Данная установка применяется исключительно в учебных целях, а также для **демонстрации** наличия 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. На мой взгляд, она является профанацией научной работы, выполненной наскоро и на заказ.

д.ф.-м.н. Д.Б. Зотьев

6 апреля 2014