

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ

Структурная модель автоматизированного рабочего места [75, 79, 81, 82] для количественной оценки энергоэффективности роторного оборудования представлена на рисунке 3.1.

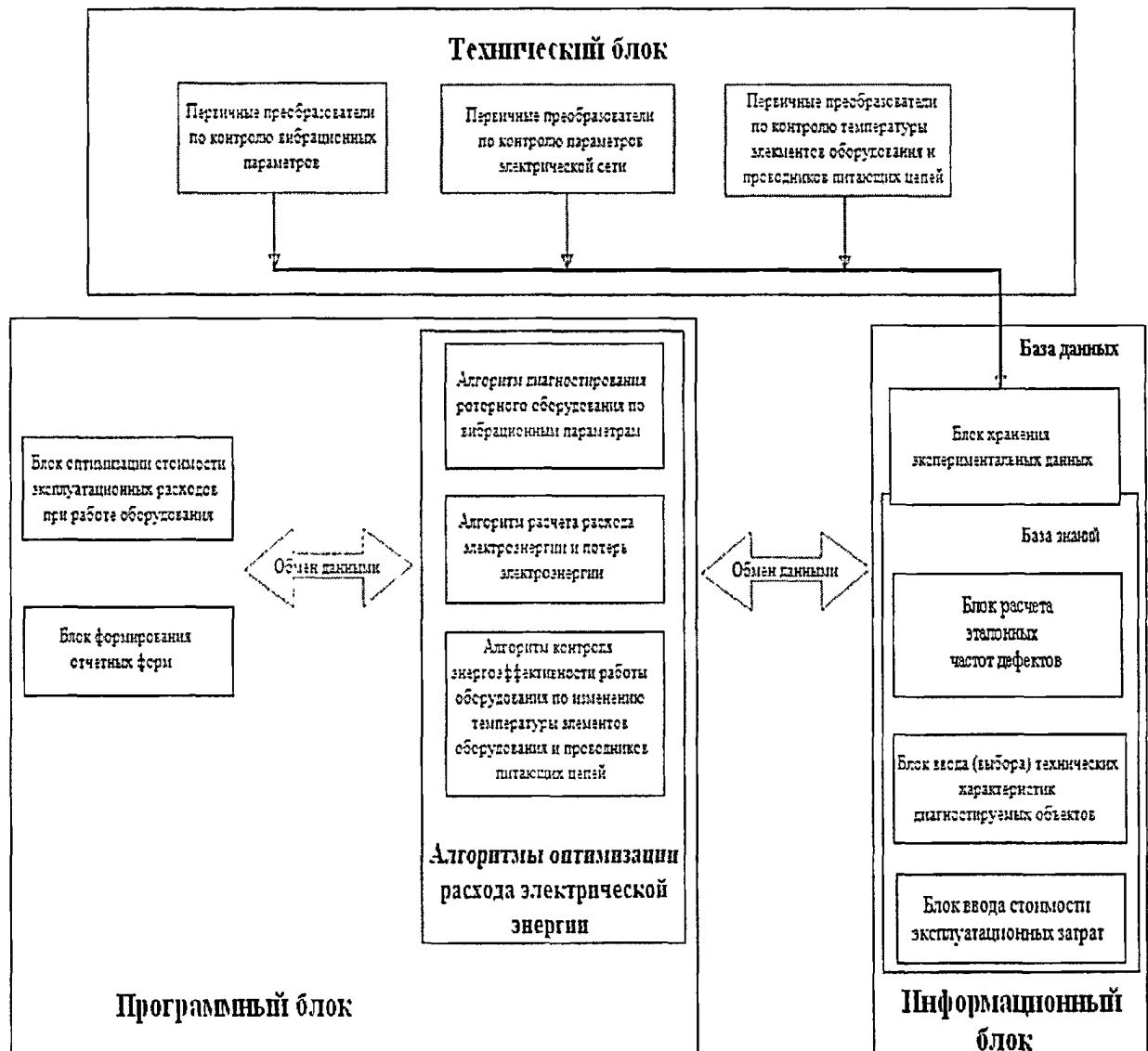


Рисунок 3.1. Структурная модель автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования.

Автоматизированное рабочее место состоит из **технического, программного и информационного блоков**. Технический блок представляет собой информационную подсистему АСУ ТП для первичной

обработки измерительной информации, генерируемой первичными преобразователями установленными на роторном оборудовании и представляет собой комплексную систему текущего мониторинга и диагностики энергоэффективности роторного оборудования. В **техническом блоке** сосредоточены следующие первичные преобразователи: а) по контролю вибрационных параметров; б) по контролю параметров электрической сети; в) по контролю температуры элементов оборудования и проводников питающих цепей. Из технического блока измерительные сигналы поступают в **информационный блок**, который представляет собой базу данных Trace Mode-6. В информационном блоке сосредоточена информация, от измерительных преобразователей хранящаяся в «базе данных», информация, по эталонным реализациям дефектов хранящаяся в «базе знаний». В информационный блок вводятся параметры диагностируемого оборудования необходимые для работы системы и показатели эксплуатационных затрат представленные. В **программном блоке** реализованы алгоритмы расчета энергоэффективности и интеллектуального анализа данных, в результате работы алгоритмов определяется экономически выгодная дата проведения ремонтных работ, формируются отчетные формы.

На рисунке 3.2 представлена структура системы мониторинга параметров энергетического оборудования промышленного предприятия. Которая состоит из автоматизированного рабочего места энергетика; экспертной системы включающей в себя систему управления базой экспериментальных данных, систему интеллектуального анализа данных, систему прогнозирования и принятия решений, систему формирования отчетных форм; базы знаний включающей в себя базу экспериментальных данных и базу характеристик сигналов объектов управления. Информация от объектов диагностики через информационно-измерительные системы поступает в базу знаний и экспертную систему, где

обрабатывается и визуализируется на автоматизированном рабочем месте энергетика [77].

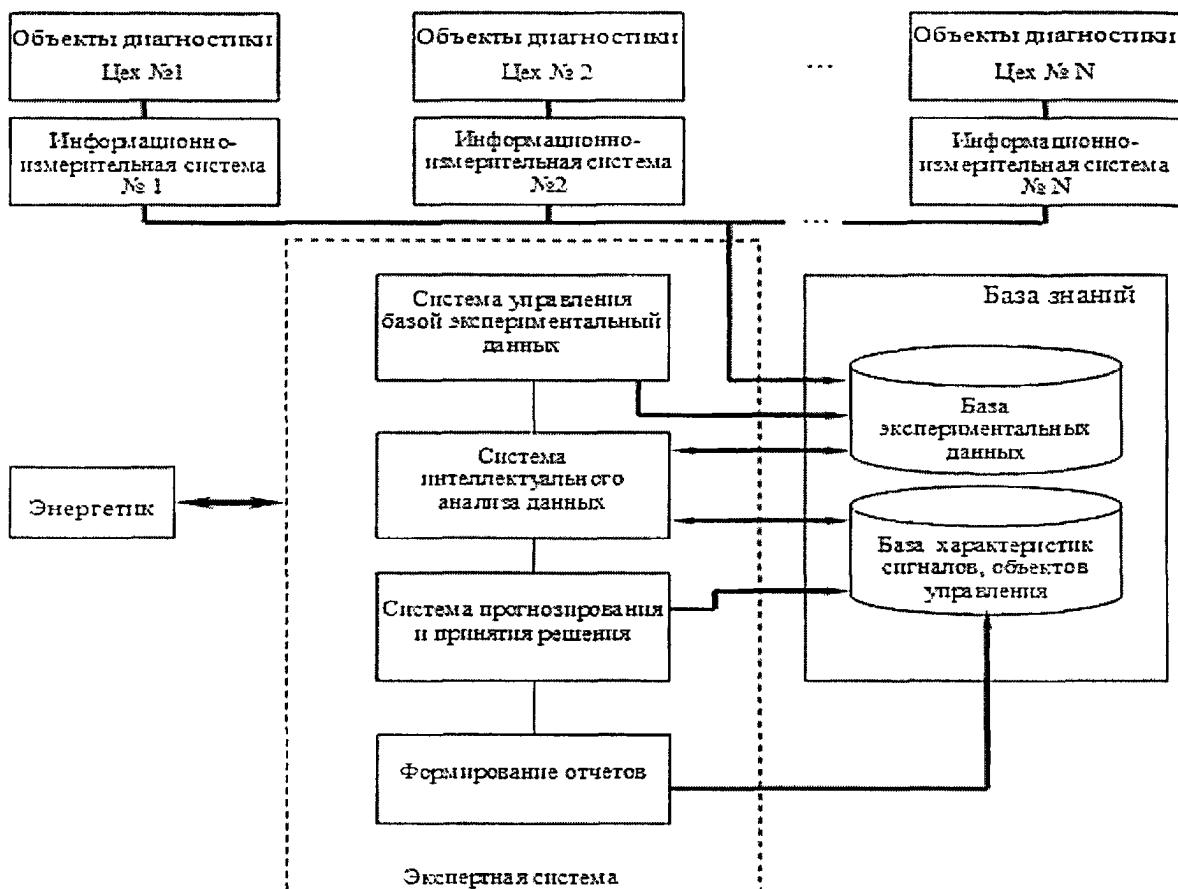


Рисунок 3.2. Система мониторинга параметров АРМ.

3.1 Выбор моделей метрологических характеристик автоматизированного рабочего места

Для целей разработки и исследования алгоритмов диагностики создан стенд для диагностики программного обеспечения и измерительных каналов автоматизированного рабочего места для диагностики роторного оборудования (АРМ ДРО). Упрощенная функциональная схема представлена на рисунке 3.3.

Стенд функционирует следующим образом. При включении электродвигателя (блок 1) момент вращения со шкива (9) передается на физическую модель роторного оборудования (10) посредством ременной

передачи. Контроллер (блок 3) предназначен для первичной обработки измерительной информации со всех датчиков (первичных преобразователей) измерительной информации, кроме виброакустических. Сигналы от вибродатчиков непосредственно передаются в ЭВМ общего назначения, так как датчики виброускорения имеют встроенный контроллер.

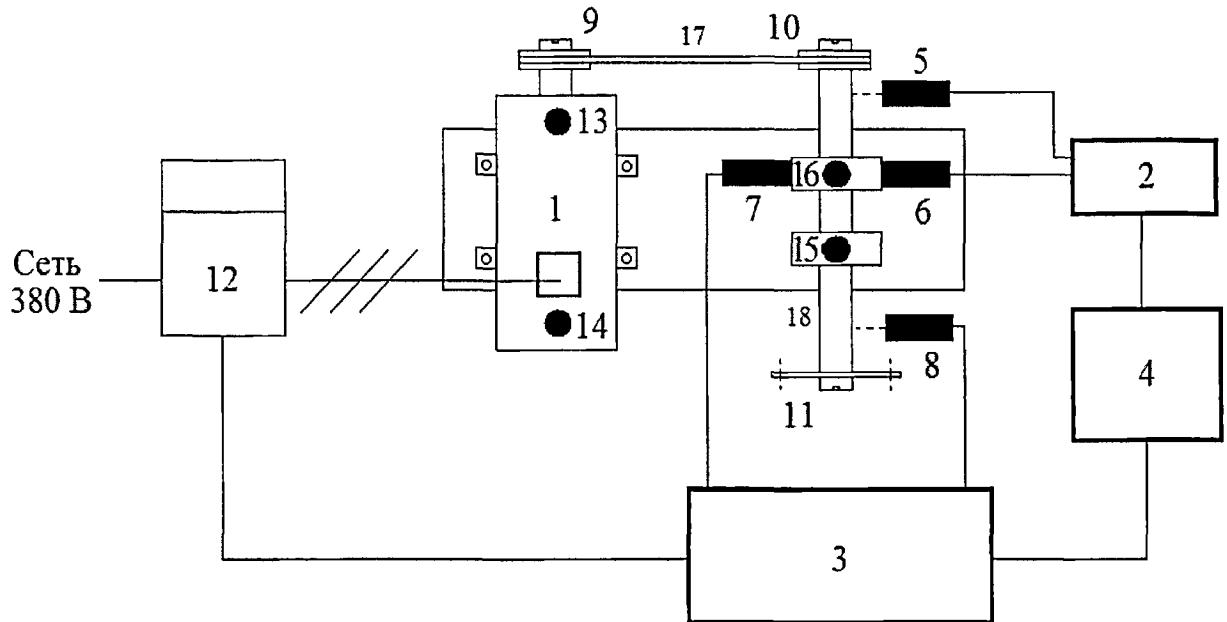


Рисунок 3.3 Структурная модель стенда - технического блока АРМ

Стенд состоит из асинхронного электродвигателя 1 тип 4АМ80А4УЗ, мощностью 1,1 кВт с числом оборотов вала 1400 мин^{-1} , при помощи ременной передачи 17 и двух шкивов 9,10 ротор электродвигателя соединен с рабочим валом 18 на котором смонтирован диск 11 диаметром 200 мм с отверстиями для крепления масс различного веса для создания дисбаланса в различных экспериментальных режимах работы. 2 – виброанализатор СД-12М; 3 – контроллер KP-500; 4 – ЭВМ; 5, 8 –датчики оборотов (тахометры); 6, 7 – датчики виброускорения; 12 – счетчик электрической энергии; 13-16 – точки контроля вибропараметров. Измерительная информация от контроллера и вибродатчиков передается в ЭВМ общего назначения и обрабатывается при помощи отечественной САД/САМ системы Trece Mode и выводится алгоритмами визуализации на соответствующие окна автоматизированного рабочего места (см. рисунок. 3.4) [78].

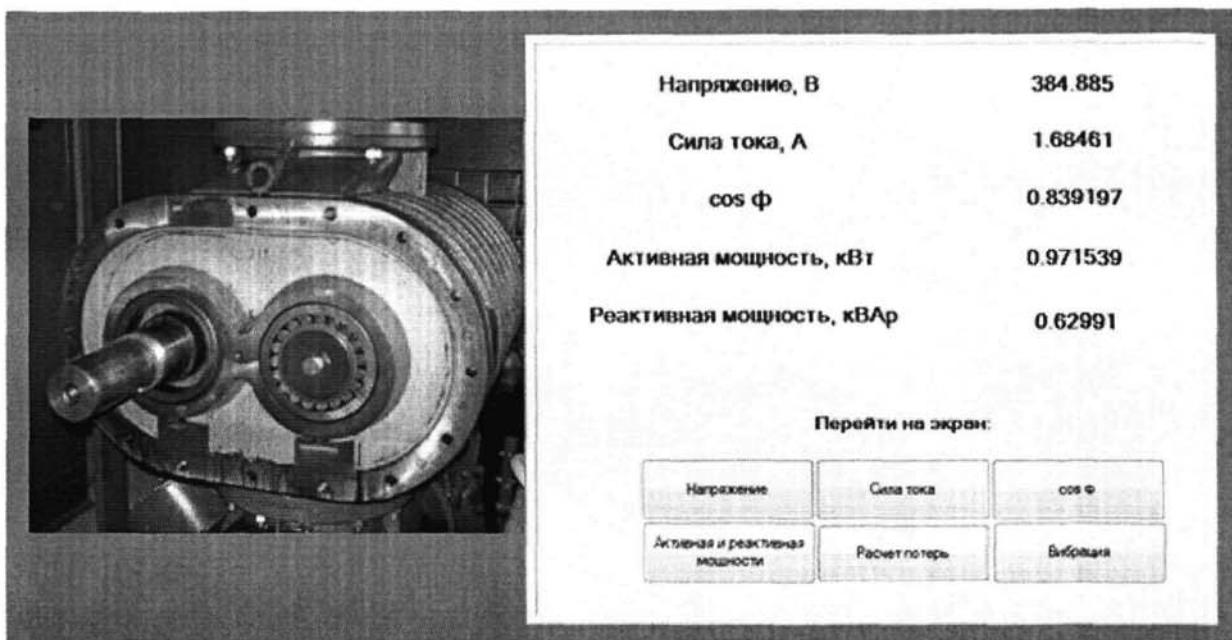


Рисунок 3.4 – Главное окно оператора автоматизированного рабочего места

Измерительная информация по **своей** природе является случайной функцией времени, и, следовательно, в основе математического моделирования измерительной информации должны лежать корреляционные функции.

Анализу свойств, промышленных сигналов посвящено большое количество работ, в которых предлагаются различные аналитические модели измеряемых сигналов и воздействующих на них помех [27, 50, 51, 52, 53].

В [54] отмечено, что адекватными моделями большей части измеряемых процессов являются нестационарные случайные процессы, характеристики которых изменяются во времени. Причиной нестационарности, как правило, являются изменение режимов технологического процесса, изменение характеристик оборудования и сырья, импульсные воздействия на контролируемый объект в виде включения-выключения двигателей, ударных воздействий, отказы в работе контролируемого объекта.

В работе [25] предложено представление измерительной информации $G(t)$ в виде квазистационарного эргодического случайного процесса

$$G(t) = X(t) + n(t), \quad (3.1)$$

где $n(t)$ – помеха, наложенная на полезный сигнал, принятая в виде некоррелированной с полезным сигналом случайной функции $n(t)$ с нулевым математическим ожиданием; $X(t)$ – полезный сигнал, являющийся квазистационарным эргодическим случайным процессом с постоянным математическим ожиданием Mx и корреляционной функцией вида:

$$Kx(t) = Dx \cdot e^{-\alpha|t|}, \quad (3.2)$$

где Dx – дисперсия сигнала, α - скорость изменения сигнала, t – текущий момент времени.

В качестве основной характеристики помехи применялась корреляционная функция:

$$Kn(t) = Dn \cdot e^{-\beta|t|}, \quad (3.3)$$

где Dn – дисперсия помехи, β - скорость изменения корреляционной функции.

В случае высокочастотной помехи (спектр помехи значительно шире спектра полезного сигнала, то есть выполняется условие $\beta \gg \alpha$) выражение (3.3) в пределе стремится к белому шуму – непрерывной стационарной случайной функции, спектральная плотность которой постоянна на всех частотах от 0 до ∞ .

Корреляционная функция такой случайной функции выражается как

$$Kn(t) = S \cdot \delta(t), \quad (3.4)$$

где S – уровень шума; $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака.

Использование такой модели позволяет дать оценку помехи по верхнему уровню в условиях априорной неопределенности, то есть когда невозможно получить для помехи более точного аналитического описания.

Показания измерительной системы – мощность определяемая по уравнению измерения на основании прямых измерений напряжения, тока, \cos угла сдвига фаз .

Таким образом, косвенным показателем текущих потерь может выступать величина текущей активной мощности роторного оборудования:

$$P(t) = \sqrt{3} \cdot U(t) \cdot I(t) \cdot \cos \varphi(t) \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) относится к классу нелинейных и требует линеаризации. Любая непрерывная дифференцируемая функция в достаточно узких пределах изменения аргументов может быть приближенно заменена линейной. При этом ошибка, возникающая при линеаризации, тем меньше, чем уже границы изменения аргументов и чем ближе функция к линейной. Ошибка линеаризации, безусловно, входит составной частью в общую погрешность прогноза, которой обладают алгоритмы диагностики автоматизированного рабочего места.

Линеаризация должна подвергнуться функция трёх переменных вида (3.6).

$$Y(Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), t) = \sqrt{3} \cdot Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3, \quad (3.6)$$

В выражении (3.5) Y_1, Y_2, Y_3 – случайные величины, представляющие собой значения случайных функций $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t)$ в некоторый произвольный момент времени. Сделать переход от выражения (3.5) к выражению (3.6) позволяет сделанное ранее допущение о том, что сигналы $Y_i(t)$ являются стационарными эргодическими случайными процессами, что обеспечивает переход от усреднения по длине реализации к усреднению по ансамблю реализаций.

Линеаризация функции $Y(Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), t)$ в выражении (3.6) может быть проведена путем ее разложения в ряд Тейлора в окрестности точки $M(My_1, My_2, My_3)$, где My_1, My_2, My_3 - математические ожидания случайных величин Y_1, Y_2, Y_3 с сохранением в разложении лишь членов первого порядка. Такое разложение показано в формуле (3.7).

$$\begin{aligned} Y(Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), t) \approx & Y(My_1, My_2, My_3) + Y'_{y_1}(My_1, My_2, My_3) \cdot (Y_1 - My_1) + \\ & + Y'_{y_2}(My_1, My_2, My_3) \cdot (Y_2 - My_2) + Y'_{y_3}(My_1, My_2, My_3) \cdot (Y_3 - My_3), \end{aligned} \quad (3.7)$$

где $Y'_{y_1}(My_1, My_2, My_3) \cdot (Y_1 - My_1)$, - значение первой частной производной функции $Y(Y_1, Y_2, Y_3)$ по переменной Y_i в точке M .

Подставляя в последнее выражение функцию $Y(Y_1, Y_2, Y_3)$ (3.3), получим выражение вида (3.8).

$$Y(Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), t) = \sqrt{3} \cdot My_1 \cdot My_2 \cdot My_3 + \sqrt{3} \cdot My_2 \cdot My_3 (Y_1 - My_1) + \sqrt{3} \cdot My_1 \cdot My_3 (Y_2 - My_2) + \sqrt{3} \cdot My_1 \cdot My_2 (Y_3 - My_3) \quad (3.8)$$

Введем обозначения коэффициентов линеаризации:

$$\begin{aligned} A_0 &= \sqrt{3} \cdot My_1 \cdot My_2 \cdot My_3, \\ A_1 &= \sqrt{3} \cdot My_2 \cdot My_3, \\ A_2 &= \sqrt{3} \cdot My_1 \cdot My_3, A_3 = \sqrt{3} \cdot My_1 \cdot My_2. \end{aligned}$$

Тогда выражение (3.8) преобразуется к виду (3.9).

$$Y(Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), t) \approx A_0 + A_1 Y_1(t) + A_2 Y_2(t) + A_3 Y_3(t), \quad (3.9)$$

Выражение (3.5) представляет собой линеаризованную в окрестности точки M функцию $Y(Y_1, Y_2, Y_3)$, и именно это выражение мы будем использовать в дальнейшем для анализа информационно-измерительной системы.

Таким образом, **мультипликативное** взаимодействие каналов в системе заменено на **аддитивное**. Обобщенная структура линеаризованной информационно-измерительной системы **автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования** представлена на рисунке 3.5.

Из рисунка 3.5 видно, что замена мультипликативного взаимодействия сигналов на аддитивное сопровождается появлением в структуре каждого канала информационно-измерительной системы дополнительного звена, характеризующегося весовой функцией $hl_i(t)$.

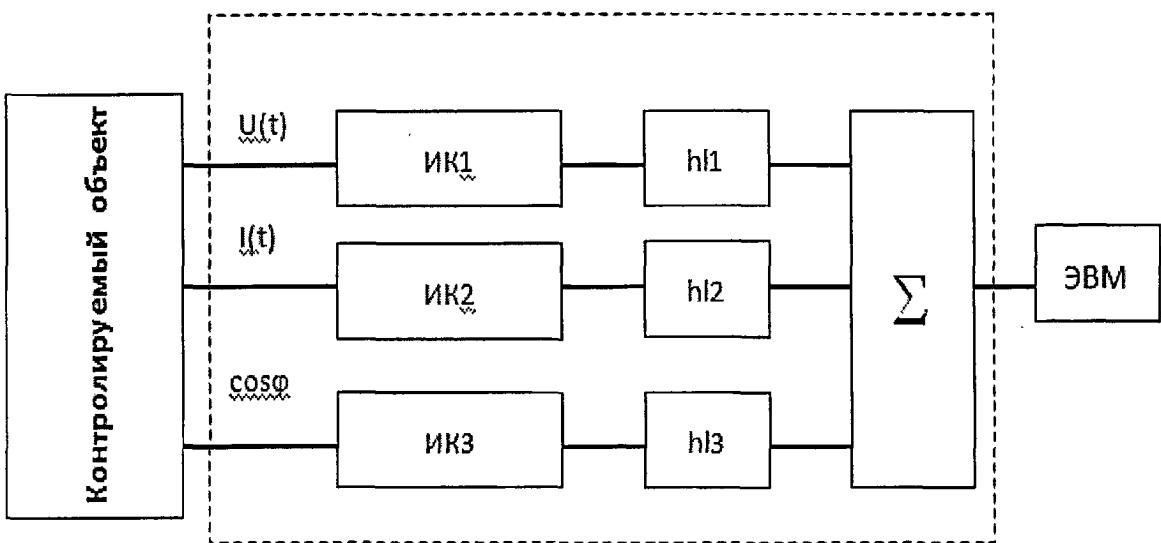


Рисунок 3.5 - Структурная схема линеаризованной информационно измерительной системы с мультипликативным взаимодействием

Эта весовая функция позволяет выразить реакцию $Y(t)$ линейного динамического объекта на некоторое входное воздействие $X(t)$ при помощи интеграла свертки [17]: $Y(t) = \int_{-\infty}^t X(\nu)h(t-\nu)d\nu$.

Как следует из [14], для i -го канала системы весовая функция $hl_i(t)$ дополнительно появляющегося звена определяется выражением

$$hl_i(t) = A_i \delta(t).$$

3.2 Математическая модель ошибок прогноза энергоэффективности

На рисунке 3.6 представлена схема выделения ошибок прогноза автоматизированным рабочим местом. Из рисунка видно, что ошибка равна $E(t) = M\{ Y(t) - Z(t) \}$, где $Y(t)$ – показания эталонной измерительной системы, а $Z(t)$ – показания автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования.

Если записать автокорреляционную функции показаний эталонной измерительной системы как

$$K_Y(\tau) = \int \int h_Y(\nu)h_Y(\mu)K_{XX}(\tau - \mu + \nu)d\nu d\mu, \quad (3.10)$$

где $h_Y(t)$ – это весовая функция эталонного измерительного канала, а $K_{XX}(t)$ – это автокорреляционная функция измеряемого сигнала.

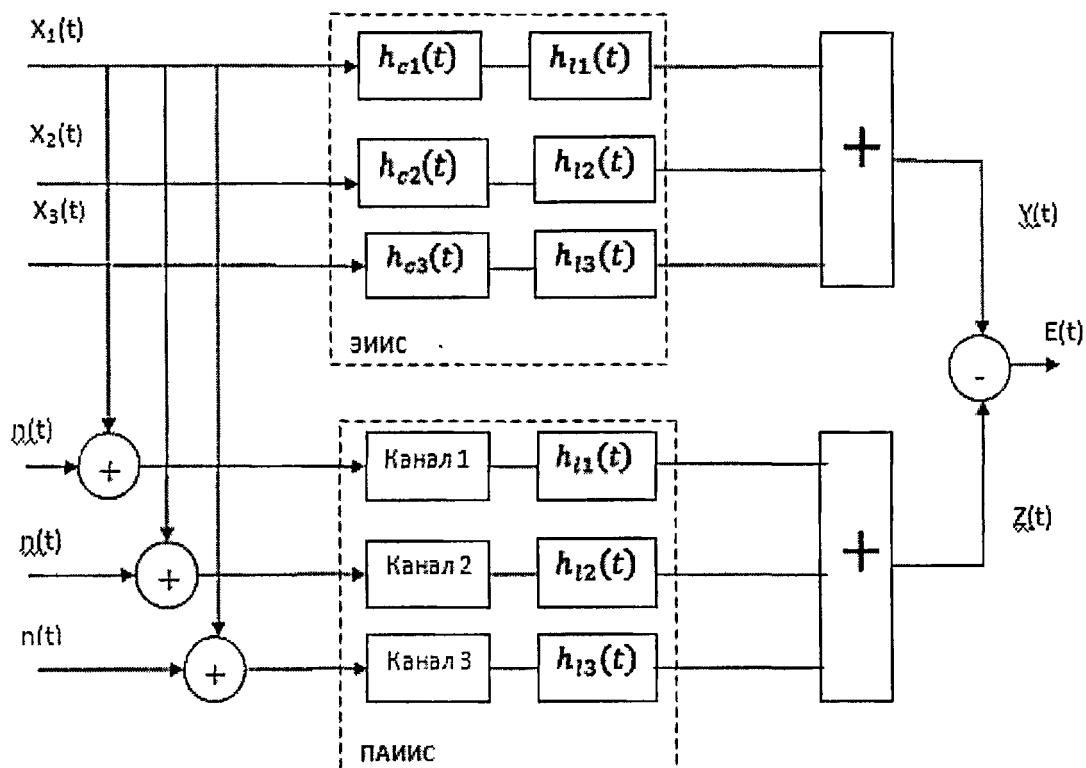


Рисунок 3.6 - Схема выделения ошибок прогноза автоматизированным рабочим местом

Кроме того, если записать автокорреляционную функции показаний автоматизированного рабочего места как

$$K_Z(\tau) = \int \int h_Z(\nu)h_Z(\mu)[K_{XX}(\tau - \mu + \nu) + K_{\Pi}(\tau - \mu + \nu)]d\nu d\mu, \quad (3.11)$$

где $h_Z(t)$ – это весовая функция измерительного канала АРМ, а $K_{\Pi}(t)$ – это автокорреляционная функция помехи наложенной на измеряемый сигнал. То автокорреляционная функция ошибки прогноза запишется как [19]:

$$\begin{aligned}
K_E(\tau) = & \int \int_{v \mu} h_Y(v) h_Y(\mu) K_X(\tau - \mu + v) dv d\mu - \\
& - \int \int_{v \mu} h_Y(v) h_Z(\mu) K_X(\tau - \mu + v) dv d\mu - \\
& - \int \int_{v m} h_Z(v) h_Y(\mu) K_X(\tau - \mu + v) dv d\mu + \\
& + \int \int_{v m} h_Z(v) h_Z(\mu) \cdot [K_X(\tau - \mu + v) + K_\Pi(\tau - \mu + v)] dv d\mu . \quad (3.12)
\end{aligned}$$

Поскольку структура измерительного канала в автоматизированном рабочем месте типовая, то метрологические характеристики автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования имеют следующие модели [19].

Математическое ожидание сигнала, измеренного автоматизированным рабочим местом для диагностики роторного оборудования описывается выражением (3.13):

$$\begin{aligned}
Mz = & \sum_{i=1}^3 Mx_i A_i \sum_{k=-\infty}^{kT_s} \int_{-\infty}^{kT_s} ha_i(kT_s - \tau) d\tau h\omega_i(t - kT_s) = \\
= & \sum_{i=1}^3 Mx_i A_i \sum_{k=-\infty}^{kT_s} \int_{-\infty}^{kT_s} \frac{Kp_i K n_i}{Tp_i} e^{-\frac{kT_s - \tau}{Tp_i}} d\tau \times \\
\times & \frac{T_s}{Kn_i Kp_i T f_i} \left(1 - \frac{T_s}{T f_i}\right)^{E\left[\frac{t-kT_s}{T_s}\right] - E\left[\frac{T c_i}{T_s}\right]} = \sum_{i=1}^3 Mx_i A_i , \quad (3.13)
\end{aligned}$$

Где A_i – коэффициенты линеаризации критерия энергоэффективности, M_x – математическое ожидание измеряемого сигнала; ha_i – весовая функция аналоговой части измерительного канала; T_s – темп обработки информации в измерительной системе; K_p – коэффициент передачи первичного преобразователя; K_n – коэффициент передачи нормирующего преобразователя; T_p – постоянная времени первичного преобразователя; τ, t – реальное время; T_f – постоянная времени фильтра;

T_c – время измерения;

Дисперсии показаний АРМ:

$$D_z = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i^2 T_s}{2Tf_i - T_s} \left(1 - \frac{T_s}{Tf_i}\right)^{-2L\left[\frac{Tc_i}{T_s}\right]} \left[\left(\frac{S_i}{2Tp_i} - \frac{Dx_i \alpha_i Tp_i}{1 - (\alpha_i Tp_i)^2} \right) \frac{Tf_i - e^{-T_s / Tp_i} (Tf_i - T_s)}{Tf_i + e^{-T_s / Tp_i} (Tf_i - T_s)} + \frac{Dx_i}{1 - (\alpha_i Tp_i)^2} \frac{Tf_i - e^{-\alpha_i T_s} (Tf_i - T_s)}{Tf_i + e^{-\alpha_i T_s} (Tf_i - T_s)} \right], \quad (3.14)$$

где A_i коэффициенты линеаризации критерия энергоэффективности,

T_s – темп обработки информации в измерительной системе;

T_p – постоянная времени первичного преобразователя;;

T_f – постоянная времени фильтра;

D_x – дисперсия измеряемого сигнала;

S_i – уровень шума;

α_i – скорость изменения сигнала;

Математическое ожидание сигнала измеренного эталонной измерительной системой, имеет вид (3.15).

$$M_Y(t) = \int_{-\infty}^t A_i \delta(t - T_{ci}) d\nu = \sum_{i=1}^3 Mx_i A_i, \quad (3.15)$$

Где A_i коэффициенты линеаризации критерия энергоэффективности,

t – текущий момент времени;

T_c – время измерения;

Математическое ожидание случайной функции ошибки прогноза (3.16).

$$M_E(t) = M_Z(t) - M_Y(t) = 0, \quad (3.16)$$

Дисперсии показаний эталонной измерительной системы в виде (3.17).

$$D_Y = \sum_{i=1}^3 A_i^2 \int_{-\infty}^{\infty} Kx_i(\vartheta) \delta(\vartheta) d\vartheta = \sum_{i=1}^3 A_i^2 D_{x_i}, \quad (3.17)$$

Где A_i коэффициенты линеаризации критерия энергоэффективности,

K_x – корреляционная функция;

D_x – дисперсия сигнала;

Взаимнокорреляционная функция показаний эталонной измерительной системы и показаний АРМ (3.18).

$$K_{ZY}(t, t) = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i^2 D_{x_i} T_s}{\alpha_i T p_i + 1} \left(1 - \frac{T_s}{T f_i}\right)^{-E\left[\frac{T c_i}{T s}\right]} \times \left[\frac{\frac{2\alpha_i T p_i}{\alpha_i T p_i + 1} \frac{e^{E((t/T_s)T_s - t + T_{c_i})/T_p}}{T_s} - e^{\alpha_i E((t/T_s)T_s - t + T_{c_i})}}{T f_i - e^{-\alpha_i T_s (T f_i - T_s)}} \right], \quad (3.18)$$

Принципиальной особенностью полученного выражения для $K_{zy}(t, t)$ является его зависимость от текущего момента времени t , чего не наблюдалось в выражениях для D_z и D_y . Необходимо отметить, что в качестве аргумента функции $K_{zy}(t, t)$ удобнее использовать не текущее время t , а величину вида (3.19).

$$\tau = t - E(t/T_s), \quad (3.19)$$

которая не обращается в ноль вследствие не кратности (в общем случае) текущего времени t величине периода опроса датчика T_s .

Таким образом, получены выражения для всех слагаемых дисперсии ошибки измерения системы. Прежде чем объединить их в общее выражение, необходимо сделать небольшое уточнение относительно коэффициента A_i который, как уже было показано, появляется вследствие линеаризации операции умножения и отражает функциональную взаимосвязь сигналов в различных каналах при формировании значения технико-экономического параметра. Ранее этот коэффициент был определен следующим в

$$A_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 M_j, \quad (3.20)$$

в приведенном выражении M_j есть математическое ожидание непосредственно перемножаемых сигналов. В исследуемой системе пере-

множаются сигналы на выходах каналов $Z_i(t)$ и $Y_i(t)$. Очевидно, что, имея в качестве исходных параметров при исследовании характеристики сигналов на входе системы $X_j(t)$, необходимо выразить каждый из M_j в виде функции от математического ожидания соответствующего входного сигнала Mx_j , как показано в выражении (3.21).

$$M_j = Mx_j, \quad (3.22)$$

Таким образом дисперсия функции ошибок прогноза в случае некоррелированности измеряемых по различным каналам сигналов и воздействия на них помехи типа «белый шум» описывается следующим выражением вида (3.17).

$$\begin{aligned} D_E(\tau) &= \sum_{i=1}^3 A_i^2 D_{x_i} - 2 \sum_{i=1}^3 \frac{A_i^2 T_s D_{x_i}}{\alpha_i T p_i - 1} \left(1 - \frac{T_s}{T f_i} \right)^{-E \left[\frac{T c_i}{T_s} \right]} \times \\ &\times \left\{ - \frac{e^{-\alpha_i(\tau+T c_i)}}{T f_i - e^{-\alpha_i T_s} (T f_i - T_s)} + \frac{2 \alpha_j T p_i}{\alpha_i T p_i + 1} \frac{e^{-\frac{(\tau+T c_i)}{T p_i}}}{T f_i - e^{-\frac{T_s}{T f_i} (T f_i - T_s)}} \right\} + \\ &+ \sum_{i=1}^3 \frac{A_i^2 \cdot T}{(2 T f_i - T_s)} \left(1 - \frac{T_s}{T f_i} \right)^{-2E \left[\frac{T c_i}{T_s} \right]} \left(\left(\frac{S_i}{2 T p_i} - \frac{2 D x_i \alpha_i T p_i^2}{1 - (\alpha_i T p_i)^2} \right) \frac{T f_j - e^{-\frac{T_s}{T p_j} (T f_i - T_s)}}{T f_j + e^{-\frac{T_s}{T p_j} (T f_i - T_s)}} + \right. \\ &\left. + \frac{2 D x_i T p_j}{1 - (\alpha_i T p_j)^2} \frac{T f_i - e^{-\alpha_i T_s (T f_i - T_s)}}{T f_i + e^{-\alpha_i T_s (T f_i - T_s)}} \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Где A_i – коэффициенты линеаризации критерия энергоэффективности;

T_s – темп обработки информации в измерительной системе;

T_p – период нанесения управляющего воздействия;

τ – реальное время;

T_f – постоянная времени фильтра;

T_c – время измерения;

t – текущий момент времени;

D_x – дисперсия измеряемого сигнала;

3.3 Оптимизация параметров настройки автоматизированного рабочего места

Исследование характера зависимости относительной среднеквадратичной погрешности от составляющих её параметров, а, в особенности, от периода опроса датчиков и постоянных времени цифровых фильтров необходимо для того, чтобы выбрать оптимальные параметры структурно составляющих информационно-измерительной системы.

Анализ полученных математических моделей показал, что не существует оптимального периода опроса датчиков в ИИС, если за оптимальное принимать то значение T_s , при котором погрешность обработки информации минимальна, что показано на рисунках 3.7, 3.8, 3.9. С уменьшением периода опроса уменьшается относительная погрешность обработки информации e , однако, начиная с некоторого значения, изменение T_s не приводит к существенному улучшению метрологических характеристик информационно-измерительной системы. Именно это значение можно принять за оптимальное значение периода опроса датчика T_s , так как, обеспечивая обработку информации с погрешностью, близкой к минимальной, его использование позволяет уменьшить нагрузку на информационную подсистему данной системы.

Можно отметить, что чем более высокочастотной по отношению к измеряемому сигналу является помеха при одних и тех же параметрах цифровых фильтров тем меньше погрешность измерений, что показано на рисунке 3.8. Это объясняется тем, что фильтры при низкочастотной помехе вырезают не все ее гармоники. При этом каждый из каналов системы можно настроить на оптимальную фильтрацию помех, что видно из 3.7, где минимум погрешности достигается при различных значениях постоянной времени цифровых фильтров в различных измерительных каналах [21].

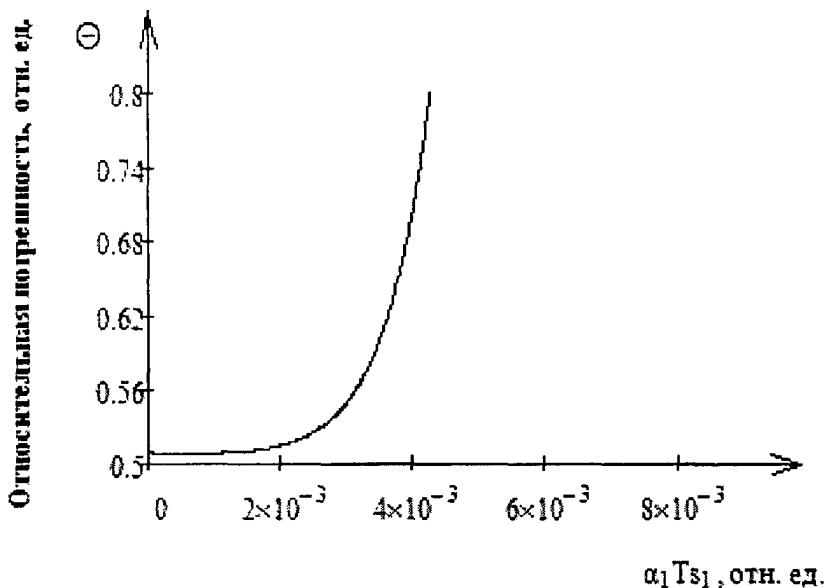


Рисунок 3.7 – График зависимости относительной погрешности обработки информации от периода опроса датчиков для высокочастотных сигналов

Как видно из графика для высокочастотных сигналов (вибрационных) оценка динамических погрешностей не актуальна, так как всё определяет погрешность квантования по уровню, которая относится к классу инструментальных.

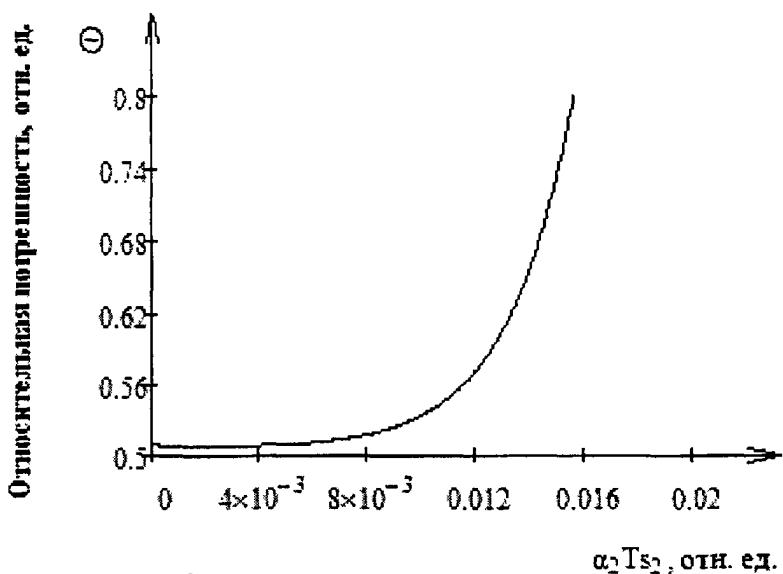


Рисунок 3.8 – График зависимости относительной погрешности обработки информации от периода опроса датчиков для низкочастотных сигналов

Для низкочастотных и среднечастотных сигналов эта проблема актуальна. Это видно из того, что плато равных ошибок сдвигается в область больших значений периода опроса. Это связано с тем, что промышленные контроллеры могут опрашивать датчики с периодом опроса 0.33, 0.66 или 1 секунда.

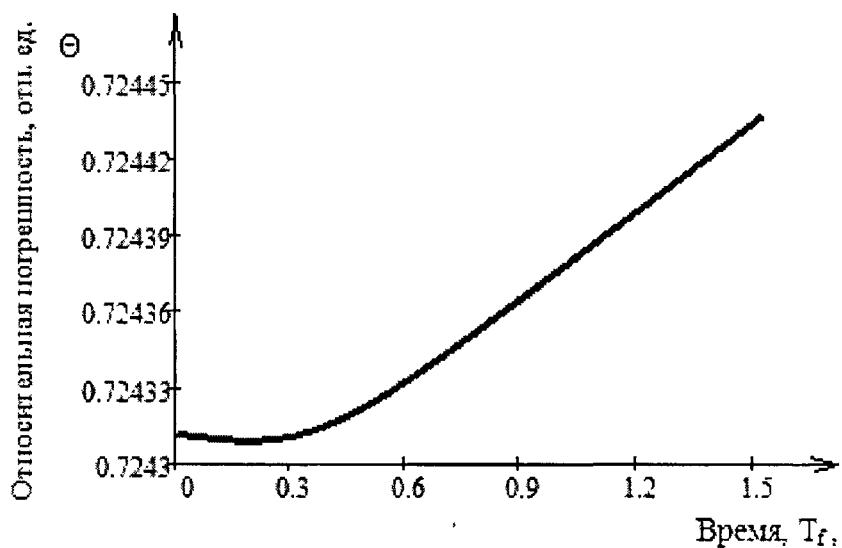


Рисунок 3.9 – Влияние цифровой фильтрации измеряемых сигналов

На рисунке 3.9 показано Влияние цифровой фильтрации измеряемых сигналов на показания АРМ. Из рисунка видно, что существует ярко выраженный минимум, что говорит о наличии оптимальных настроек АРМ.

3.4 Алгоритм диагностики высокочастотного канала обработки информации

Настоящий алгоритм необходим для своевременного определения момента времени зарождения дефекта и определения степени развития дефекта. В процессе эксплуатации в подшипниках развиваются дефекты, вызывающие появление в спектре вибраций дискретных составляющих, частоты которых определяются видом повреждения. Основные частоты вибраций возникают из-за повреждений элементов подшипников качения.

Алгоритм высокочастотной диагностики роторного оборудования по вибрационным параметрам, представлен на рисунке 3.10 и состоит из следующих элементов: блока 1 для ввода параметров конструктивных размеров элементов диагностируемого оборудования, блока 2 измеряется частота вращения вала (оборотная частота) и значения виброускорения; блока 3 для фильтрации измеренные значения виброускорения фильтруются в программном RC фильтре, выделяется полезный сигнал, отфильтровывая помехи типа «белый шум», блока 4 для получения спектра сигнала путем прямого дискретного преобразования Фурье [3, 30]; блоков 5, 6 для выверки составляющих сигнала по частотам с рассчитанными частотами дефектов и принятия решения; 7,8,9 – блоки вывода заключительной информации (блоки формирования отчетных форм).

Алгоритм функционирует следующим образом. В главном окне автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования задаются (выбираются) параметры диагностируемого узла, например для подшипника качения это диаметры наружного и внутреннего колец, диаметр и количество шариков (блок 1). Далее проводится процесс измерения параметров необходимых для проведения расчетов, это частота вращения ротора и виброускорение (блок 2). Полученная измерительная информация фильтруется цифровым фильтром в блоке 3. По анализу формы сигнала высокочастотной вибрации, возбуждаемой ударным импульсом,

определенено, что он весьма непродолжителен во времени (быстро затухает), а важнейшим показателем является отношение пикового значения к среднеквадратичному значению высокочастотной вибрации (величина пикфактора). Это позволяет обнаруживать, с одной стороны, зарождающиеся дефекты смазки, при которых разрывы масляной пленки происходят редко и нерегулярно, а, с другой стороны, механические дефекты подшипника на нестабильных частотах вращения, причем за короткое время, определяемое 2-3 оборотами ротора. В блоке 4 производится получение спектра сигнала (Фурье преобразование).

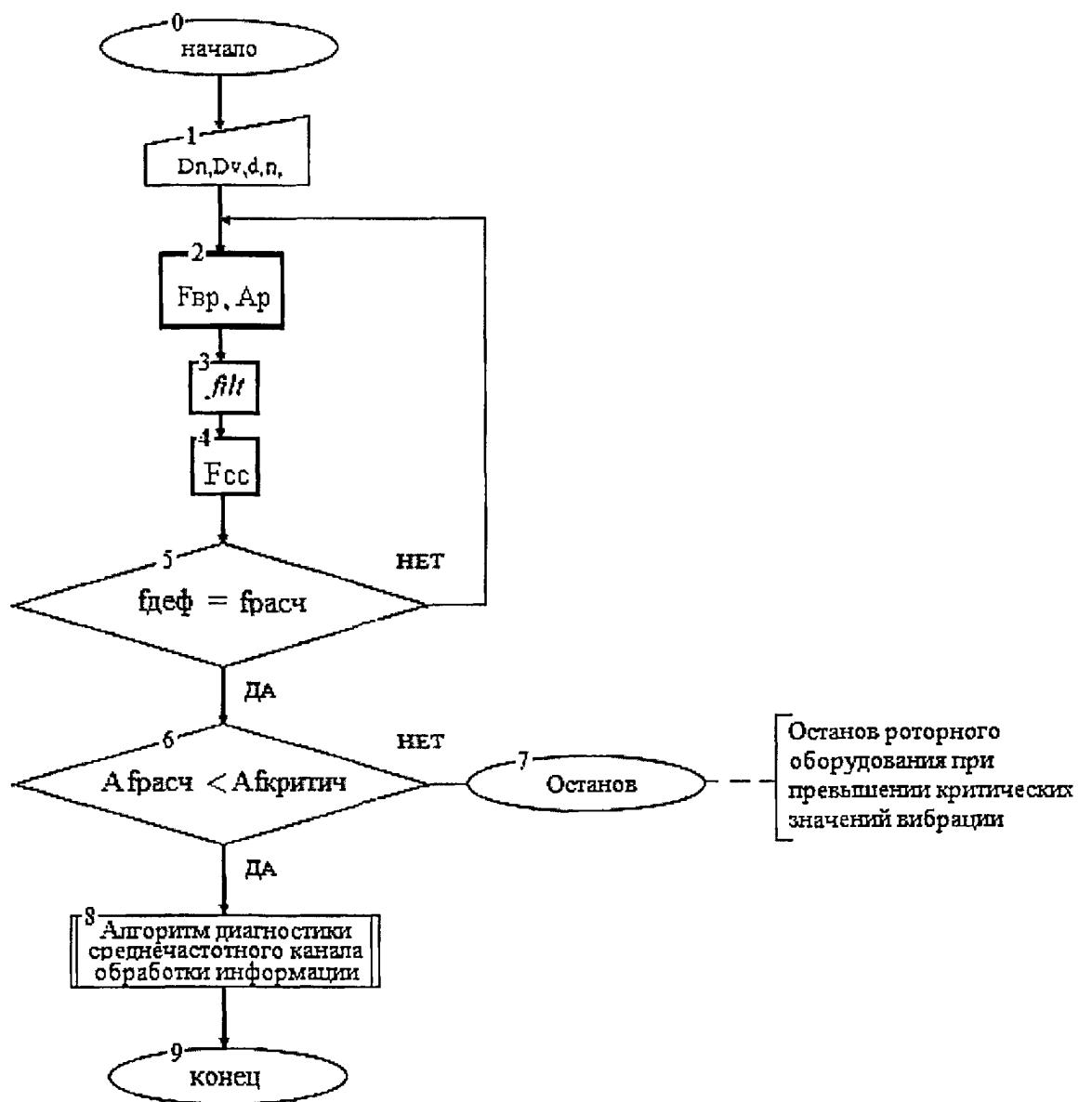


Рисунок 3.10 – Алгоритм диагностики высокочастотного канала обработки информации

В зависимости от конструктивных размеров элементов шарикоподшипника и частоты вращения вала, основные частоты вынужденных колебаний, возникающих при его работе, определяются по известным зависимостям[1-3].

Сравнение расчетных частот с частотами дефектов [45] производится в блоке 5. В случае отсутствия совпадения частот блоком 6 делается вывод об отсутствии дефектов, и алгоритм продолжает работу с блоком 2. В случае совпадения расчетных частот с частотами дефектов производится сравнение их допустимых отклонений и степени развития дефекта в процентном отношении [44]. Оценивается степень влияния данных дефектов на работоспособность всего оборудования в целом (доля - «%» развития дефекта «сильный» или «слабый»). В случае сильного дефекта приводящего к критическим последствиям работы оборудования блоком 7 производится соответствующая сигнализация на экране. Впоследствии производится останов неисправного оборудования для дальнейшего устранения неисправностей во избежание нанесения серьезных поломок оборудования. И наконец, в случае наличия дефектов, не приводящих к критическим последствиям работы оборудования, не требующих немедленного останова оборудования, в блоке 8 производится расчет потерь электрической энергии привносимой выявленными дефектами по алгоритму расчета расхода электроэнергии и потерь электроэнергии

Повышенный износ деталей подшипника особенно тел качения и поверхности колец, приводит к увеличению радиальных зазоров, вызывающих биение и повышение вибрации вала. Данный факт учтен в построении математической модели виброакустического измерительного канала. Поэтому основными показателями для расчета конечно же являются конструктивные особенности подшипника.

Решение этой задачи экспериментальными методами путем внесения неисправностей в те или иные элементы конструкции с последующим проведением экспериментов на работающей машине, требуют больших

временных и финансовых затрат, на которые по тем или иным причинам разработчики не всегда могут пойти.

В последнее время с развитием математических методов анализа роторных систем стало развиваться направление математического моделирования процессов распознавания дефектов в узлах машин. Проверка результатов такого моделирования не возможна без создания интеллектуального измерительного канала обработки акустической информации.

Структура такого измерительного канала в современных информационно-измерительных каналах принимается такой как показано на рисунке [19].

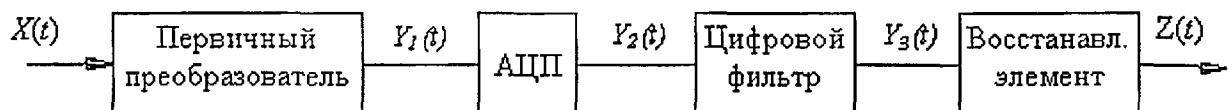


Рисунок 3.11 - структура акустического измерительного канала

На этом рисунке 1 приняты следующие обозначения: $X(t)$ – сигнал на входе измерительного канала, $Z(t)$ – выходной сигнал измерительного канала, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, восстанавливающий элемент (ЦАП).

Измерительный канал функционирует следующим образом. Акустический сигнал от чувствительного элемента (как правило пьезоэлемента), $X(t)$, преобразуется нормирующим первичным преобразователем в сигнал $Y(t)$ и после дискретизации по времени в АЦП поступает на программную фильтрацию. Отфильтрованный акустический сигнал $Y_3(t)$ подается на восстанавливающий элемент (ЦАП), который предназначен для визуализации показаний измерительного канала, $Z(t)$.

Если несколько линейных аналоговых преобразователей соединены между собой последовательно, то весовая функция программно аппаратно измерительного канала равна свертке весовых функций преобразователей:

$$h_n(t) = h_1(t) * h_2(t) * h_3(t) * h_4(t) \quad (3.24)$$

Математические модели эталонного прибора – вибропреобразователя имеют вид: статическая характеристика $Y(t) = A \cdot X(t) + B$, а динамическая характеристика $h_s(t) = A\delta(t)$.

Если принять схему выделения погрешности, такой как в работе [19], а так же предполагая весовую функцию эталонного канала нормированной, а все случайные сигналы стационарными и эргодическими, то модель формирования погрешности в общем виде имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Ke(\tau) = & \int_{v} \int_{m} h_s(v) h_s(\mu) Kx(\tau - \mu + v) dv d\mu + \\
 & \int_{v} \int_{m} h_s(v) h_n(\mu) Kx(\tau - \mu + v) dv d\mu - \\
 & \int_{v} \int_{m} h_n(v) h_s(\mu) Kx(\tau - \mu + v) dv d\mu - \\
 & \int_{v} \int_{m} h_n(v) h_n(\mu) Kx(\tau - \mu + v) dv d\mu
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Обрабатываемый сигнал $X(t)$ является случайной функцией с корреляционной функцией вида:

$$Kx(t) = Gx^2 \cdot e^{-\alpha \cdot t}, \tag{3.26}$$

Таким образом, после преобразований корреляционная функция ошибки (3.25) равна:

$$Ke(\tau) = A^2 \cdot G_x^2 + A^2 \cdot G_x^2 \cdot e^{-\alpha \cdot \tau} - \frac{2 \cdot A^2 \cdot G_x^2}{\alpha \cdot T_s} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot T_s}), \tag{3.27}$$

(без помех) откуда относительная погрешность цифровой обработки равна:

$$\Theta = \frac{Ge^2}{Gx^2} = 2 \cdot A^2 \cdot \left[1 - \frac{1}{\alpha \cdot T_s} (1 - e^{-\alpha \cdot T_s}) \right], \tag{3.28}$$

В случае помехи в виде «белого шума», аддитивно наложенной на входной сигнал, выражение для относительной погрешности обработки информации примет вид:

$$\Theta = \frac{Ge^2}{Gx^2} = 2 \cdot A^2 \cdot \left[1 + \frac{S}{2} - \frac{1}{\alpha \cdot T_s} (1 - e^{-\alpha \cdot T_s}) \right], \quad (3.29)$$

где S – уровень помехи.

В случае корреляционной помехи, наложенной на входной сигнал, выражение (3.29) преобразуется к виду:

$$\Theta = \frac{Ge^2}{Gx^2} = 2 \cdot A^2 \cdot \left[1 + \frac{S}{\alpha \cdot b \cdot T_s} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot b \cdot T_s}) - \frac{1}{\alpha \cdot T_s} (1 - e^{-\alpha \cdot T_s}) \right], \quad (3.30)$$

A - коэффициент передачи измерительного канала.

Для эталонного подшипника была получена реализация шумовых характеристик подшипника качения [76], которая представлена на рисунке 3.12. Эта частотная характеристика отражает вибрационные процессы, которые происходят при вращении ротора подшипника на лабораторной установке. Измерения проводились при частоте вращения вала 750 об/мин. на лабораторной установке с проверкой работоспособности выбранной модели.

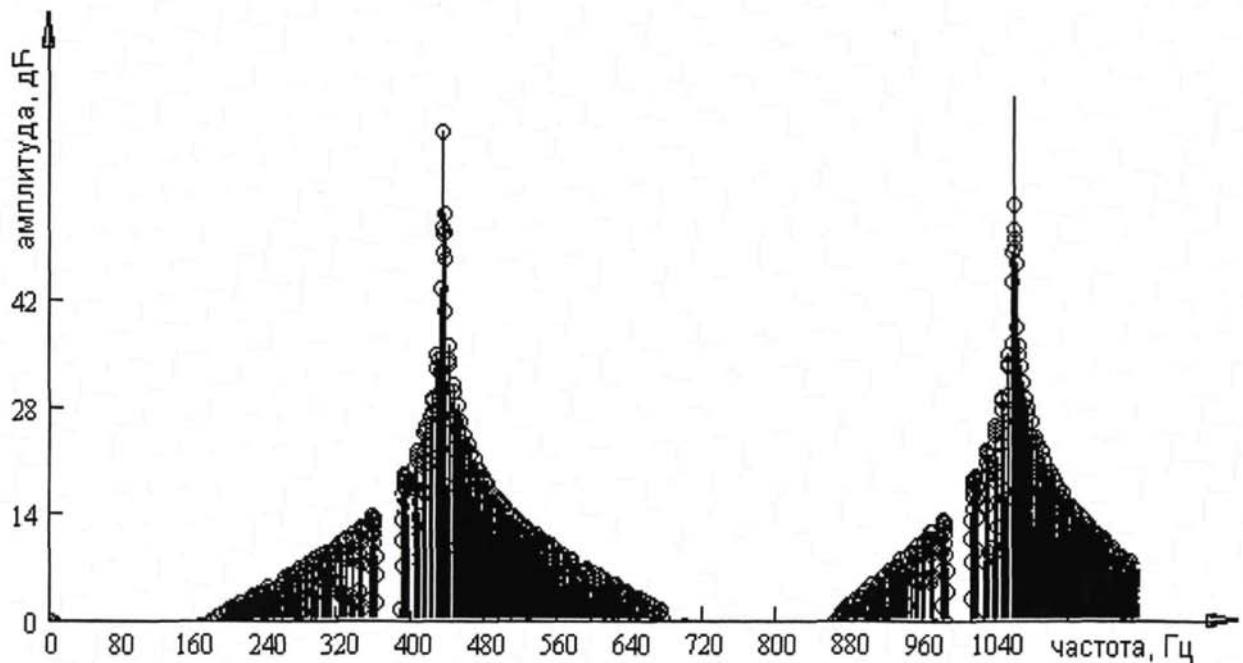


Рисунок 3.12 – Показания эталонного измерительного прибора (виброанализатора)

Однако не все частоты являются информативными и реализация на рисунке 3.12 является перенасыщенной информацией. Некоторые частоты могут быть удалены из рассмотрения без ущерба качеству диагностики. Это можно достичь программно с помощью алгоритмов фильтрации. Один из самых распространенных алгоритмов фильтрации (RC- фильтр). При этом весовая функция цифрового фильтра имеет вид:

$$h_3(t) = \frac{K_3}{T_3} e^{-\frac{|t|}{T_3}} \quad (19)$$

В производственных условиях при установке датчика на станине машины, информационных спектральных составляющих и для диагностики дефектов подшипников по большей части, подходит низкий спектр частот, но этот спектр является зависимым от скорости вращения подшипника.

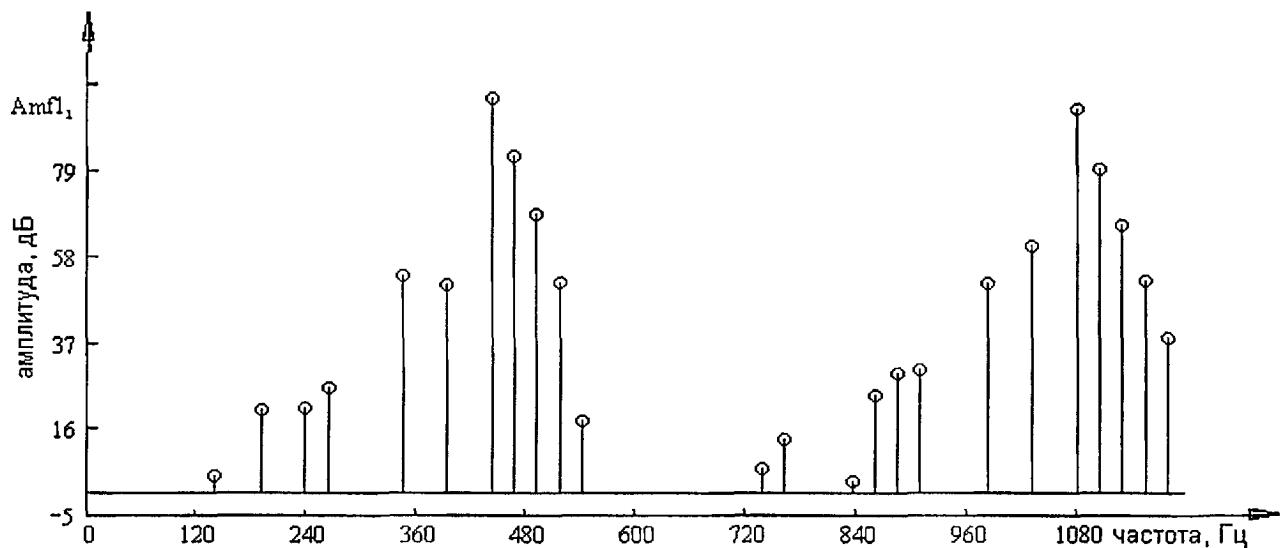


Рисунок 3.13 – Показания программно-аппаратного акустического измерительного канала

Моделирование процесса измерения с цифровым фильтром в структуре канала при следующих данных: $T_\phi = 30$ сек - постоянная времени формирующего сигнала; $\sigma_{3x}^2 = 250$ – дисперсия моделируемого сигнала

показали (см. рис. 3.13), что отфильтрованный сигнал исключает какие - либо другие воздействия и по нему нельзя спутать информативные частоты диагностируемого узла от информативных частот других узлов энергетической установки. По рисунку 3.13 можно сказать, что биение подшипника фактически отсутствует, значит, данная скорость вращения подшипника является оптимальной для его работы. Для определения природы выявленных скачков на рисунке 3.13, необходимо провести вибрационную диагностику для узла вал двигателя - ротор подшипника, так как в наших расчетах учитывается частота вращения вала. И при визуальном анализе рисунка 3.13 можно предположить, что появление достаточно больших пиков может быть вызвано биением вала при заданных оборотах. Таким образом, можно сделать вывод, что на рисунке 3.13 очевидны периодические высокие пики, которые соответствуют по фигурности пикам на рисунке 3.12. Поэтому мы можем предположить, что отфильтрованные сигналы с высокими пиками по природе образования относятся к биению кинематической пары вал-подшипник. Анализ математической модели относительной погрешности обработки информации показал, что погрешность обработки информации зависит только от частоты дискретизации информации и настроенных коэффициентов измерительного канала. Строим график частотной характеристики сигнала.

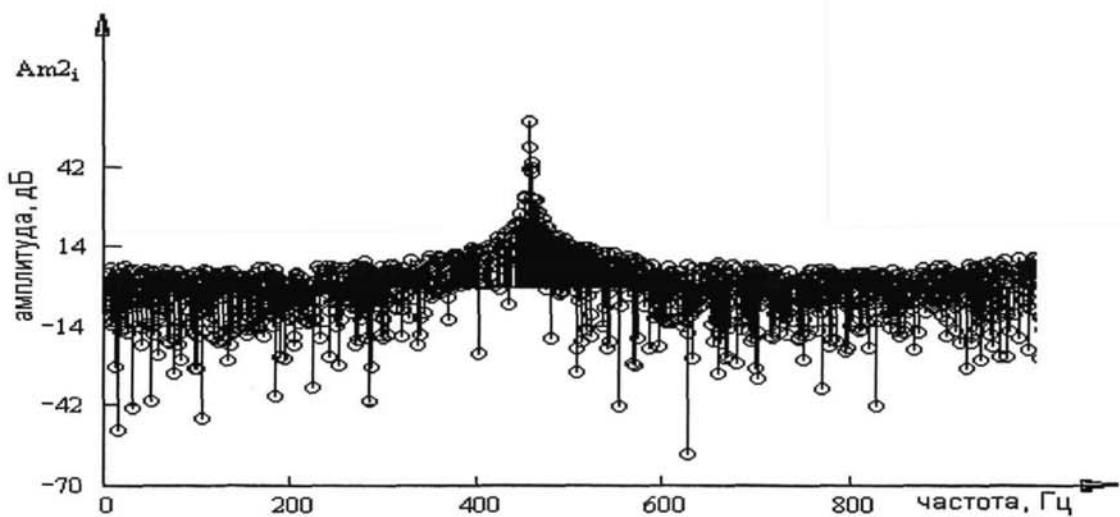


Рисунок 3.14 - Частотная характеристика виброакустического сигнала

В отличие от результата, полученного для идеального подшипника на графике 3.14 видно наложение помехи, то есть смоделированного некоторого дефекта. Пропустим сигнал виброускорения через фильтр.

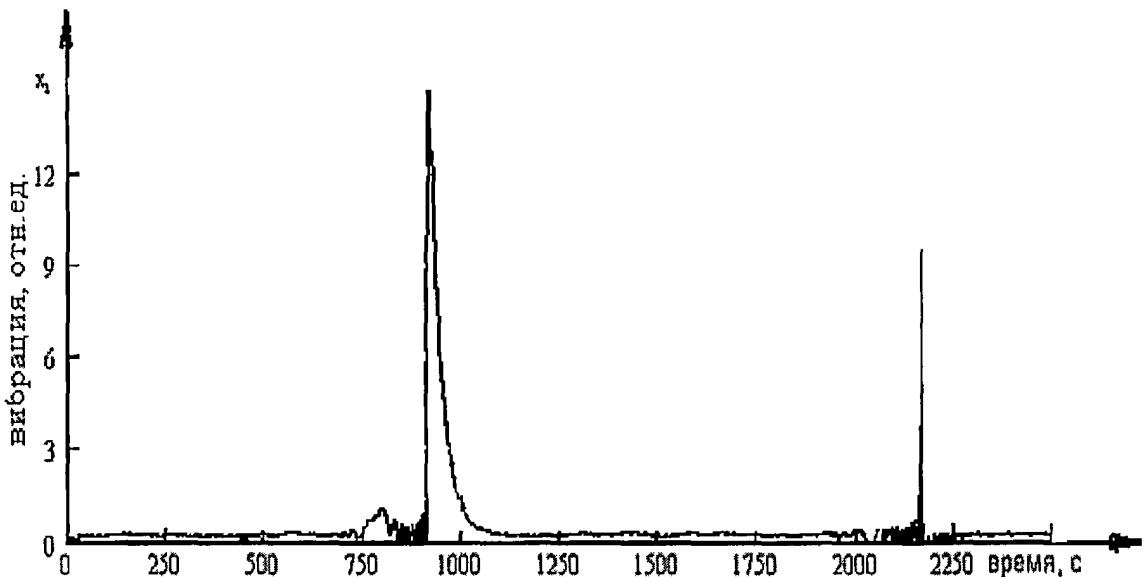


Рисунок 3.15 – Показания программно-аппаратного канала с оптимальным фильтром.

Данный рисунок 3.15 приводит к выводу, что разница в погрешности реального канала и канала полученного в результате оптимизации не превышает 10%, что позволяет говорить об адекватности полученной модели погрешности вибрационного канала и выйти на методику текущей диагностики по алгоритму [76]:

Шаг 1: С помощью программно-аппаратного измерительного канала снимается текущая реализация работы подшипника.

Шаг 2: Из базы знаний достаётся эталонная реализация, полученная при оптимальных настройках измерительной системы.

Шаг 3: Определяется степень отклонения экспериментальной кривой от эталонной.

Шаг 4: Сравнение результата измерения с нормативными документами.

Шаг 5: Принятие решения: сигнал совпал с заданной погрешностью значит дефекта нет и можно прослушивать следующий подшипник (возврат

на шаг 1); если не совпал, то управление передается ЭВМ (например ноутбук) на шаг 6.

Шаг 6: С помощью базы знаний, в которой хранятся априорно известные дефекты подшипников определяется дефект, и делаются определённые оргвыводы.

Таким образом, модель формирования динамической методической погрешности вибраакустического измерительного канала позволяет находить оптимальные настройки существующего измерительного канала. Она так же позволяет выйти на создание интеллектуального измерительного канала-датчика, что позволит использовать вибраакустический чувствительный элемент как датчик информации о состоянии оборудования в реальном масштабе времени, то есть в составе АСУ ТП. Для таких датчиков, алгоритмы диагностики придется разделять. При этом только шаг 1 должен использовать интеллектуальный датчик, который должен работать непрерывно и снимать текущие реализации и передавать эти реализации на второй уровень АСУ, где работает большая ЭВМ, в которой находится база знаний с типовыми дефектами. Только обработка в реальном масштабе времени позволит сделать диагностику эффективной и обнаруживать дефекты на самых ранних стадиях их зарождения.

Использование данного метода при диагностике подшипниковых узлов оборудования, является достаточно информативным, повышает точность и скорость определения скрытых дефектов, что в свою очередь позволит сократить время на определение неполадок и сократит время простоя оборудования [76].

3.5 Алгоритм диагностики среднечастотного канала обработки информации

Настоящий алгоритм необходим при работе АРМ для расчета расхода электроэнергии и потерь электроэнергии, для своевременного определения

момента времени роста технических потерь электрической энергии зависящих от появившегося дефекта и как следствие возрастание расхода электрической энергии. Алгоритм среднечастотной диагностики изображенный на рисунке 3.16 состоит из следующих основных элементов: блока 1 – ввода технических данных диагностируемого оборудования (номинальные параметры оборудования, ток, напряжение, мощность); блока 2 – измерения параметров электрической энергии (напряжения, тока, $\cos\phi$); блока 3 – реализующего расчет потребляемой активной мощности; блока 4 – реализующего поиск дефектов по высокочастотному алгоритму диагностики; 5,6,7 – блоков реализации расчета критерия энергоэффективности и блока адаптации настроек коэффициентов; 8 – блок формирования отчетных форм.

Алгоритм расчета расхода электроэнергии и потерь электроэнергии, работает следующим образом: в блоке 1 вводятся параметры диагностируемого роторного оборудования, например для асинхронного двигателя таковыми являются тип двигателя, номинальная мощность, число фаз, номинальное напряжение, КПД). Блоком 2 измеряется потребляемый ток, напряжение сети, коэффициент мощности. В АРМ появляется тренд соответствующего вида. В блоке 3 производится расчет активной мощности потребляемой диагностируемым оборудованием по формуле 2.5; В блоках 5-7 реализуется расчет критерия энергоэффективности. В блоке 8 – происходит формирования отчетных форм при оптимальном расходе электрической энергии и отсутствии дефектов. В блоке 4 (в зависимости от наличия дефекта определенного по алгоритму описанному в главе 3.4 рассчитывается потери электроэнергии, зависящие от выявленного дефекта по формуле критерия эффективности 2.1. При отсутствии дефекта следует заключение об оптимальном расходе электрической энергии.

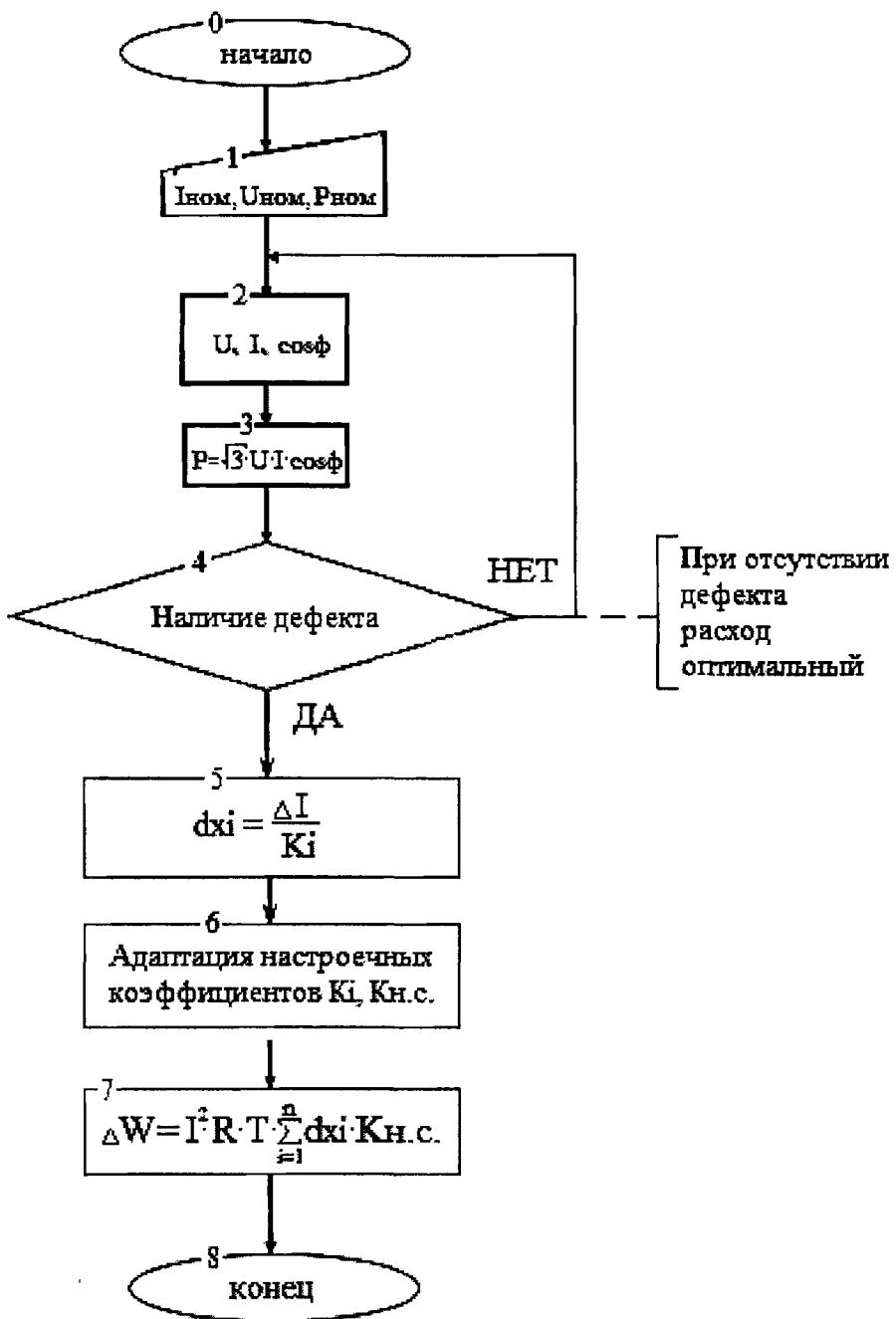


Рисунок 3.16 – Алгоритм диагностики среднечастотного канала обработки информации

3.6 Алгоритм диагностики низкочастотного канала обработки информации

Настоящий алгоритм необходим при работе информационно-измерительной системы для учета влияние температуры нагрева

оборудования на значение активного сопротивления проводников при проведении расчетов технических потерь электрической энергии. Кроме того существует вероятность пропуска дефекта по алгоритму № 1, в данном случае при повышении температуры выше предельно допустимой производится немедленное отключение роторного оборудования во избежание поломки или возгорания. Превышение температуры выше порогового значения также сигнализируется в диалоговом окне АРМ.

Алгоритм низкочастотной диагностики представленный на рисунке 3.17 состоит из следующих основных элементов: блока 1 – расчета критерия эффективности по алгоритму диагностики среднечастотного канала обработки информации; блока 2 – сравнения измеренной температуры с

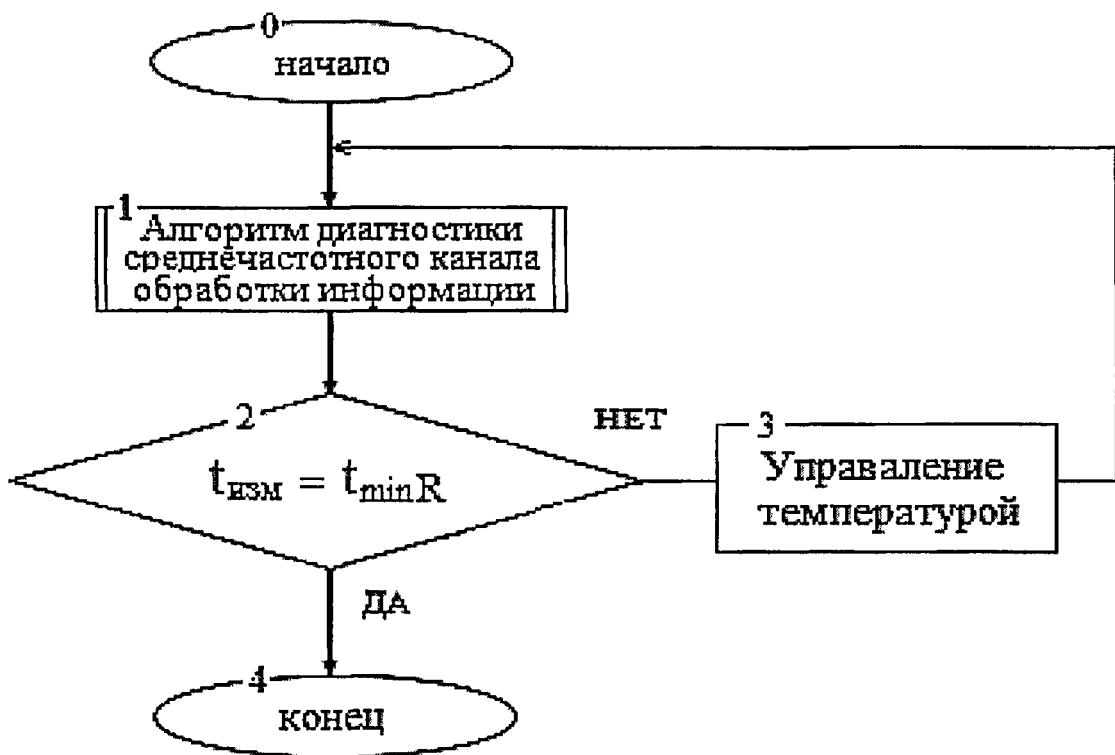


Рисунок 3.17 – Алгоритм диагностики низкочастотного канала обработки информации

температурой минимальных значений сопротивления проводников (обмотки электромагнитной системы); блока 3 – управления температурой; блока 4 – формирования отчетных форм.

Алгоритм диагностики низкочастотных каналов обработки

информации, работает следующим образом: на начальном этапе производится расчет расхода и потерь электрической энергии по среднечастотному алгоритму. На втором этапе измеренная температура контактной поверхности роторного оборудования используется для корректировки значения активного сопротивления проводника используемого при расчете потерь электрической энергии. При не соответствии измеренной температуры минимальному значению активного сопротивления проводника, реализуются поиск дефекта по алгоритму высокочастотной диагностики а так же мероприятия по изменению температуры до оптимального значения для заданного типа оборудования. При соответствии измеренной температуры минимальному значению активного сопротивления проводника следует заключение об оптимальном расходе электрической энергии.

3.7 Выводы и обсуждение результатов

В настоящей главе определена структура АРМ (см. рисунок 3.1). Синтезированы алгоритмы диагностики эффективности работы автоматизированного рабочего места: алгоритм высокочастотной диагностики роторного оборудования по вибрационным параметрам; алгоритм среднечастотной диагностики по расчету расхода электроэнергии и потерь электроэнергии; алгоритм низкочастотной диагностики по контролю по температуре.

Появляющиеся дефекты и неисправности, а так же износ и старение оборудования, вызывающие появление дополнительных потерь энергии, выявляются системой при сравнении с данными, полученными математическим моделированием, и делается вывод о необходимости принятия мер по их устранению. Например, путем вывода оборудования в ремонт, переключения на резервный источник питания либо резервное оборудование

Получены модели погрешности прогноза АРМ которые описываются формулами 3.13, 3.23.

Важной особенностью полученного выражения для методической погрешности прогноза является ее зависимость от времени, а точнее от момента времени τ в промежутке между опросами датчика, для которого получено значение технико-экономического показателя. На погрешность обработки информации в системе существенно влияют динамические свойства объекта управления, погрешность тем больше, чем больше временное рассогласование сигналов, измеряемых в разных точках объекта управления. Следовательно, функция ошибок обработки информации в системе является нестационарной по корреляционной функции.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Программное обеспечение АРМ состоит из: пакета прикладных программ настройки модулей стенда и пакета прикладных программ по мониторингу дрейфа расхода потребляемой электроэнергии и прогнозу потерь электрической энергии. Данные программные модули установлены на ЭВМ общего назначения. Для отображения данных в реальном масштабе времени в интегрированной среде разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами отечественного производства Trace Mode-6 создано диалоговое окно оператора проводящего диагностику, показанное на рисунке 4.1. На экране отображаются значения параметров электрической сети, такие как: напряжение, В; сила тока, А; коэффициент мощности; активная мощность, кВт; реактивная мощность, кВАр, температура и виброускорение.

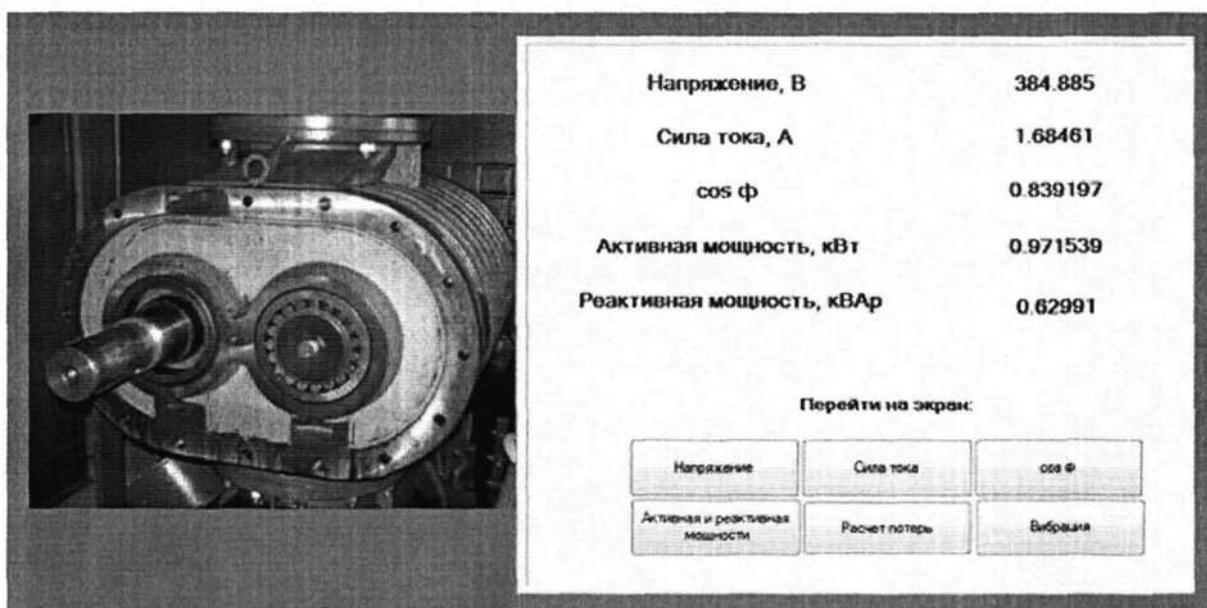


Рисунок 4.1 – Главное окно автоматизированного рабочего места оператора

По нажатию на кнопки возможен просмотр графиков изменения во времени всех электрических параметров, значения вибрации и переходить на окно «Расчет потерь». Моделирование сигналов в среде программной среде

Trace Mode-6 может осуществляться на одном из встроенных языков программирования стандарта МЭК 6-1131/3. Среди них: ST, SFC, FBD, LD и IL. При разработке настоящей системы использован язык функциональных блоков FBD. Создав шаблон программы, и выбрав соответствующий язык программирования из предложенного списка, моделируем сигнал. С помощью блока RND создаем помеху, далее умножаем ее на значение дисперсии для напряжения и прибавляем значение математического ожидания.

4.1 Алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт

Настоящий алгоритм необходим при работе АРМ при расчете расхода электроэнергии и потерь электроэнергии, для своевременного определения момента времени роста технических потерь электрической энергии зависящих от появившегося дефекта и как следствие возрастание затрат на оплату дополнительных потерь электрической энергии зависящих от дефектов. Алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт, изображенный на рисунке 4.2 состоит из следующих элементов: блока 2 реализующего расчет критерия эффективности 2.1 по среднечастотному алгоритму диагностирования, блока 3 в котором реализуется расчет стоимости повышенных потерь зависящих от дефекта; блока 4 – сравнения стоимости оплаты повышенных потерь (cW) с разницей между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (Δc); блоков 5, 6 - формирования отчетных форм.

Алгоритм функционирует следующим образом. В главном окне автоматизированного рабочего места по диагностике роторного оборудования имеется кнопка «расчет потерь», по нажатии на которую открывается диалоговое окно – экран реализующий алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт. Блоком 2 производится расчет критерия эффективности по уравнению 2.1, определяется стоимость оплаты

повышенных потерь электрической энергии. В блоке 4 производится сравнение стоимости оплаты повышенных потерь (cW) с разницей между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (Δc). В случае превышения стоимости оплаты повышенных потерь стоимости ремонтных работ на устранение неисправности блоком 6 реализуется сигнал и рекомендация оператору на останов оборудования для устранения выявленных дефектов. В обратном случае блоком 5 производится расчет времени оптимальной эксплуатации ротрного оборудования с учетом степени развития имеющихся дефектов.

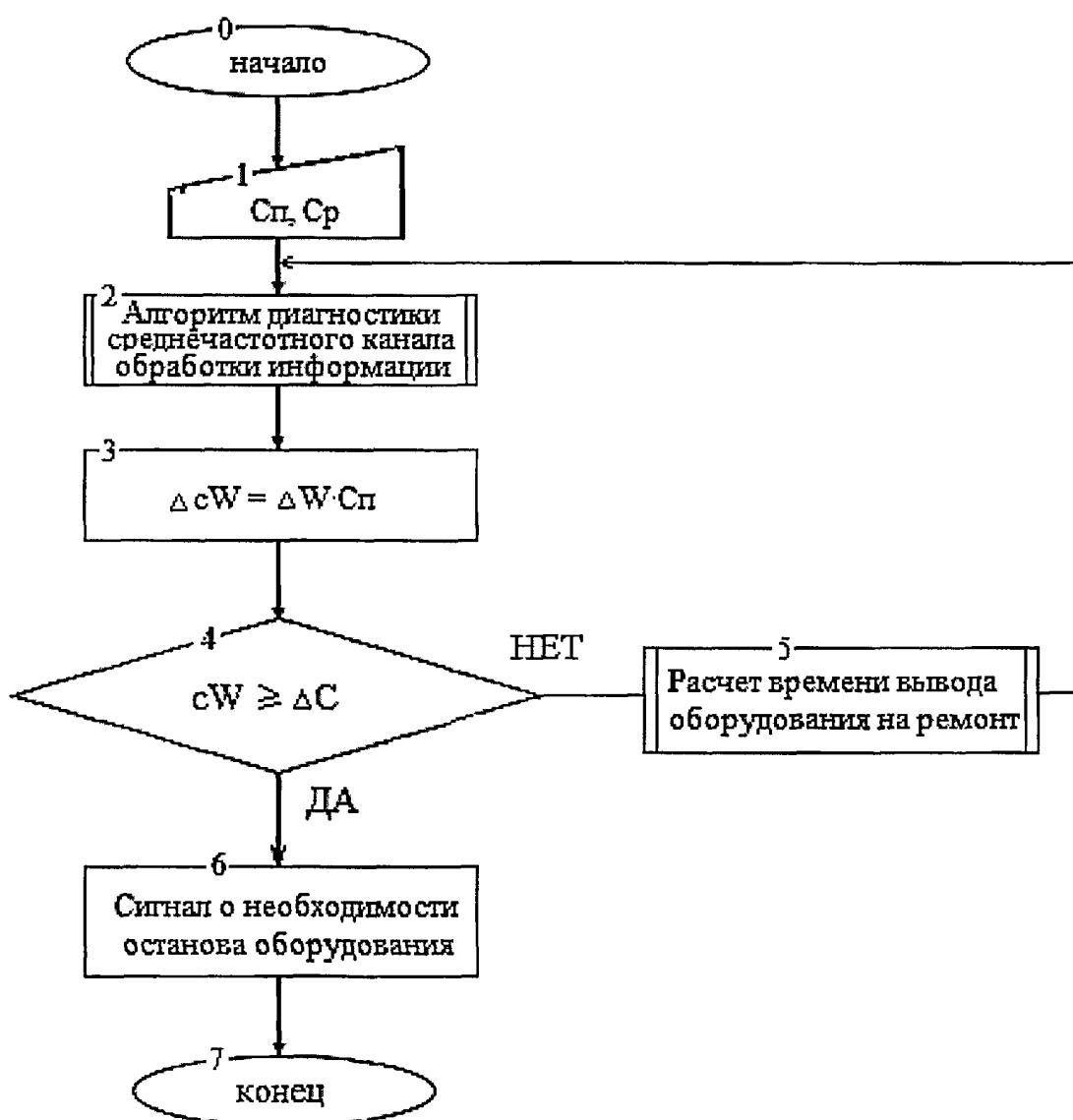


Рисунок 4.2 – Алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт

4.2 Исследование алгоритма прогноза времени вывода оборудования на ремонт

По уравнению (2.1) рассчитываем потери электроэнергии при наличии дефекта в подшипнике и при его отсутствии. Расходы электроэнергии за 10 суток работы роторного оборудования изображены на рисунках 4.3 и 4.4:

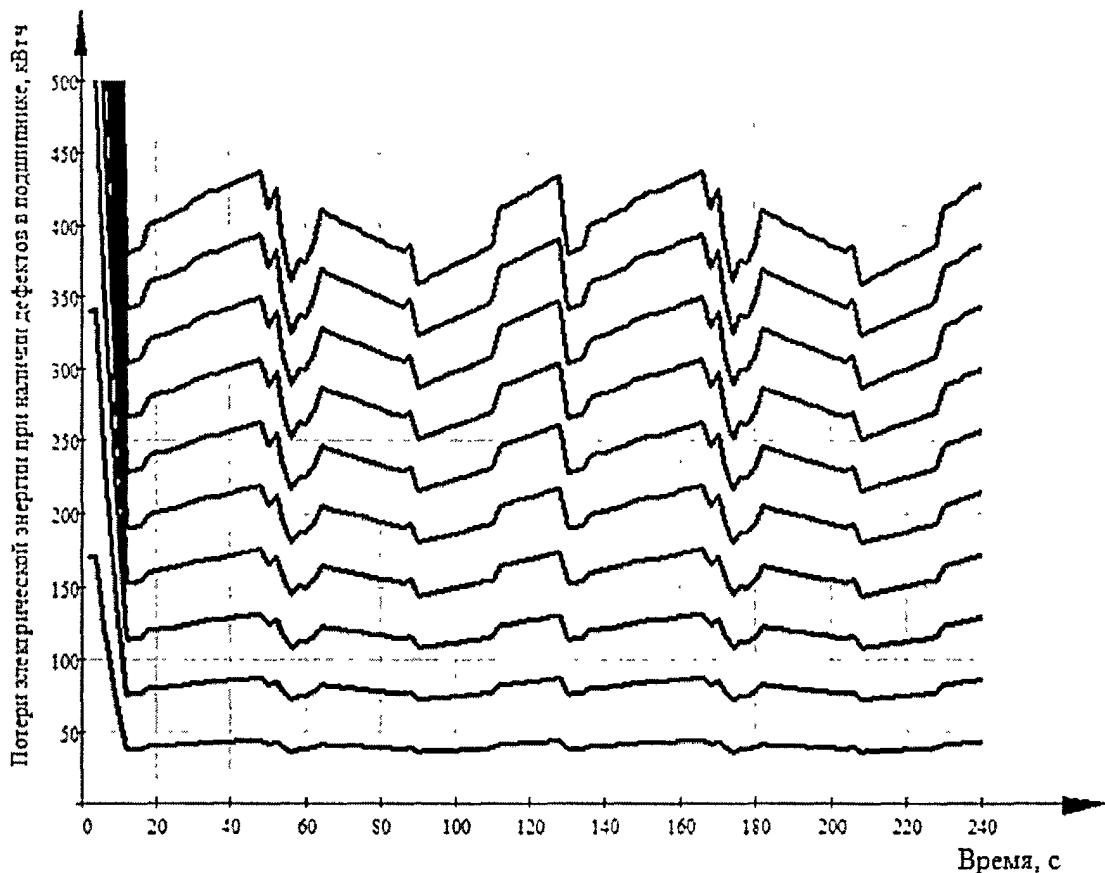


Рисунок 4.3 – Потери электрической энергии при наличии дефектов тел качения в подшипнике

Нижняя кривая рисунка 4.3 соответствует величине потерь электроэнергии за первые сутки, верхняя кривая – величине потерь на десятые сутки соответственно. За первые сутки величина развивающихся дефектов не велика и составляет порядка 50 кВт·ч. На вторые сутки потери возрастают пропорционально степени развития дефекта и составляют порядка 100 кВт·ч. Далее кривые в последующие сутки приобретают более явные пики и минимумы, что связано с неоднозначным проявлением

влияния имеющихся дефектов на изменение потерь электрической энергии. Минимальные значения связаны с некоторой прокаткой возникающих дефектов, а затем максимумы с более активным их развитием.

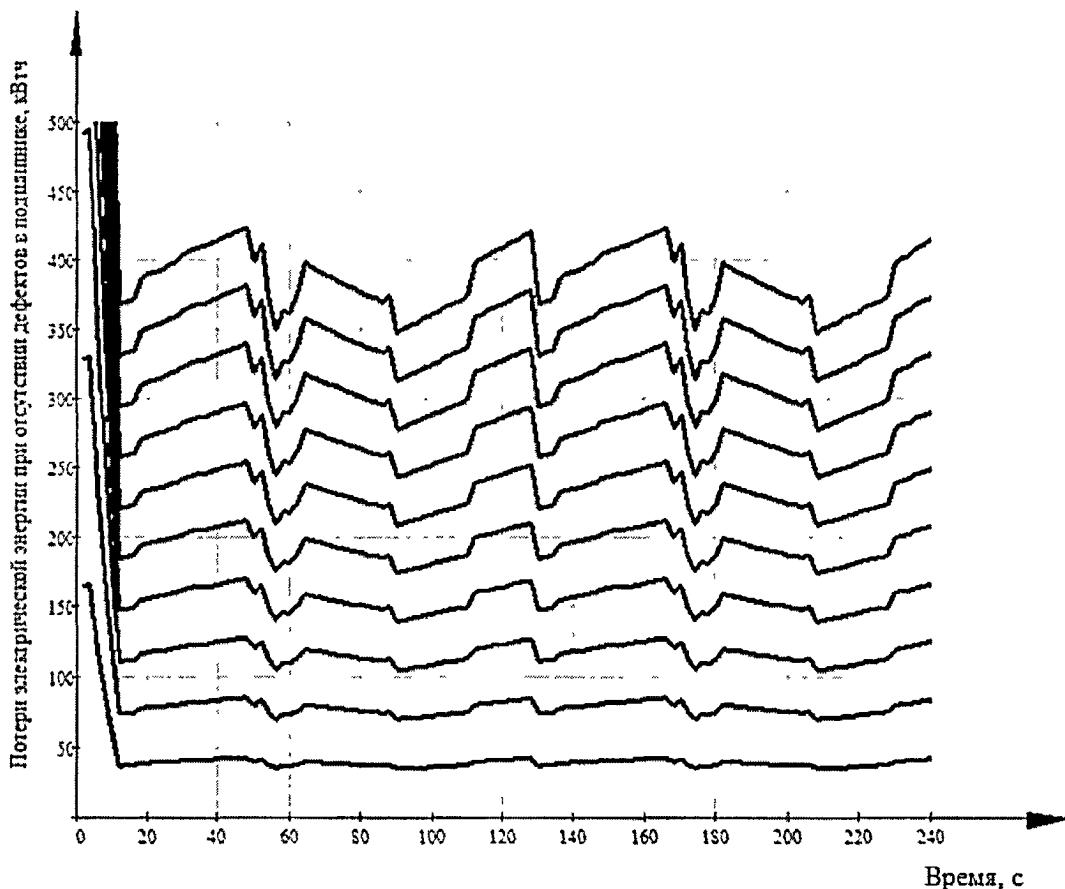


Рисунок 4.4 – Потери электрической энергии при отсутствии дефектов в подшипнике

Из анализа данного рисунка так же следует неоднозначное проявление значений потерь электрической энергии, зависящее как от режимов работы оборудования, так и от влияния на величину потерь параметров окружающей среды, в частности температуры нагрева оборудования и как следствие изменение активного сопротивления проводников.

Из рисунков 4.3 и 4.4 следует, что величина потерь электрической энергии при наличии дефектов тел качения в подшипнике изменяются друг от друга, в течении реального времени, примерно на десять процентов.

Затраты на эксплуатацию роторного оборудования контролируются и определяется оптимальное время для проведения ремонтных работ по

графику, изображенному на рисунке 4.5. Все расчеты представлены в приложении Г. Визуализация работы синтезированных алгоритмов диагностики и прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт представлена на рисунке 4.5.

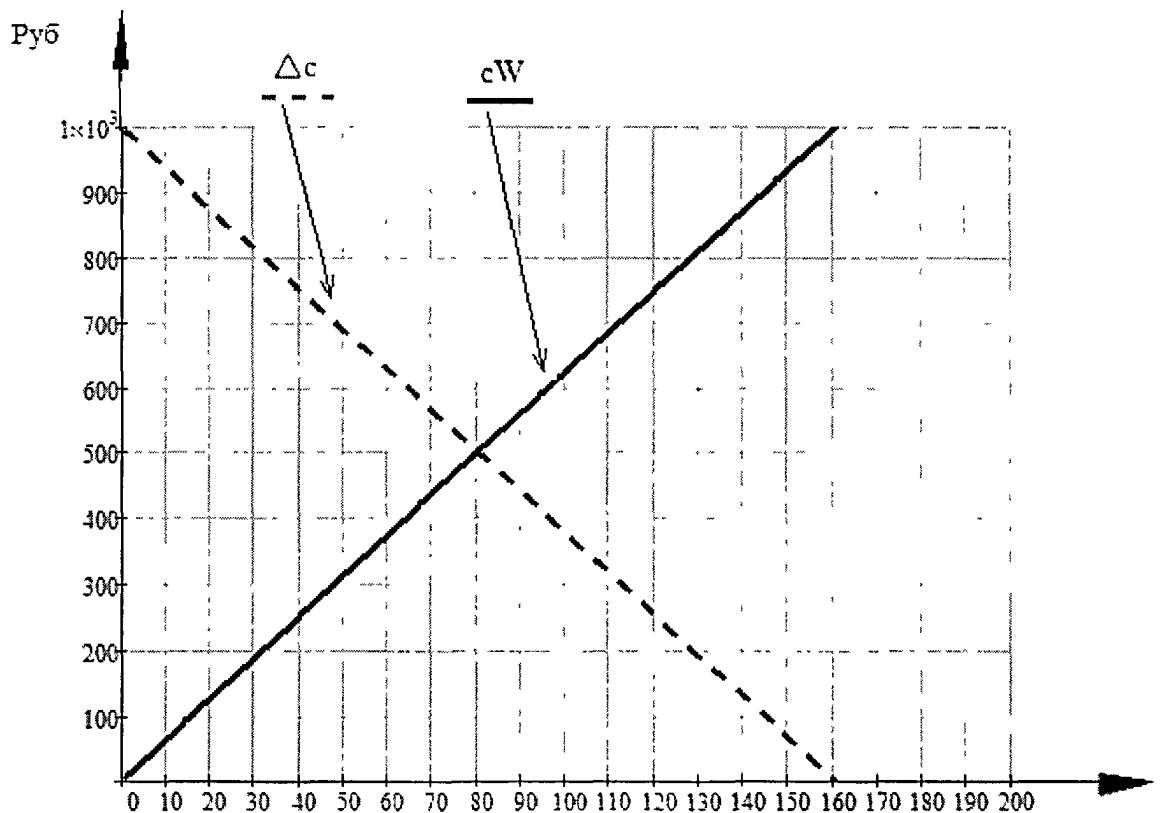


Рисунок 4.5 – Прогноз времени вывода оборудования на ремонт при наличии в подшипнике дефектов тел качения и сепаратора

На рисунке 4.5 cW – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; Δc – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.

Из анализа рисунка 4.5 следует, что оптимальным временем вывода оборудования на ремонт для устранения в подшипнике дефектов тел качения и сепаратора при диагностируемой степени развития дефекта является 80 суток.

Стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, вычисляется по формуле (4.1):

$$cW = (\Delta W - \Delta W_0) \cdot c, \quad (4.1)$$

где ΔW – потери электрической энергии при наличии дефектов в подшипнике, кВтч;

ΔW_0 – потери электрической энергии при отсутствии дефектов в подшипнике, кВтч;

c – стоимость электроэнергии за 1кВтч, руб.

Разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии вычисляется по формуле (4.2):

$$\Delta C = cR - cW, \quad (4.2)$$

где cR – стоимость ремонтных работ по устранению дефекта.

Определяется оптимальная дата проведения замены дефектного узла в зависимости от соблюдения условия наименьших затрат предприятия на вывод оборудования в ремонт либо оплаты, некоторое объективное время, повышенного расхода электрической энергии, суммарно не превышающего затраты на ремонтные работы. Появляющиеся дефекты и неисправности, а также износ и старение оборудования, вызывающие появление дополнительных потерь энергии, выявляются системой при сравнении с данными, полученными математическим моделированием.

Произведем сравнительный анализ, данных по прогнозу времени вывода роторного оборудования на ремонт, полученных в среде Mathcad и в среде Trace mode. Для этого будем сравнивать графики зависимости стоимости оплаты повышенных потерь электрической энергии, от разницы между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии, полученных при разных значениях коэффициента определяющей долю потерь электроэнергии.

При дефекте смазки в подшипнике качения доля потерь электроэнергии составляет 10%. График соответствующий этому дефекту представлен на рисунке 4.6.

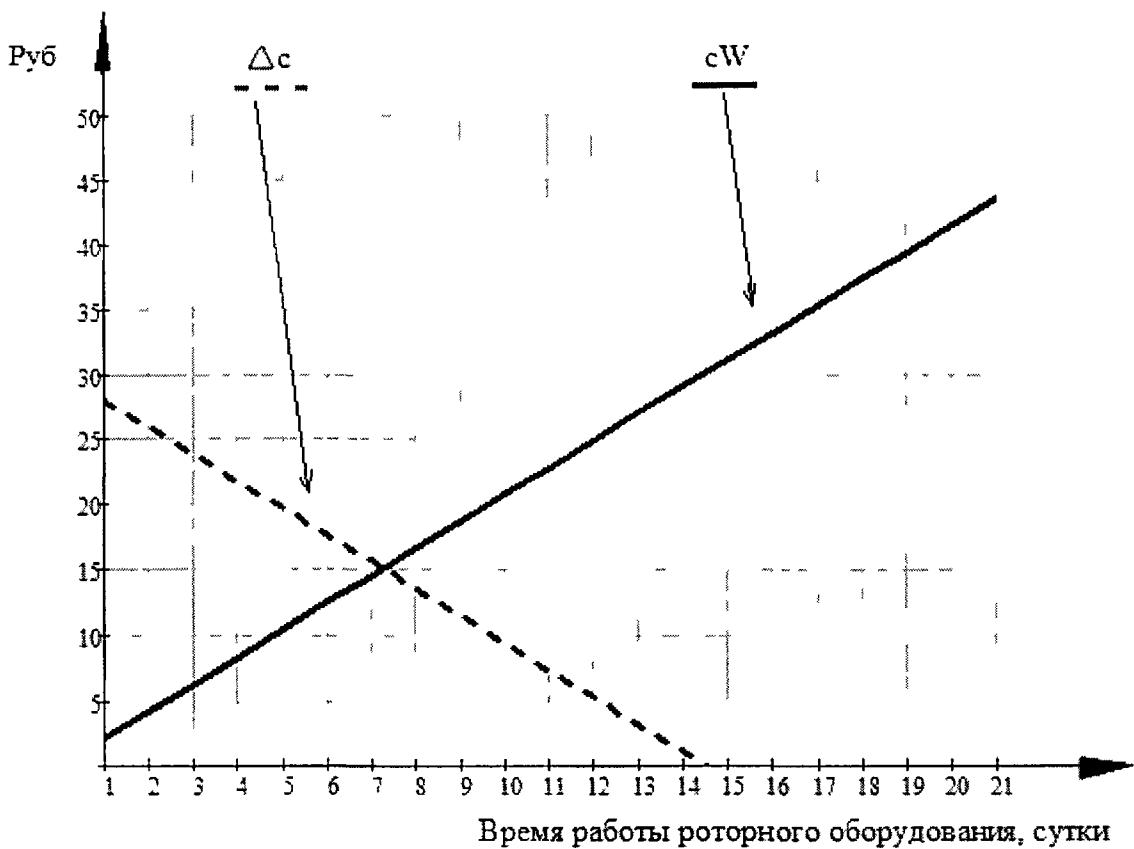


Рисунок 4.6 – Прогноз времени вывода роторного оборудования на ремонт при дефектах смазки

На рисунке 4.21 cW – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; Δc – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.

Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что оптимальным временем проведения работ по устранению дефекта подшипника качения является 7 суток работы роторного оборудования с момента возникновения дефекта.

График соответствующий дефектам смазки при времени работы роторного оборудования равному 7 суткам, получен в среде Trace mode и изображен на рисунке 4.7.

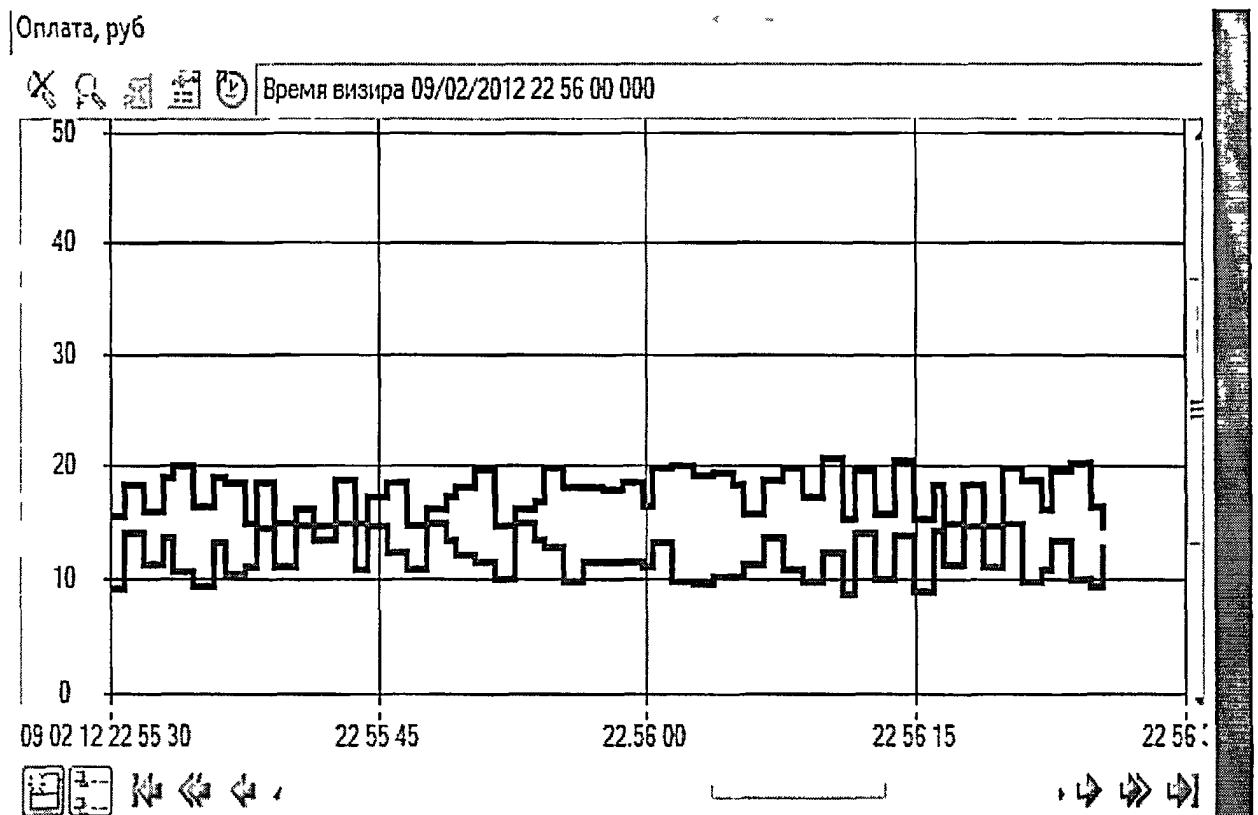


Рисунок 4.7 – Визуализация процесса прогноза эффективности при дефектах смазки

На рисунке 4.7 верхняя кривая соответствует стоимости оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; Нижняя кривая соответствует разнице между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб. По полученному графику видно, что кривые соответствующие стоимости оплаты повышенных потерь электрической энергии и разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии, приближаются, а в некоторых точках пересекаются, следовательно, расчет в среде Mathcad произведен верно, и оптимальным временем для устранения дефекта смазки подшипника является 7 суток с момента возникновения данного дефекта.

При возникновении раковин и сколов на телах качения в подшипнике доля потерь электроэнергии составляет 20%. График соответствующий этому дефекту представлен на рисунке 4.8.

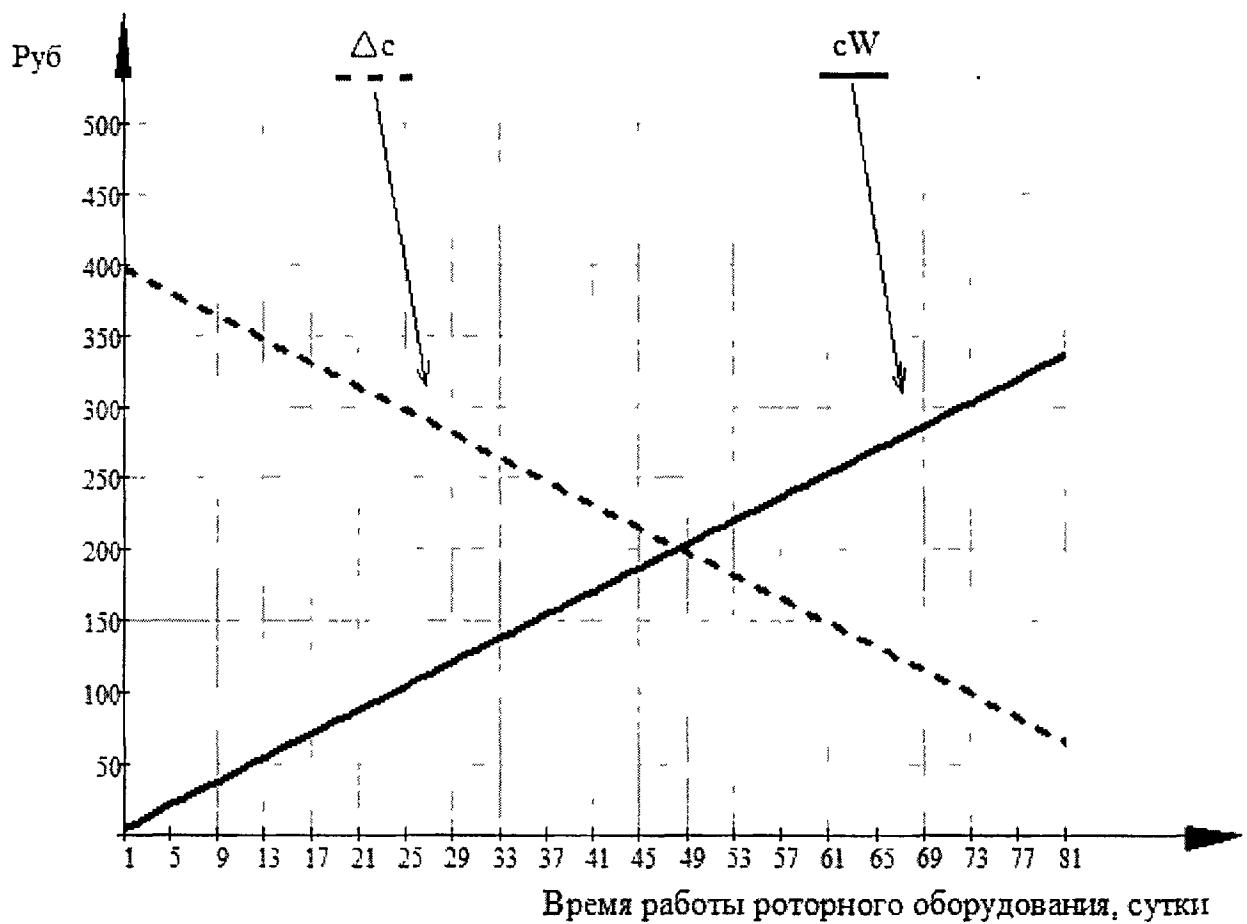


Рисунок 4.8 – Прогноз времени вывода на ремонт при возникновении раковин или сколов

На рисунке 4.8 cW – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; Δc – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб. Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что оптимальным временем проведения работ по устранению дефекта подшипника качения является 48 суток работы роторного оборудования с момента возникновения дефекта.

График соответствующий данному дефекту и времени работы роторного оборудования равному 48 суткам, полученный в среде Trace mode изображен на рисунке 4.9.



Время визира 09/02/2012 22:45:00.000

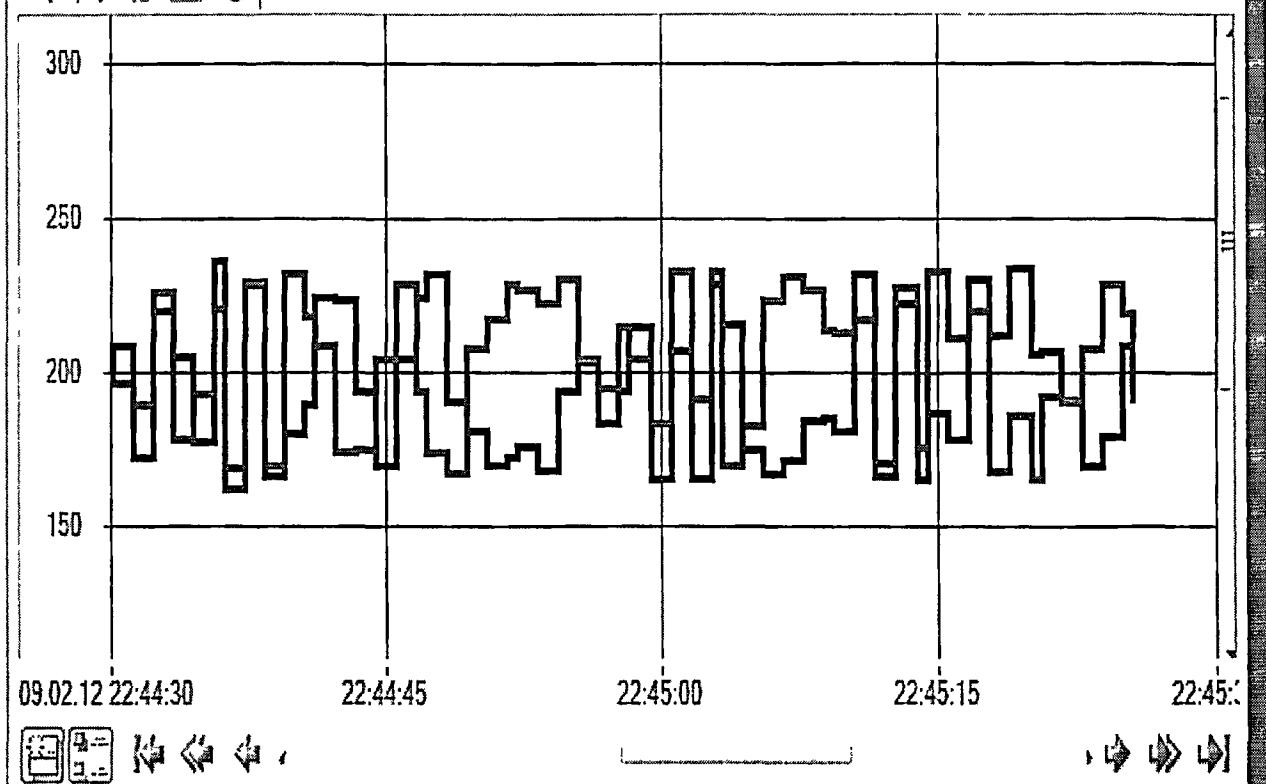


Рисунок 4.9 – Визуализация процесса прогноза эффективности при возникновении раковин и сколов

На рисунке 4.9 черный цвет соответствует стоимости оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб.; Красный цвет соответствует разнице между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.

По полученному графику видно, что кривые соответствующие стоимости оплаты повышенных потерь электрической энергии и разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии, приближаются, а в некоторых точках пересекаются, следовательно, расчет в среде Mathcad произведен верно, и оптимальным временем для устранения дефекта смазки подшипника является 48 суток с момента возникновения данного дефекта.

При возникновении дефектов тел качения и сепаратора доля потерь электроэнергии составляет 30%. График соответствующий этому дефекту представлен на рисунке 4.10.

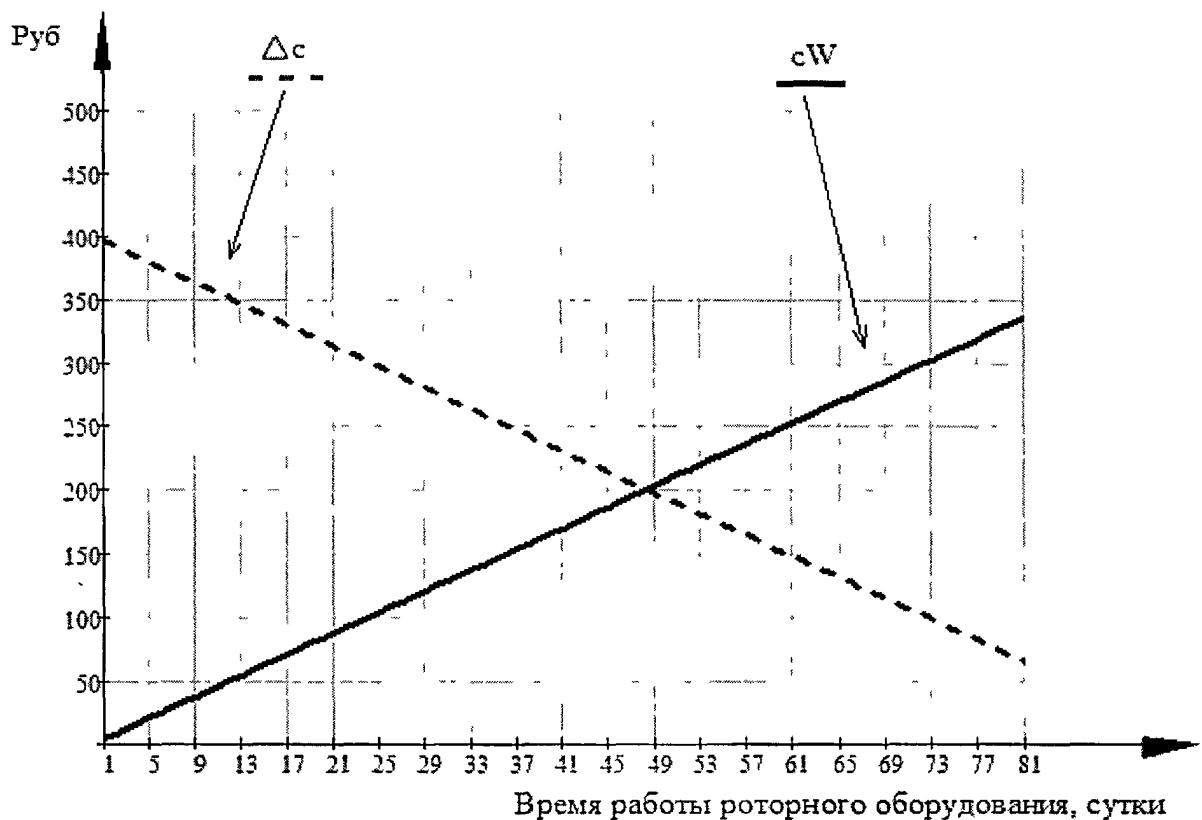


Рисунок 4.10 – Прогноз времени вывода на ремонт при дефектах тел качения и сепаратора

На рисунке 4.10 cW – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб; Δc – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.

Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что оптимальным временем проведения работ по устранению дефекта подшипника качения является 80 суток работы роторного оборудования с момента возникновения дефекта.

График соответствующий данному дефекту и времени работы роторного оборудования равному 80 суткам, полученный в среде Trace mode изображен на рисунке 4.11.

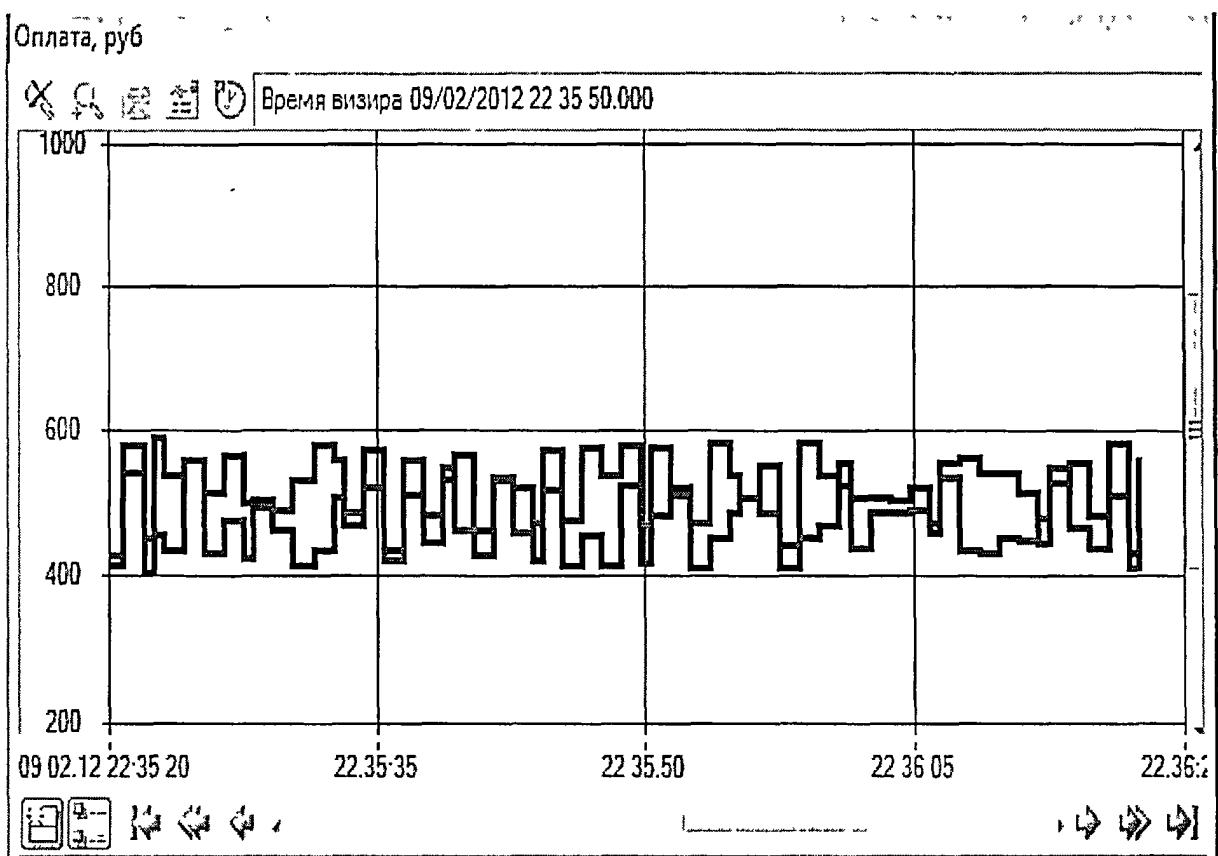


Рисунок 4.11 – Визуализация процесса прогноза эффективности работы при дефектах тел качения и сепаратора

На рисунке 4.11 черный цвет – стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб.; Красный цвет – разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии (зависящих от дефектов), руб.

По полученному графику видно, что кривые соответствующие стоимости оплаты повышенных потерь электрической энергии и разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты, повышенных потерь электрической энергии, приближаются, а в некоторых точках пересекаются, следовательно, расчет в среде Mathcad произведен верно, и оптимальным временем для устранения дефекта смазки подшипника является 80 суток с момента возникновения данного дефекта.

4.3 Программный модуль имитации диагностических сигналов

Программный модуль, имитирующий сигнал напряжения представлен на рисунке 4.12.

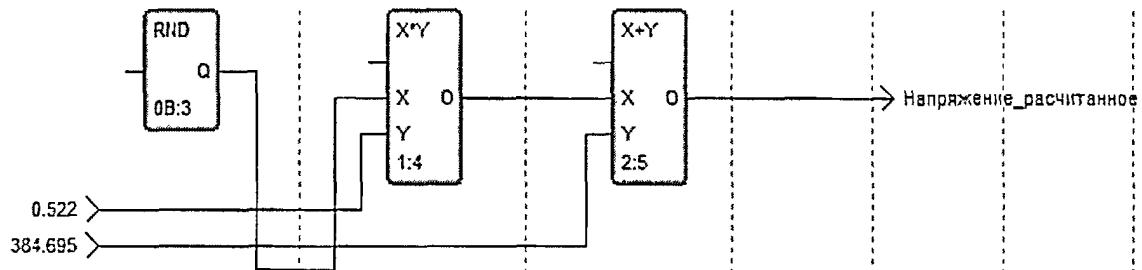


Рисунок 4.12 – Блок схема программы имитации сигнала напряжения

Статика. Модули состоят из следующих блоков: блока реализации функции сложения дисперсии сигнала рассчитанной по формуле 3.13, математическим ожиданием сигнала рассчитанных по формуле 3.23.

Визуализируемый на экране моделируемый сигнал напряжения изображен на рисунке 4.13.

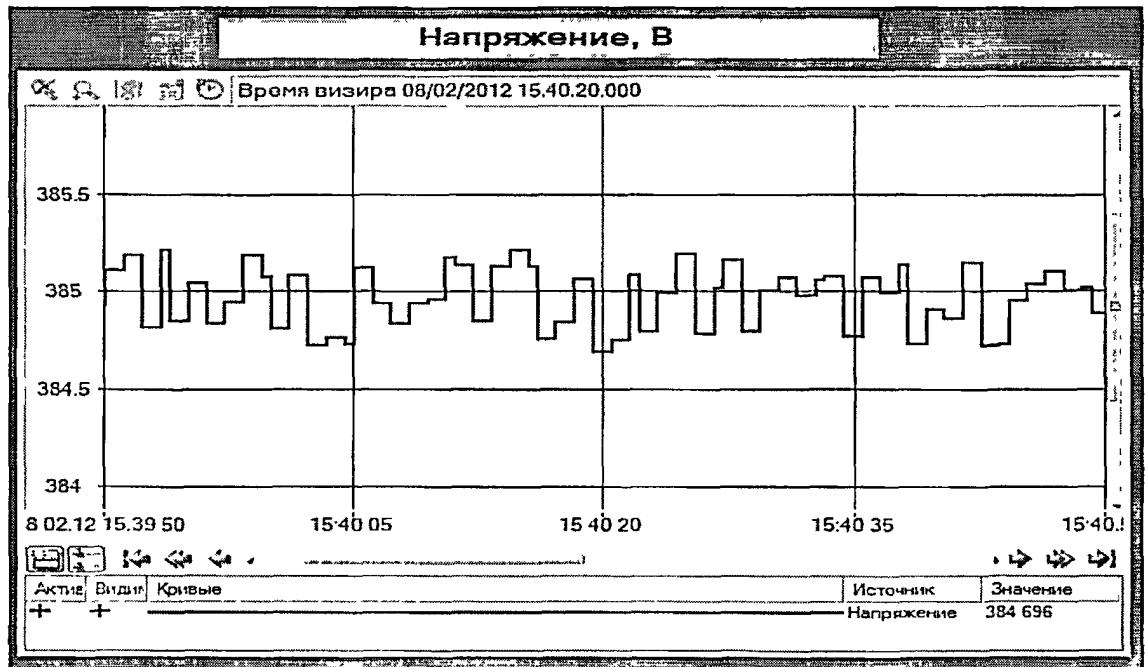


Рисунок 4.13 – Визуализация оцифрованного сигнала напряжения

Динамика. Модуль функционирует следующим образом: блок генерации случайных чисел, генерирует значение в пределах отклонения напряжения $\pm 10\%$, блок произведения воспроизводит произведение

случайно сгенерированного сигнала со значением дисперсии сигнала рассчитанной по формуле 3.13 и далее в блоке суммирования происходит сложение с математическим ожиданием сигнала рассчитанным по формуле 3.23 из экспериментальных данных. В блоках реализующих функцию произведения двух величин заданные сигналы реализуются в моделируемый сигнал напряжения

Аналогично моделируются сигналы силы тока, коэффициента мощности, вибрация, активная и реактивная мощности.

Программный модуль, имитирующий сигнал тока представлен на рисунке 4.14.

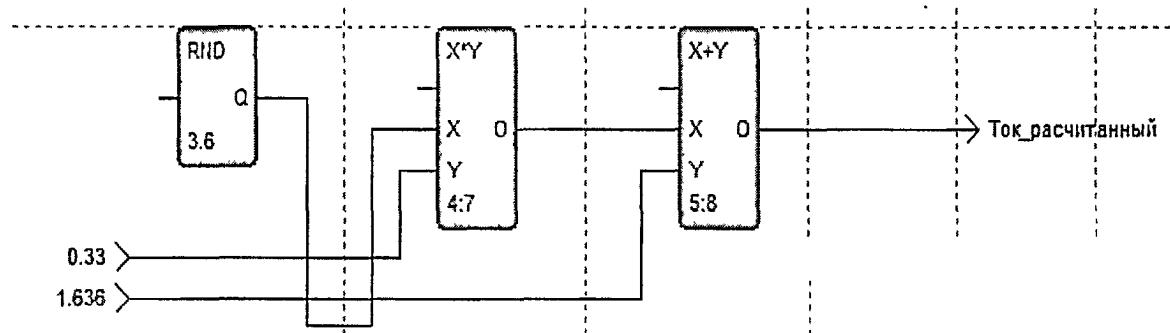


Рисунок 4.14 – Блок схема программы имитации сигнала тока.

Визуализируемый на экране моделируемый сигнал тока изображен на рисунке 4.15.

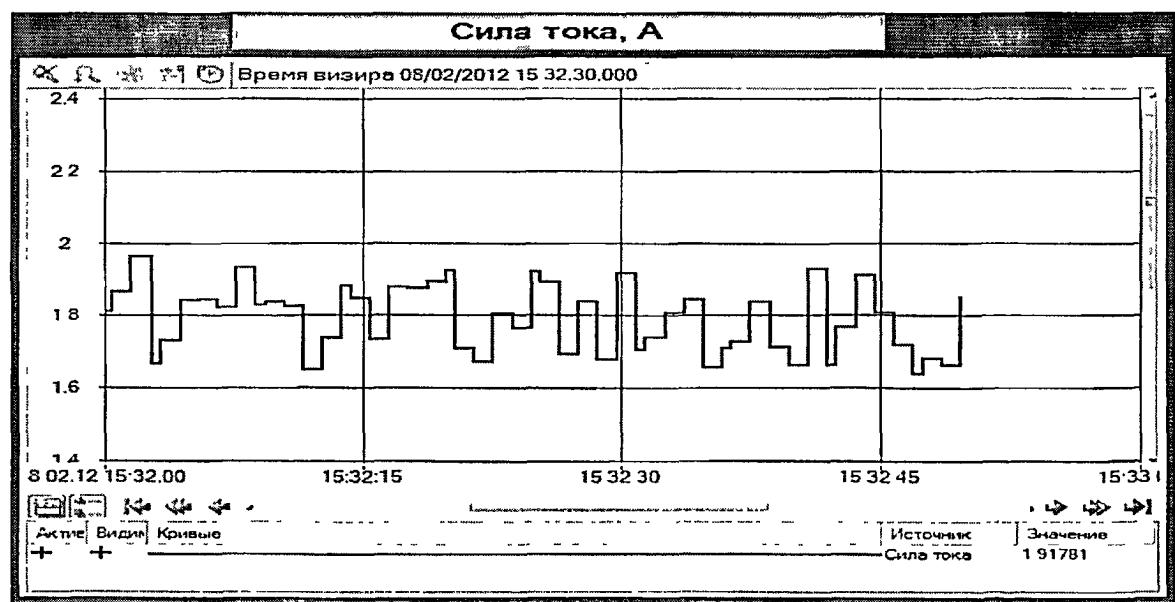


Рисунок 4.15 – Визуализация оцифрованного сигнала тока.

Программный модуль имитирующий сигнал коэффициента мощности представлен на рисунке 4.16

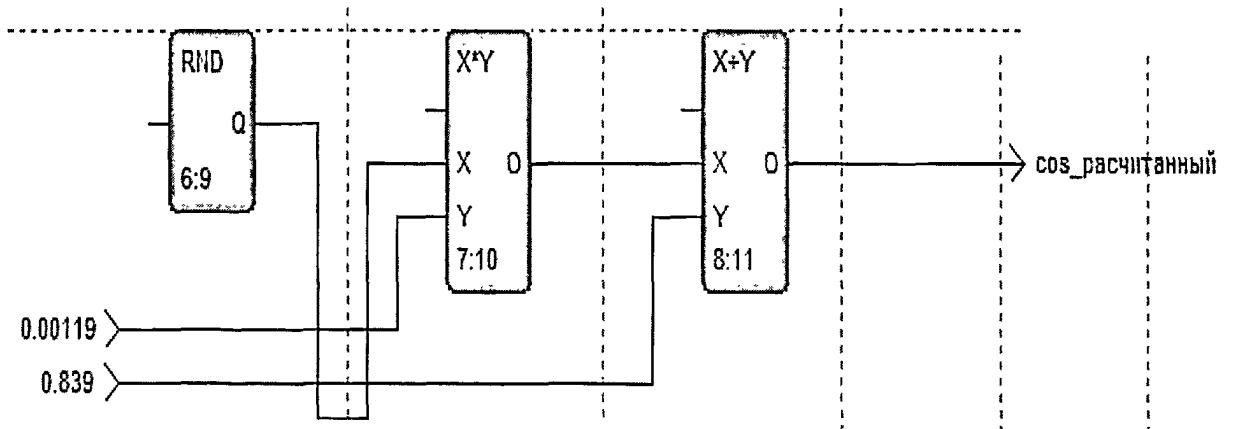


Рис. 4.16 Блок схема программы имитации сигнала коэффициента мощности

Визуализируемый на экране моделируемый сигнал коэффициента мощности изображен на рисунке 4.17.

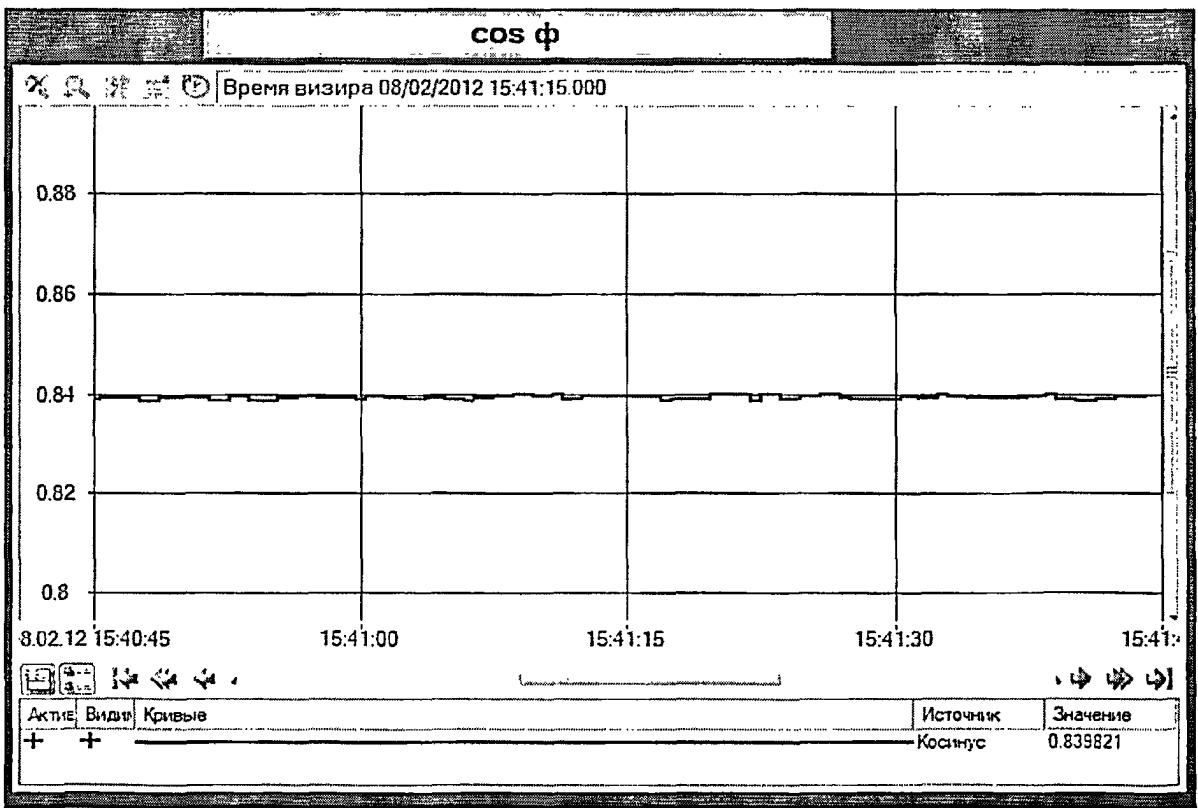


Рисунок 4.17 – Визуализация оцифрованного сигнала коэффициента мощности

Программный модуль, имитирующий сигнал активной и реактивной мощностей представлен на рисунке 4.18.

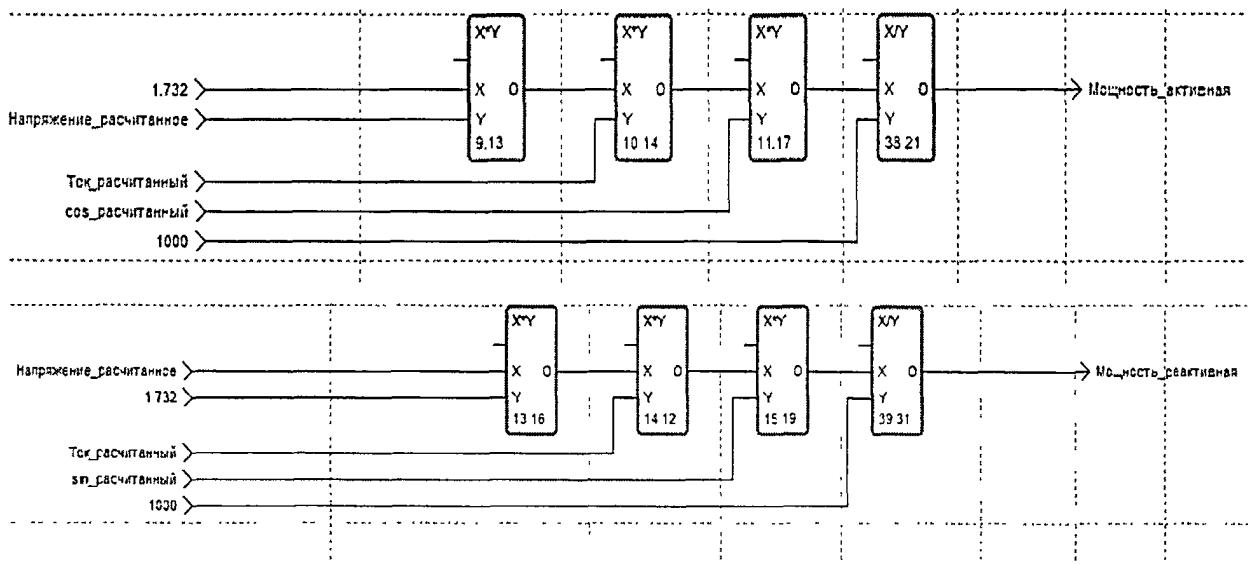


Рисунок 4.18 – Блок схема программы имитации сигнала активной и реактивной мощностей

Визуализируемый на экране моделируемый сигнал активной и реактивной мощностей изображен на рисунке 4.19.

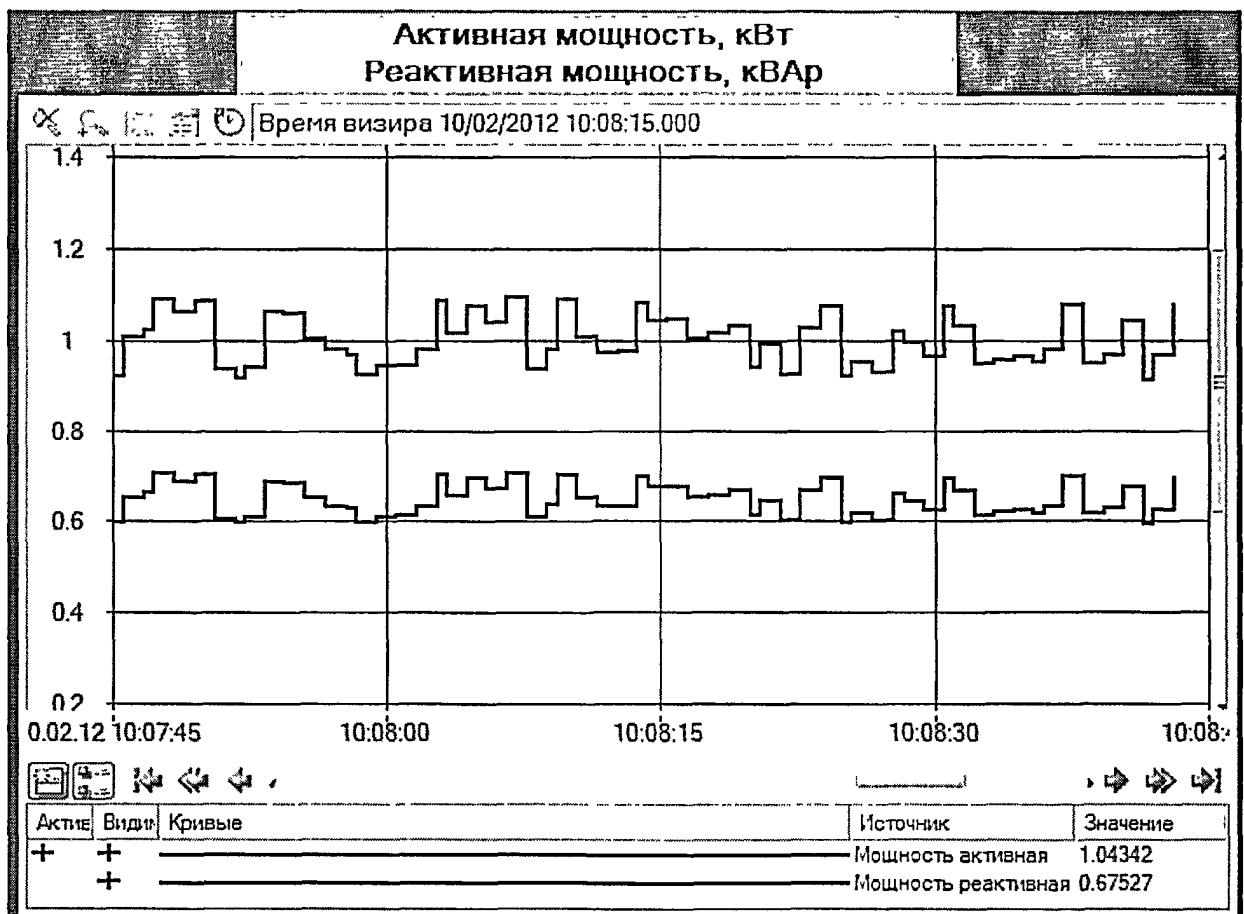


Рисунок 4.19 – Визуализация оцифрованного сигнала активной и реактивной мощностей

Программный модуль имитирующий сигнал виброускорения представлена на рисунке 4.20.

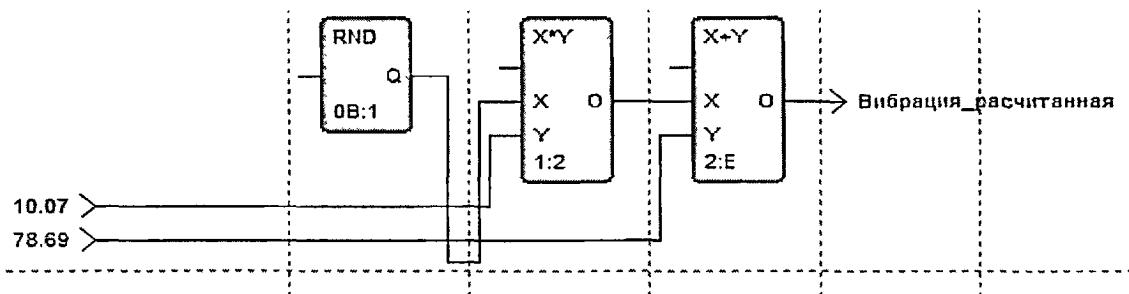


Рисунок 4.20 – Блок схема программы имитации сигнала виброускорения

Визуализируемый на экране моделируемый виброускорение изображен на рисунке 4.21.

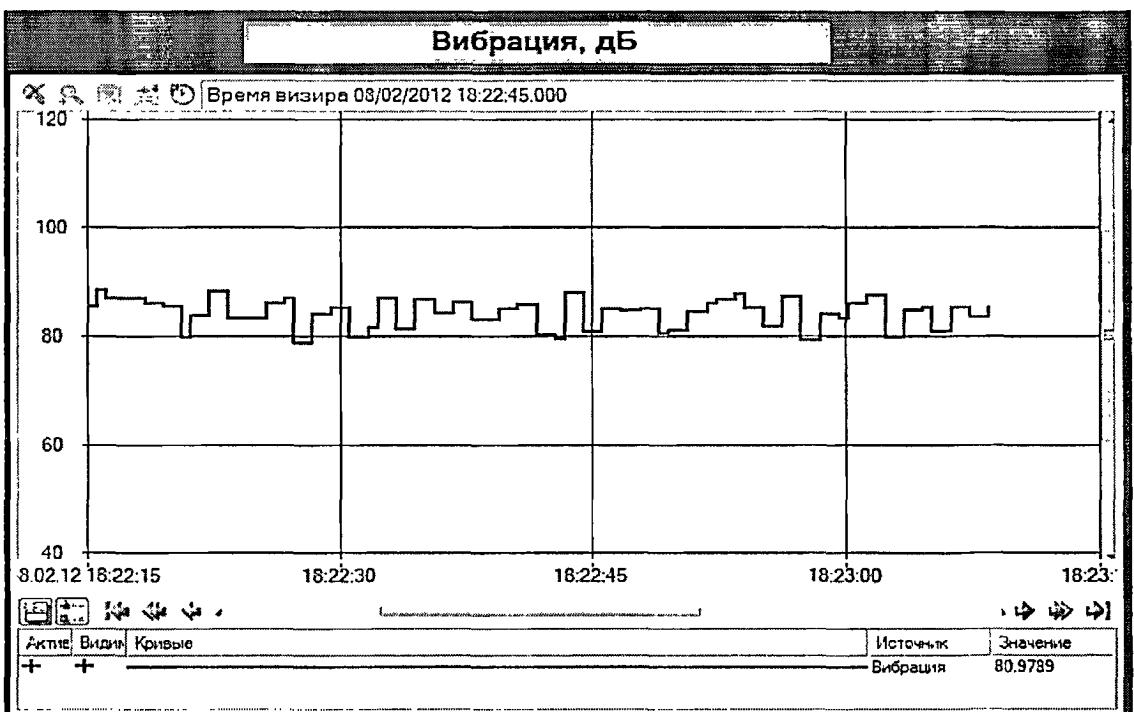


Рисунок 4.21 – Визуализация оцифрованного сигнала виброускорения.

4.4 Программный модуль для количественной оценки потерь

Блок – схема программы расчета потерь изображена на рисунке 4.22. Блок схема реализует расчет потерь согласно критерию эффективности по уравнению 2.1.

Статика. Модули состоят из следующих блоков: блока реализации функции сложения дисперсии сигнала рассчитанной по формуле 3.13, математическим ожиданием сигналов рассчитанных по формуле 3.23.

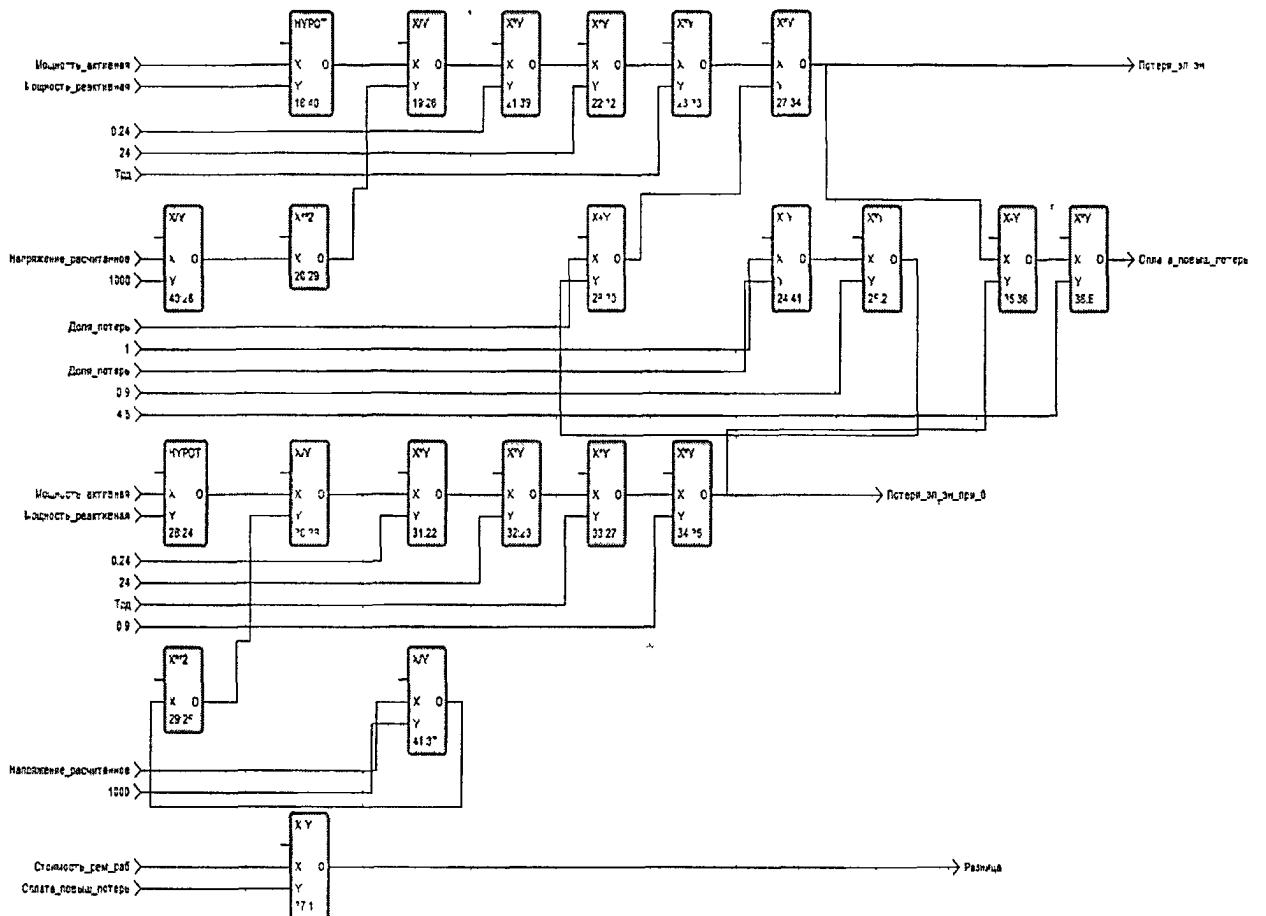


Рисунок 4.22 – Блок схема программы «расчет потерь»

Визуализируемый на экране результат по расчету потерь представлен на рисунке 4.23

Динамика. Модуль функционирует следующим образом: программные модули имитирующие диагностируемые сигналы взаимодействуют друг с другом в соответствии с реализацией уравнения критерия эффективности 2.1 . Блоки генерации случайных чисел, генерируют значения в пределах допустимых отклонений, блоки произведения воспроизводят произведение случайно сгенерированных сигналов со значениями дисперсий сигналов рассчитанных по формуле 3.13 и далее в блоке суммирования происходит сложение с математическим ожиданием сигналов рассчитанным по формуле 3.23. В блоках реализующих

функцию произведения двух величин заданные сигналы реализуются в уравнение критерия эффективности с расчетом затрат в рублях.

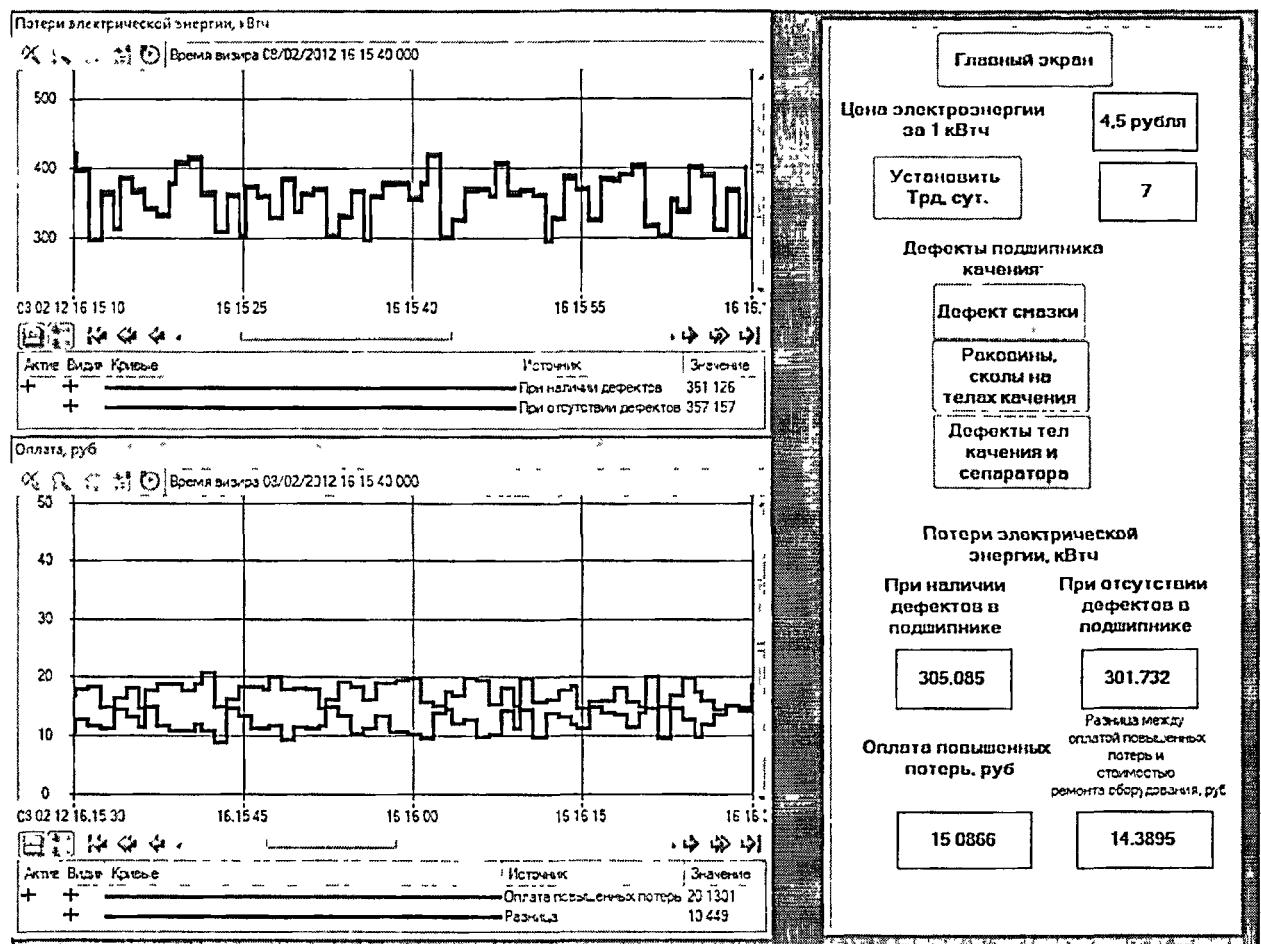


Рисунок 4.23 – Визуализация текущих потерь в АРМ

На рисунке 4.23 изображены тренды, отображающие потери электрической энергии при наличии дефекта в подшипнике и при его отсутствии. На левой панели экрана расположены ряд кнопок позволяющих по нажатию перейти на главный экран, кнопки соответствующие исследуемым дефектам подшипника, по нажатию на которые в программу посылаются значения доли потерь, стоимости ремонта оборудования, и оптимальное время работы роторного оборудования. По кнопке «Установить Трд» в программу можно послать любое значение времени работы роторного оборудования в сутках. Также отображается стоимость электроэнергии за 1 кВтч.

Программные модули работают в следующих режимах (режимы работы экранов):

- Монитор – слежение за процессом (измерение параметров);
- Тренд – тенденция развития процесса;
- Журнал – документирование (журнал событий, архив);
- Система самоконтроля – тестирование (в т. ч. метрологическая аттестация);
- Осциллограф – моделирование;
- Экспертная система – диагностирование, энергоэффективность.

Система интегрируется в сеть предприятия, посредством которой данной информацией могут пользоваться как работники непосредственно обслуживающие оборудование, так и руководители разного уровня для анализа ситуации и принятия необходимых им решений. В реальном времени можно наблюдать за эффективностью работы оборудования, а также накапливать достоверную информацию о необходимости проведения ремонтных работ с целью обеспечения энергоэффективной и экономически выгодной эксплуатации роторного оборудования предприятия. К особенностям информационно измерительной системы энергоэффективности роторного оборудования относятся: новые алгоритмы определения энергоэффективности оборудования по вносимой дефектами доли потерь и финансовой обоснованности планирования и проведения ремонтных работ. После проведения ремонтных работ система отслеживает их качество, и в случае необходимости своевременно выявляет недоделки, в результате можно сделать вывод о качестве проведенного ремонта.

В рамках проводимых исследований получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [78].

Программный комплекс предназначен для исследования потерь электрической энергии при эксплуатации роторного оборудования, зависящих от дефектов роторного оборудования на опасных энергетических и промышленных объектах. Он позволяет: осуществлять оптимизацию расхода электрической энергии; проводить экспериментальное сопоставление влияния различных дефектов на потери электроэнергии;

моделировать своевременное обнаружение признаков возникновения предаварийных ситуаций на опасных энергетических и промышленных объектах; вырабатывать рекомендации по своевременным ремонтным работам на опасных энергетических и промышленных объектах; свободно управлять модулями, окнами и основным меню.

4.5 Выводы и обсуждение результатов

Синтезирован алгоритм прогноза времени вывода оборудования на ремонт.

Проведя сравнительный анализ рассмотренных на рисунках 4.3- 4.10 прогнозов эффективности работы роторного оборудования при различных дефектах можно сделать вывод о работоспособности данной системы.

Исследуя алгоритмы диагностики и прогноза эффективности работы роторного оборудования создано автоматизированное рабочее место и **получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [78].**

В отличие от существующих систем автоматизированное рабочее место определяя неисправность роторного оборудования рассчитывает потери электроэнергии от конкретных дефектов. В случае не кризисного развития дефектов АРМ ДРО «РОПОТ» позволяет спланировать экономически целесообразные сроки проведения ремонтных работ.

Программный комплекс предназначен для исследования потерь электрической энергии при эксплуатации роторного оборудования, зависящих от дефектов роторного оборудования на опасных энергетических и промышленных объектах. Он позволяет: осуществлять оптимизацию расхода электрической энергии; проводить экспериментальное сопоставление влияния различных дефектов на потери электроэнергии; моделировать своевременное обнаружение признаков возникновения предаварийных ситуаций на опасных энергетических и промышленных

объектах; вырабатывать рекомендации по своевременным ремонтным работам на опасных энергетических и промышленных объектах; свободно управлять модулями, окнами и основным меню.

Анализ прогнозных данных показывает, что экономически эффективно производить ремонтные работы в период от 7 до 80 дней с момента возникновения либо обнаружения дефектов.

Применение АРМ ДРО позволяет исключить возникновение аварийных ситуаций из за возможности своевременного отключения оборудования при сильных дефектах и оповещения обслуживающего персонала. Продолжение эксплуатации оборудования некоторое объективное время при небольших и средних дефектах, когда стоимость ремонтных работ суммарно не превышает стоимость потерь от наличия развивающихся дефектов.

Применяя данную систему, получен своевременный контроль за параметрами роторного оборудования и возможность оперативного влияния на развитие любых отклонений от нормальных режимов работы технологического процесса.

Кроме того, получен экономический эффект от выявления дефектов после проведения ремонтных работ.

Заключение

Анализ работы роторного оборудования показал, что энергоэффективность зависит от показателей вибрации (наличия дефектов оборудования), количества потребляемой электроэнергии и температуры нагрева изоляции двигателя. Важность рассматриваемых методов неразрушающего контроля в системах диагностирования заключается в том, что они позволяют оценивать состояние электрооборудования роторного типа на различных стадиях его активного существования и как следствие влиять на качество производимого им конечного продукта или совершающей работы с максимально экономичными параметрами по расходу электроэнергии. Существующие экспертные системы диагностики позволяют решать лишь часть задач эксплуатирующего персонала. Как правило, решаются задачи определения вида неисправности, при этом вопрос об изменении структуры потребления электроэнергии и энергоэффективности оборудования в целом остается открытым или даже не задаваемым, но очень актуальным в настоящее время.

Разработана классификация дефектов по воздействию на энергоэффективность роторного электрооборудования. Классификация позволяет объединить дефекты с энергопотерями и сформулировать критерий энергоэффективности. Предложен критерий энергоэффективности работы энергетического оборудования, отличающийся от известных учетом потерь электрической энергии, зависящих от дефектов. Показано, что в качестве диагностического признака можно эффективно использовать действующее значение тока.

Экспериментальные исследования, проведенные в главе 2.2, показали, что расход электрической энергии, потребляемый электроприводом, изменяется в процессе развития дефекта [75], что позволяет сделать вывод о том, что расход электроэнергии можно использовать для прогноза развития дефекта.

В главе 3 определена структура АРМ. Синтезированы новые алгоритмы диагностики эффективности функционирования роторного оборудования, отличающиеся от известных определением в реальном масштабе времени дефектов и расчетом потерь электрической энергии, зависящих от дефектов. Разработан новый алгоритм прогноза времени вывода роторного оборудования на ремонт, отличающийся от известных наличием контроля за изменением потерь электрической энергии, зависящих от дефектов, и позволяющий планировать ремонтные работы на основе энергоэффективности роторного оборудования.

Проведен сравнительный анализ прогнозов эффективности работы роторного оборудования при различных дефектах, в результате которого можно сделать вывод о работоспособности данной системы. Исследуя алгоритмы диагностики и прогноза эффективности работы роторного оборудования разработан пакет прикладных программ по оптимизации эксплуатационных затрат при обнаружении дефектов и оценки их влияния на потери электрической энергии. Применение автоматизированного рабочего места повышает эффективность управления роторным оборудованием, получено свидетельство[78] о государственной регистрации разработанного программного обеспечения в государственном Реестре программ для ЭВМ.

Таким образом, на защиту выносятся:

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В.В. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.; Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672с.
2. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учебное пособие . СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2000, – 159с.
3. Баркова Н.А. Введение в вибродиагностическую диагностику роторных машин и оборудования: Учебное пособие. СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2003, – 160с.
4. Биргер, И.А. Техническая диагностика [Текст]/ И.А. Биргер - М.: Машиностроение, 1978.- 239с.
5. Данилевич Я.Б., Кади-Оглы И.А., Попов В.В. «Своевременная диагностика и модернизация оборудования на ее основе – первоочередная задача отечественного турбогенераторостроения». Труды международного симпозиума «ЭЛМАШ – 2006», Т.1. М.: МА «Интерэлектромаш», октябрь 2006.
6. Алексеев Б.А., Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. «Проблемы продления эксплуатации основного электрооборудования энергосистем, отработавшего определенный стандартами срок работы». Известия Академии наук. Энергетика, 2001, № 3.
7. Кузьминов А.С. Эффективность энергетики России и сотрудничество с МЭА, ж. «Энергия», №4, 2011г., с.38-42.
8. Григорьев А.В., Константинов А.Г., Осотов В.Н., Кожевникова Т.Н., Петрищев Л.С., Самородов Ю.Н., Ямпольский Д.А. Совершенствование системы диагностики турбогенераторов в Свердловэнерго. – Электрические станции, 1997, № 6.
9. Зинаков В.Е., Цырлин А.Л., Яковлев В.А. Вибродиагностика скрытых дефектов работающих генераторов.– Энергетик, 2001, № 5.

- 10.Дементьев В.Н., Кузнецов А.В., Назолин А.Л., Поляков В.И.
Обнаружение дефектов статора турбогенератора по параметрам
виброакустических колебаний его стальных конструкций. //
Электричество, 2005, № 12.
- 11.Бельчанская Е.Н. Интеллектуальная система диагностики
информационно-измерительных систем асботехнического
производства // дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 – ВолгГТУ, 2008. –
165 с.
- 12.Болдырев И.А. Информационно-измерительная система для
управления процессом абсорбции // дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 –
МЭИ, 2010. – 150 с.
- 13.Переяслов В.Ю. Информационно-измерительная система для
определения параметров состояния статоров турбогенераторов // дис.
канд. техн. наук: 05.11.16 – ВолгГТУ, 2006. – 197 с.
- 14.Лясин Д.Н. Параметрический синтез информационно – измерительных
систем с мультипликативным взаимодействием измерительных
каналов: дис. канд техн. наук: 05.11.16; ВолгГТУ. - Волгоград, 2001.-
116 с.
- 15.Данилов С.И. Параметрический синтез измерительных каналов в
автоматизированной системе управления технологическим процессом:
Дис. канд. техн. наук: 05.11.16; ВолгГТУ. - Волгоград, 2000. - 146 с.
- 15.Цветков Э. И. Основы математической метрологии. – СПб.:
Политехника, 2005. – 510 с.: ил.
- 16.Цветков Э. И. Методы электрических измерений. – Л.:
Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
- 17.Цветков Э. И. Основы теории статистических измерений. – Л.:
Энергоатомиздат, 1986. – 254 с.

- 18.Костюков В.Н., Науменко А.П. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия. Контроль. Диагностика, 2007 № 3, с. 50-58.
- 19.Шевчук В.П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011, – 320 с.
- 20.Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, Анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003, – 280 с.: ил.
- 21.Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.: ил.
- 22.Капля Е.В., Кузеванов В.С., Шевчук В.П. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, – 512с.
- 23.Шевчук В.П. Расчет динамических погрешностей интеллектуальных измерительных систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 288 с.
- 24.Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учебное пособие . СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2000, – 159с.
- 25.Баркова Н.А. Введение в вибродиагностическую диагностику роторных машин и оборудования: Учебное пособие. СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 2003, –160с.
- 26.Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. – 574 с.
- 27.Башарин А.В., Лозовой Л.Н., Чернышева Т.А., Аппроксимация нелинейных характеристик систем автоматического управления

- методом модифицированных полиномов // Электромеханика, 1980, № 12, с. 1303-1307.
- 28.Бухгольц Р., Давыдов В.Г., Ярмийчук В.Д. Некоторые вопросы методики решения задач управления многомерными системами на цифроаналоговом комплексе // Сб. Теория, математическое обеспечение и применение неоднородных вычислительных систем. МДНТПб 1973.
- 29.Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. «Энергия» Л., 1968. – 575 с.
- 30.Назаров Н.Г. Основные понятия и математические модели: Учеб. Пособие для вузов / Н.Г. Назаров. – М.: Высшая шк., 2002. – 348 с.: ил.
- 31.Закожурникова Г.П, Закожурникова Г.С. Результаты экспериментальных исследований по ОТК – технологии «Перспективные проекты и технологии в энергетике». Межрегиональная юбилейная научно-практическая конференция, г Волжский, 27-30 сентября 2005 года. Сборник научных статей. - Волжский: Филиал МЭИ (ТУ) в г. Волжском, 2006. - с. 99-102.
- 32.ГОСТ 30583-98. Энергосбережение. Методика определения полной энергоемкости продукции, работ, услуг. М.: 1998.
- 33.ГОСТ Р 51380-99. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности. – М.:1999.
- 34.ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.
- 35.ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- 36.РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 2001-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 44 с.

37. ГОСТ 27322-87 Энергобаланс промышленного предприятия. Общие положения. М.: Госстандарт. 1987. – 12 с.
38. Васильев П.Д., Халупняк В.А., Терентьев Г.Ф. Концепция энергетического инжиниринга ТЭС. Энергосбережение в Поволжье, ежеквартальный научно-технический журнал, выпуск 4 (12), г. Ульяновск, 2000.
39. Волченков Е. Стандартизация пользовательского интерфейса. Открытые системы. 2002, № 4 <http://www.osp.ru/os/2002/04/181312/>
40. Стандарт ассоциации «Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования» (СА 03-002-05). Серия 03/Колл. Авт. – М.: Издательство «Компрессорная и химическая техника», 2005. – 42 с.
41. Бойченко С.Н., Дуросов В.М., Коренякин В.Н., Костюков В.Н. и др. Система автоматического мониторинга состояния поршневых и центробежных компрессоров КОМПАКС. / Труды девятого международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования – 2004». – СПб.: 2004. с. 154-164.
42. Костюков В.Н.; Бойченко С.Н.; Костюков А.В. Патент № 2103668 от 27.01.1998
43. Уайт Г.Д. Основы анализа данных и поиска неисправностей: Пер. с англ. [Электронный ресурс] / по материалам DLI Engineering Corporation. http://www.vibration.ru/osn_analizai.shtml.
44. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь, 1996.
45. Программы «Калькулятор частот зубчатых передач», «Калькулятор частот подшипников качения» [Электронный ресурс] / Замарев К.С. <http://www.vibration.ru/zamarev/calc.shtml>.
46. Техническая диагностика подшипников качения. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2002, № 3.

- 47.Метрология и электроизмерительная техника: учебное пособие по курсу «Электрические измерения» [Текст] В.И. Диденко, И.Н. Желбаков, В.Ю. Кончаловский, В.А. Панфилов; под. ред. В.Н. Малиновского. – М.: изд-во МЭИ. – 1991. – 80 с.: ил.
- 48.Кузнецов Е.П. Управление энергосбережением. Ч. 1. Совершенствование организации управления энергосбережением. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 78 с.
- 49.Кузнецов Е.П. Управление энергосбережением. Ч. 2. Классификационный стандарт энергосбережения. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 32 с.
- 50.Кузнецов Е.П. Управление энергосбережением. Ч. 3. Анализ и оценка резервов энергосбережения. – СПб.: ПЭИПК, 2007. – 139 с.
- 51.Кузьминов А.С. Эффективность энергетики России и сотрудничество с МЭА, ж. «Энергия», №4, 2011г., с. 38-42.
- 52.Колмановский В.Б., Афанасьев В.Н., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1998. – 574 с.
- 53.Башарин А.В., Лозовой Л.Н., Чернышева Т.А., Аппроксимация нелинейных характеристик систем автоматического управления методом модифицированных полиномов // Электромеханика, 1980, № 12, с. 303-307.
- 54.Бухгольц Р., Давыдов В.Г., Ярмийчук В.Д. Некоторые вопросы методики решения задач управления многомерными системами на цифроаналоговом комплексе // Сб. Теория, математическое обеспечение и применение неоднородных вычислительных систем. МДНТПБ 1973.
- 55.Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука. Ленинград. отд-ние АН СССР, 1988. – 332 с.

- 56.Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Заборовский В.С. Вычислительные методы синтеза систем автоматического управления. Л.: ЛГУ им. А.А.Жданова, 1989. – 232 с.
- 57.Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Шашихин В.Н. Вычислительная математика и теория управления. СПб, изд. СПбГТУ. 1996. - 170 с
- 58.Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Шашихин В.Н. Теория автоматического управления. СПб, изд. Политехнического университета, 2006. - 316 с.
- 59.Красовский Н.Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматиз, 1959.
- 60.Кривченко Г.И. Автоматическое регулирование гидротурбин. М.: Энергия, 1964. – 288с.
- 61.Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2. Л.: Энергия, 1981.
- 62.Основы оптимального управления. Под редакцией В.Ф. Кротова. М.: Высш. шк., 1990. 430 с.
- 63.Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986, 616 с.
- 64.Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Наука, 1962. 883 с.
- 65.Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. М.: Наука, 2002. – 320 с.
- 66.Чемоданов Б.К. Математические основы теории автоматического регулирования. М.: Наука, 1980. – 650 с.
- 67.Шашихин В.Н. Теория автоматического управления. Методы декомпозиции, агрегирования и координации. Учеб. пособие. СПб: изд-во Политехнического университета, 2004. – 166 с.
- 68.Шевчук В.П., Капля В.И., Желтоногов А.П., Лясин Д.Н. Метрология интеллектуальных измерительных систем: Монография / ВолгГТУ, Волгоград, 2005. – 210 с.

- 69.Гудкова Е.Н. Концептуальное проектирование интеллектуальных измерительных и управляющих систем // Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий в инновационных проектах Инноватика-2006. / Материалы Международной конференции и Российской научной школы. Часть I. – М.: Радио и связь, 2006 – С. 59-60
- 70.Ротач В.Я., Кузицин В.Ф. Автоматизация настройки систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 391 с.
- 71.Грундулис А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. Москва, Агропромиздат, 1988 г.
72. Кацман М. М. Электрические машины. Москва, Высшая шк., 2000 г.
- 73.Брускин А. Э. и др. Электрические машины и микромашины. Москва, Высшая школа, 2001 г.
- 74.Данилов И. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. Москва, Высшая школа, 2000 г.
- 75.Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система энергоэффективности вращающихся механизмов // Энергетик, ежемесячный производственно-массовый журнал, № 7 / Москва, 2012. с. 23-26.
- 76.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.
- 77.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.

- 78.Курьянов В.Н. Программный комплекс оптимизации затрат на эксплуатацию роторного оборудования по потерям электрической энергии оборудования «РОПОТ» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617022, зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 6 августа 2012 / Авторы: Шевчук В.П, Курьянов В.Н., Лупачев А.А., Хлыниова О.В.
- 79.Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система диагностики энергоэффективности роторного оборудования // Восемнадцатая ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика», г. Москва, МЭИ 2012. – с. 6-7.
- 80.Шевчук В.П., Курьянов В.Н. Информационно-измерительная система для диагностики биений роторных машин // Семнадцатая ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, электротехника и энергетика», г. Москва, МЭИ 2011. – с. 466-467.
- 81.Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Планирование ремонтов роторного оборудования по показаниям измерительной системы контроля расхода и потерь электрической энергии // IX Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление»: Сборник материалов. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. -Т.2. - с. 5-7.
- 82.Курьянов В.Н., Курьянова Е.В. Информационно-измерительная система энергоэффективности роторного оборудования // Межрегиональная научно-практическая конференция «Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсо-сберегающих технологий», МЭИ г. Волжский. 2011 – с. 66-70.
- 83.Курьянов В.Н. Комиссарова Д.В. Моделирование переходных процессов в виброакустическом измерительном канале //

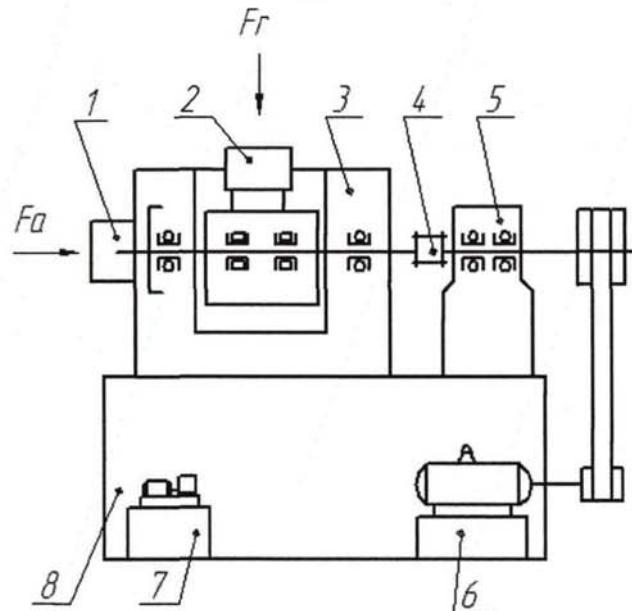
- Семнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. филиал МЭИ в г. Волжском, 2011 – с. 39-41.
- 84.Курьянов В.Н. Измерительная система диагностики биений ротора // Ресурсо - энергосбережение и эколого – энергетическая безопасность промышленных городов. Третья всероссийская научно-практическая конференция, г. Волжский, МЭИ 2010 – с. 41-43.
- 85.Кезина А.В., Курьянов В.Н. Моделирование метрологических характеристик программно-аппаратного счетчика электрической энергии // Семнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. филиал МЭИ в г. Волжском, 2011 – с. 259-263.
- 86.Курьянов В.Н. Комиссарова Д.В. Анализ методов неразрушающего контроля промышленных объектов // Межрегиональная научно-практическая конференция «Моделирование и создание объектов энергоресурсо-сберегающих технологий», МЭИ г. Волжский. 2009 – с. 168-171.
- 87.Курьянов В.Н. Постановка задачи измерения параметров ветросолнечной электростанции // Пятнадцатая межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. МЭИ 2009 – с. 29-30.
- 88.Терентьев Г.Ф. Курьянов В.Н. Некоторые вопросы вибродиагностики электротехнического оборудования // IX межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. ВПИ. 2003.
- 89.Курьянов В.Н. Нежильская Е.В. Обслуживание оборудования по фактическому состоянию // Материалы научно-практической конференции «Философия жизни Волжан». Волжский: Филиал ГОУВПО «МЭИ (ТУ)» в г. Волжском, 2003.

- 90.Миф, Н.П. Оптимизация точности измерений в производстве. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 136 с.
- 91.Кузнецов Б.Ф., Пинхусович Р.Л. Минимизация динамической погрешности измерительных преобразователей // Измерительная техника. – 2004. - № 1. с.12-14.
- 92.МИ 2233-2000 Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения. – Введ. 2000-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 3 с.
- 93.Электрические измерения / Р.М. Демидова-Панферова, В.Н. Малиновский, В.С. Попов и др.; Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 392 с., ил.
- 94.Hessling Jan Peter, Mannikoff Anders Dynamic Measurement Uncertainty Of HV Voltage Dividers // XIX IMEKO World Congress. Fundamental and Applied Metrology. - Lisbon, Portugal, September 6-11 2009.
- 95.WH0802C 8x2 character Winstar Professional LCD module manufacture Data Sheet. - URL: http://www.winstar.com.tw/products_detail_ov.php?lang=ru&ProID=13.
- 96.Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров; под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.: ил.
- 97.Интегрированная информационная система для управления промышленным производством TRACE MODE / AdAstra. - URL: <http://www.adastrra.ru>.
- 98.РД 153-34.0-11.201-97 Методика определения обобщенных метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУ ТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерений. – Введ. 1999-02-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 16 с.

- 99.Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. - М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.
- 100.Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» № 261-ФЗ от 23.11.2009
- 101.Рендалл Р.Б., Частотный анализ [Текст] / Р.Б. Ренделл - Глоструп: Изд-во Брюль и Къер, 1989. – 159с.: ил.
- 102.Бендат Дж., Применение корреляционного и спектрального анализа [Текст]/ Дж. Бендат, А. Пирсол - М.: Мир, 1982. – 362с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МАШИНЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОДШИПНИКОВ



- 1 и 2 - Система нагружения (узлы осевой и радиальной нагрузки);
3 - Испытательная головка в сборе;
4 - Муфта;
5 и 6 - Привод (электродвигатель переменного тока,
стойка привода и клиноременная передача);
7 - Система смазки (масляный насос, бак, фильтр, маслопроводы и арматура);
8 - Станина.



Рисунок 1 - Испытательная машина ЦКБ-50

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ЦКБ-50

Диаметр отверстия испытуемых подшипников, мм	30÷60
Наружный диаметр испытуемых подшипников, мм	62÷120
Количество испытуемых подшипников (шт.) под нагрузками:	
радиальной	4
комбинированной	2
Частота вращения испытуемых подшипников, об/мин	1000 ... 5000
Система нагружения	гидростатическая
Наибольшая нагрузка на один испытуемый подшипник, Н (кгс)	
радиальная	2500
осевая, max	1500
Система смазки	циркуляционная под давлением
Вид смазки	жидкая
Емкость маслоблока , л	40
Привод:	
Асинхронный электродвигатель типа	A042-4/2
Мощность, квт	2,8
Частота вращения, об/мин	1430
Габаритные размеры машины, мм	
длина	960
ширина	660
высота	1200
Масса машины, кг	810

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица 1 - Сводные результаты стендовых испытаний

1. Новый подшипник 12309КМ.

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Частота сети, f, Гц	Вибрация, А, Db	Температура, T, °C	Коэф. мощн. сопр.	Мощн. реакт. P \sum , кВт	Мощн. полн. S \sum , кВА	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «с»	Напряжение фазы «а»	Ток фазы «B» I _B , A	Ток фазы «C» I _C , A	Ток фазы «C»	
08.09.2011	0	13,25	50,00	96	39	0,83	1,9340	1,2996	2,3301	220,00	218,00	219,00	3,4500	3,5400
08.09.2011	5	13,30	50,00	96	39	0,82	1,8143	1,2664	2,2125	220,07	218,14	219,17	3,2731	3,3431
08.09.2011	10	13,35	50,00	96	39	0,81	1,6942	1,2266	2,0917	219,96	218,38	219,42	3,0700	3,1400
08.09.2011	15	13,4	50,00	96	39	0,8	1,6362	1,2314	2,0445	220,27	218,71	220,14	2,9604	3,0692
08.09.2011	25	13,5	50,00	96	43	0,79	1,5529	1,2155	1,9721	219,99	218,01	219,51	2,8601	2,9402
08.09.2011	75	14,00	50,00	96	47	0,77	1,4826	1,2112	1,9083	220,13	218,36	219,71	2,7970	2,8485
08.09.2011	80	14,05	50,00	95	48	0,77	1,4519	1,1926	1,8804	219,10	219,17	219,40	2,7554	2,8051
08.09.2011	85	14,10	50,00	95	49	0,77	1,4388	1,1955	1,8727	219,96	217,09	219,45	2,7240	2,7968
08.09.2011	95	14,20	50,00	95	51	0,76	1,4082	1,2031	1,8541	220,67	219,38	220,75	2,6915	2,7506
08.09.2011	105	14,30	50,00	94	53	0,75	1,3677	1,2062	1,8237	221,74	219,68	220,93	2,6600	2,7000
08.09.2011	115	14,40	50,00	95	55	0,75	1,3517	1,2126	1,8111	221,83	219,94	221,09	2,6417	2,6939
08.09.2011	125	14,50	49,98	96	56	0,75	1,3441	1,1968	1,7853	220,28	218,57	219,59	2,6000	2,6596
08.09.2011	175	15,00	50,00	96	58	0,74	1,3254	1,1848	1,7923	222,87	220,02	220,76	2,5993	2,6571
08.09.2011	195	15,20	50,00	96	59	0,73	1,2988	1,2161	1,7888	223,23	221,30	222,11	2,5819	2,6349
08.09.2011	215	15,40	50,00	96	60	0,73	1,2810	1,2194	1,7840	222,97	221,15	222,13	2,5419	2,6301
09.09.2011	275	16,00	50,00	96	61	0,72	1,2691	1,2127	1,7628	223,34	221,52	222,78	2,5500	2,6400
09.09.2011	1455	11,40	50,00	89	62	0,72	1,2114	1,1635	1,6839	222,70	220,21	221,28	2,4513	2,4796
09.09.2011	1460	11,45	50,00	90	62	0,73	1,2108	1,1471	1,6661	221,50	220,06	221,27	2,4415	2,4719
09.09.2011	1515	12,00	50,00	89	62	0,72	1,2161	1,1715	1,6920	222,92	221,31	222,21	2,4603	2,4940
09.09.2011	1530	12,15	50,00	89	62	0,73	1,2360	1,1592	1,6666	221,86	218,07	219,25	2,5091	2,5103
09.09.2011	1560	12,45	50,00	89	62	0,73	1,2148	1,1406	1,6544	220,45	219,55	220,65	2,4502	2,4727

2. Подшипник 12309КМ. Дефект № 1.

Дата	Продолжительность испытаний, τ , минуты	Время суток, час, мин.	Частота сети, f , Гц	Вибрация, А, Db	Температура, T , °C	Коэффициент мощности, $\cos\phi$	Мощн. активн. P_{Σ} , кВт	Мощн. полн. S_{Σ} , кВар	Мощн. реакт. Q_{Σ} , кВар	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «б»	Напряжение фазы «в»	Напряжение фазы «с»	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «б»	Напряжение фазы «в»	Напряжение фазы «с»
										Ia, A	Ib, A	Ic, A					
09.09.2011	0	13,54	50,00	98	46	0,75	1,4412	1,2711	1,9217	221,67	220,16	222,06	2,8392	2,8299	2,8299	3,0139	
09.09.2011	1	13,55	49,98	98	46	0,75	1,4085	1,2520	1,8907	221,69	220,18	222,07	2,8189	2,7900	2,7900	2,9576	
09.09.2011	51	14,05	50,00	98	51	0,74	1,3848	1,2478	1,8677	221,39	219,76	221,08	2,7416	2,7831	2,7831	2,8485	
09.09.2011	61	14,15	50,00	98	52	0,74	1,3420	1,2446	1,8229	220,97	219,22	220,29	2,7121	2,7359	2,7359	2,8106	
09.09.2011	66	14,20	50,00	98	53	0,73	1,3348	1,2455	1,8269	223,23	220,60	220,62	2,7250	2,7316	2,7316	2,7874	
09.09.2011	76	14,30	49,99	98	55	0,73	1,3008	1,257	1,8071	220,81	219,58	220,86	2,7062	2,6861	2,6861	2,7484	
09.09.2011	81	14,35	50,00	98	56	0,72	1,2833	1,2452	1,7918	221,06	219,94	221,48	2,6636	2,6825	2,6825	2,7463	
13.09.2011	86	12,15	50,00	97	40	0,76	1,4766	1,2508	1,9463	221,68	220,69	222,4	2,8547	2,8668	2,8668	3,0281	
13.09.2011	91	12,20	50,00	98	43	0,76	1,4124	1,2648	1,9046	222,45	220,76	222,61	2,7927	2,8156	2,8156	2,935	
13.09.2011	96	12,25	50,00	98	47	0,74	1,3918	1,2486	1,8857	222,21	220,18	221,99	2,7561	2,7772	2,7772	2,9413	
13.09.2011	271	14,00	50,00	98	49	0,71	1,2301	1,1901	1,7114	222,36	220,3	221,46	2,5886	2,531	2,531	2,656	
13.09.2011	281	14,10	50,00	98	52	0,71	1,2235	1,215	1,7326	222,15	220,65	221,76	2,5608	2,5723	2,5723	2,6601	
13.09.2011	291	14,20	49,98	98	58	0,71	1,2223	1,2308	1,7204	222,57	220,73	221,53	2,5546	2,5529	2,5529	2,661	
13.09.2011	311	14,40	50,00	98	59	0,7	1,2094	1,236	1,7231	224,45	221,13	220,8	2,5508	2,5676	2,5676	2,5919	
13.09.2011	321	14,50	50,00	98	59	0,7	1,1974	1,221	1,7086	224,2	222,52	223,05	2,5533	2,5418	2,5418	2,6016	
13.09.2011	371	15,00	50,00	99	60	0,69	1,2005	1,2496	1,7395	224,6	223,7	223,58	2,5508	2,5584	2,5584	2,619	
13.09.2011	381	15,10	50,00	98	60	0,69	1,1949	1,2372	1,7272	224,92	222,01	220,93	2,5524	2,5313	2,5313	2,5924	
13.09.2011	401	15,30	50,00	98	60	0,68	1,1985	1,285	1,7694	226,23	224,16	225,36	2,5617	2,5509	2,5509	2,6313	
13.09.2011	411	15,40	50,03	98	61	0,68	1,1888	1,2728	1,7432	225,49	224,61	225,08	2,5611	2,5418	2,5418	2,6338	

3. Подшипник 12309КМ. Дефект № 2.

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Время суток, час, мин.	Частота сети, f, Гц	Выбрация, A, Db	Температура, T, °C	Коэф. мощн. мощн. активн. cosф	Мощн. реакт. Q \sum , кВар	Мощн. мощн. полн. S \sum , кВА	Напряжение фазы «а» Ua, В	Напряжение фазы «B» Ub, В	Напряжение фазы «C» Uc, В	Напряжение фазы «aa» Ia, А	Напряжение фазы «bb» Ib, А	Напряжение фазы «cc» Ic, А	Ток фазы «C» Ic, А
14.09.2011	0	14,19	50,00	97	27	0,83	1,9925	1,3390	2,4006	219,75	218,60	218,77	3,6000	3,6700	3,6900
14.09.2011	1	14,20	50,00	97	27	0,83	2,0221	1,3589	2,4363	219,76	218,78	218,78	3,5500	3,6900	3,8800
14.09.2011	2	14,21	50,00	97	27	0,83	1,8168	1,2209	2,1889	219,78	218,80	218,78	3,2215	3,3871	3,3814
14.09.2011	6	14,25	49,98	98	31	0,82	1,7405	1,2074	2,1252	219,76	218,8	218,78	3,0626	3,2661	3,3043
14.09.2011	11	14,30	50,00	98	35	0,8	1,6384	1,2504	2,0537	219,76	218,54	219,08	2,9917	3,1338	3,1615
14.09.2011	26	14,45	50,00	97	41	0,77	1,4723	1,2213	1,9025	219,85	218,67	219,33	2,8005	2,9081	2,9578
14.09.2011	91	15,10	50,00	98	47	0,74	1,3598	1,2406	1,8402	222,89	220,05	219,85	2,6956	2,7927	2,7944
14.09.2011	111	15,30	50,00	102	51	0,72	1,3192	1,267	1,8266	224,06	222,24	223,24	2,713	2,8104	2,8699
14.09.2011	113	15,32	50,00	105	52	0,72	1,9481	1,8777	2,7057	223,63	221,02	223,15	4,0061	4,0134	4,1352
14.09.2011	121	15,40	49,98	99	52	0,73	1,3557	1,2706	1,8506	223,63	220,02	223,1	2,7389	2,7523	2,8518
14.09.2011	131	15,50	50,03	98	54	0,72	1,3109	1,2617	1,8289	224,81	222,9	221,58	2,6976	2,7203	2,7781
14.09.2011	181	16,00	50,00	98	55	0,72	1,3162	1,2582	1,8192	224,31	221,76	221,02	2,6642	2,7103	2,7625
14.09.2011	201	16,20	50,00	98	56	0,71	1,2826	1,2526	1,7882	222,91	221,08	2,6202	2,6573	2,7422	
14.09.2011	211	16,30	50,00	98	57	0,72	1,271	1,2362	1,7667	222,54	221,95	222,58	2,6071	2,6301	2,7291
14.09.2011	221	16,40	50,00	97	57	0,72	1,2557	1,2297	1,7627	222	221,61	222,31	2,5942	2,6225	2,7324
14.09.2011	281	17,00	50,00	98	58	0,71	1,2601	1,2398	1,7688	222,64	221,76	222,58	2,5794	2,5828	2,7159
14.09.2011	291	17,10	49,98	99	58	0,71	1,2501	1,2181	1,761	222,2	221,44	222,35	2,5606	2,6025	2,713
14.09.2011	311	17,30	50,00	99	58	0,71	1,2434	1,2364	1,7616	222,73	222,4	223,22	2,5677	2,6081	2,7336
14.09.2011	326	17,45	50,00	99	59	0,71	1,2391	1,2486	1,7559	223,23	222,6	223,15	2,5504	2,6008	2,7322
14.09.2011	381	18,00	50,03	99	59	0,7	1,2429	1,2474	1,7544	223,21	222,91	223,36	2,5535	2,5995	2,7338
14.09.2011	401	18,20	50,00	99	59	0,7	1,2394	1,2567	1,7565	223,32	223,15	223,6	2,5504	2,6081	2,708
14.09.2011	411	18,30	50,00	99	59	0,7	1,2348	1,254	1,7429	222,08	222,6	222,93	2,5709	2,5998	2,6746
14.09.2011	421	18,40	50,00	99	59	0,7	1,2323	1,2303	1,7539	223,32	222,64	223,07	2,5639	2,6201	2,6752

14.09.2011	431	18,50	50,00	100	59	0,7	1,2341	1,2495	1,7513	223,18	222,55	223,1	2,5606	2,6142	2,681
14.09.2011	481	19,00	50,03	100	60	0,69	1,2382	1,2618	1,7609	223,56	223,14	223,5	2,5655	2,6111	2,6846

4. Подшипник 12309КМ. Дефект № 2, 3, в режиме понижения, а затем повышения давления масла в системе смазки (в полости оснастки).

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Время суток, час, мин.	Частота сети, f, Гц	Вибрация, А, Db	Температура, Т, °C	Коэф. мощн. cosφ	Мощн. активн. Р \sum , кВт	Мощн. реакт. Q \sum , кВар	Мощн. мощн. полн. S \sum , кВА	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «б»	Напряжение фазы «с»	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «б»	Напряжение фазы «с»
16.09.2011	0	13,45	49,98	98	29	0,82	1,7312	1,1941	2,1005	220,18	218,17	216,51	3,2242	3,3336	3,3086
16.09.2011	55	14,00	50,00	98	36	0,79	1,5811	1,2004	1,9837	219,87	217,37	215,66	2,9302	3,0486	3,0301
16.09.2011	557	19,02	50,00	98	37	0,79	1,4553	1,1294	1,8422	219,99	218,01	219,51	2,7336	2,8381	2,8339
16.09.2011	558	19,03	50,00	98	38	0,79	1,3471	1,0455	1,7052	220,13	218,36	219,71	2,5400	2,6196	2,6130
16.09.2011	559	19,04	49,98	99	39	0,79	1,2417	0,9637	1,5718	219,10	219,17	219,40	2,3747	2,3951	2,4000
16.09.2011	560	19,05	50,00	100	40	0,79	1,2193	0,9463	1,5434	219,96	217,09	219,45	2,3104	2,3525	2,3900
16.09.2011	561	19,06	50,00	101	41	0,79	1,2018	0,9327	1,5212	220,67	219,38	220,75	2,2304	2,3085	2,3675
16.09.2011	562	19,07	50,03	103	43	0,8	1,6125	1,2378	2,0333	220,59	219,98	219,67	2,9	3,01	3,05
16.09.2011	563	19,08	50,00	103	44	0,8	1,6481	1,2361	2,0601	219,99	218,01	219,51	3,0300	3,1700	3,2000
16.09.2011	564	19,09	50,00	103	44	0,81	1,6829	1,2184	2,0776	220,13	218,36	219,71	3,0700	3,2000	3,2000

5. Новый подшипник конический 6-7506А.

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Время суток, час, мин.	Частота сети, f, Гц	Вибрация, А, Db	Температура, Т, °C	Коэф. мощн. cosφ	Мощн. активн. Р \sum , кВт	Мощн. реакт. Q \sum , кВар	Мощн. мощн. полн. S \sum , кВА	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «б»	Напряжение фазы «с»	Напряжение фазы «а»	Напряжение фазы «б»	Напряжение фазы «с»
16.09.2011	0	14,55	50,00	92	39,00	0,84	1,8342	1,1848	2,1836	221,74	220,38	219,71	3,2328	3,3833	3,2823
16.09.2011	65	15,20	49,98	92	48,00	0,83	1,7257	1,1597	2,0792	223,47	223,64	222,86	3,0500	3,1700	3,0900
16.09.2011	95	15,50	50,00	92	56,00	0,82	1,5279	1,182	1,9294	224,73	222,51	220,81	2,8111	2,9931	2,8687
16.09.2011	145	16,00	50,00	93,5	57,00	0,79	1,5235	1,1915	1,9468	224,4	222,17	220,95	2,8191	2,9339	2,7711
16.09.2011	165	16,20	50,03	93	59,00	0,77	1,4119	1,1819	1,8289	224,73	222,99	221,33	2,7101	2,8138	2,8904
16.09.2011	180	16,35	50,00	93	60,00	0,78	1,4596	1,1739	1,8594	222,41	222,32	222,03	2,7135	2,8101	2,8161
16.09.2011	190	16,45	50,00	93	61,00	0,76	1,3762	1,171	1,7998	223,61	223,51	223,44	2,6321	2,7091	2,7357

16.09.2011	245	17,00	50,00	93	62,00	0,75	1,3144	1,1747	1,7677	223,76	223,28	222,16	2,5814	2,7009	2,6774
16.09.2011	275	17,30	50,00	93	63,00	0,75	1,3399	1,18	1,7878	223,67	223,62	222,84	2,6099	2,6918	2,6415
16.09.2011	345	18,00	50,03	93,4	64	0,73	1,2776	1,1917	1,745	224,34	224,21	223,36	2,5386	2,6492	2,6007
16.09.2011	375	18,30	50,00	93,4	64	0,72	1,2378	1,193	1,7248	224,5	224,09	223,7	2,4839	2,5991	2,5771
16.09.2011	445	19,00	50,00	93,4	64	0,73	1,2802	1,1886	1,7444	224,34	223,32	223,37	2,5215	2,6085	2,6057
16.09.2011	462	19,17	50,00	93,4	64	0,73	1,2634	1,1828	1,7307	224,42	224,21	223,36	2,5218	2,601	2,6037
16.09.2011	463	19,18	50,00	93,4	64	0,73	1,2616	1,1811	1,7282	224,48	224,09	223,71	2,5154	2,5999	2,5966

6. Подшипник конический 6-7506А - дефект № 3.

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Время суток, час, мин.	Частота сети, f, Гц	Вибрация, A, Db	Температура, T, °C	Коэф. мощн. cosφ	Мощн. активн. P Σ , кВт	Мощн. реакт. Q Σ , кВар	Мощн. полн. S Σ , кВА	Напряжение фазы «a» U _a , В	Напряжение фазы «b» U _b , В	Напряжение фазы «c» U _c , В	Напря фазы «a» I _a , А	Напря фазы «b» I _b , А	Напря фазы «c» I _c , А
21.09.2011	0	10,53	50,00	94,2	34	0,84	1,8503	1,1952	2,2028	224,73	222,51	220,81	3,2733	3,3561	3,2625
21.09.2011	1	10,54	50,00	94,2	35	0,84	2,0642	1,3333	2,4573	224,4	222,17	220,95	3,6604	3,7269	3,6566
21.09.2011	2	10,55	50,00	94,2	36	0,84	1,9690	1,2719	2,3441	224,73	222,99	221,33	3,4899	3,5626	3,4548
21.09.2011	47	11,00	49,98	94,2	37	0,84	1,9025	1,2219	2,2633	224,08	221,46	220,04	3,324	3,4405	3,311
21.09.2011	52	11,05	50,00	94,2	40	0,83	1,8003	1,2021	2,1857	224,23	222,51	220,66	3,2264	3,333	3,2729
21.09.2011	57	11,10	50,00	94,2	44	0,83	1,7722	1,2216	2,1401	224,59	222,9	220,99	3,0994	3,1809	3,0954
21.09.2011	67	11,20	50,00	94,4	47	0,8	1,5977	1,1982	2,0005	225,01	222,78	221,9	2,9109	3,0078	2,9333
21.09.2011	77	11,30	50,00	94,4	50	0,79	1,5036	1,169	1,9238	224,12	221,92	220,55	2,8318	2,948	2,8774
21.09.2011	87	11,40	50,00	94,4	51	0,77	1,4239	1,1617	1,8309	222,77	221,34	219,27	2,6962	2,793	2,7475
21.09.2011	97	11,50	49,98	94,4	53	0,79	1,4776	1,1651	1,884	222,02	222,85	222,21	2,7909	2,8271	2,8149
21.09.2011	177	12,30	50,03	94,4	60	0,75	1,3637	1,1707	1,7837	222,31	222,07	222,55	2,6032	2,6245	2,6395
21.09.2011	197	12,50	50,00	94,4	60	0,74	1,3029	1,1495	1,7308	221,57	221,77	221,71	2,5634	2,59	2,6069

7. Подшипник конический 6-7506А - дефект № 4.

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Время суток, час, мин.	Частота сети, f, Гц	Вибрация, А, Db	Температура, T, °C	Коэф. мощн. cosφ	Мощн. активн. P Σ , кВт	Мощн. реакт. Q Σ , кВар	Мощн. полн. S Σ , кВА	Напряжение фазы «а» U _a , В	Напряжение фазы «б» U _b , В	Напряжение фазы «в» U _c , В	Напряжение фазы «а» I _a , А	Напряжение фазы «б» I _b , А	Напряжение фазы «в» I _c , А
22.09.2011	0	12,00	50,00	102	34	0,82	1,8346	1,2806	2,2373	219,05	219,96	3,4199	3,4518	3,2966	
22.09.2011	10	12,10	50,00	103,8	36	0,8	1,7127	1,2845	2,1409	221,23	219,71	220,81	3,2975	3,256	3,1519
22.09.2011	20	12,20	50,00	103,5	40	0,78	1,5090	1,2107	1,9346	220,16	219,75	3,0183	2,9241	2,8588	
22.09.2011	30	12,30	49,99	103,2	44	0,76	1,4389	1,2305	1,8933	220,83	219,81	219,75	2,9645	2,8672	2,7688
22.09.2011	40	12,40	50,00	103	46	0,75	1,3633	1,2023	1,8177	221,6	219,18	218,16	2,8539	2,771	2,649
22.09.2011	50	12,50	50,00	102,8	48	0,73	1,2980	1,2152	1,7781	221,98	219,11	217,56	2,7958	2,723	2,5777
22.09.2011	100	13,00	50,00	102,6	50	0,73	1,2831	1,2013	1,7577	221,67	219,08	218,2	2,7378	2,708	2,5552
22.09.2011	110	13,10	50,00	102,1	52	0,72	1,2473	1,2022	1,7324	221,86	219,05	217,84	2,6844	2,6665	2,5388
22.09.2011	120	13,20	50,00	102	54	0,71	1,2222	1,2123	1,7215	220,36	218,66	218,64	2,6516	2,652	2,5488
22.09.2011	130	13,30	50,00	102	54	0,71	1,2986	1,2880	1,8290	219,11	218,55	217,11	2,8256	2,8386	2,7151

7. Подшипник конический 6-7506А. Дефект № 3, 4, в режиме понижения, а затем повышения давления масла в системе смазки (в полости оснастки).

Дата	Продолжительность испытаний, t, минуты	Частота сети, f, Гц	Вибрация, А, Db	Температура, T, °C	Коэф. мощн. cosφ	Мощн. активн. P Σ , кВт	Мощн. реакт. Q Σ , кВар	Мощн. полн. S Σ , кВА	Напряжение фазы «а» U _a , В	Напряжение фазы «б» U _b , В	Напряжение фазы «в» U _c , В	Напряжение фазы «а» I _a , А	Напряжение фазы «б» I _b , А	Напряжение фазы «в» I _c , А	
23.09.2011	0	12,00	50,00	102	35	0,83	1,9521	1,3118	2,3519	222,31	222,07	221,55	3,4675	3,6272	3,485
23.09.2011	10	12,10	50,00	103	37	0,82	1,6869	1,1775	2,0572	221,57	221,77	221,71	3,06	3,18	3,04
23.09.2011	20	12,20	50,00	103	40	0,83	1,6420	1,1035	1,9784	221,34	221,46	220,3	2,94	3,0654	2,9449
23.09.2011	30	12,30	50,00	103	46	0,83	1,3860	0,9314	1,6699	221,8	220,64	221,11	2,5	2,56	2,49

Примечание. Расшифровка условных единиц.

Ia - ток протекающий в фазе «а» привода испытательной установки, A; Ib - ток протекающий в фазе «в» привода испытательной установки, A; Ic - ток протекающий в фазе «с» привода испытательной установки, A; P Σ - активная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; S Σ - полная мощность потребляемая испытательной установкой, кВт; Q Σ - реактивная мощность потребляемая испытательной установкой, кВар.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программы имитации измерительной информации

M := READPRN("Cg2.txt")

t := M⁽¹⁾

U := M⁽²⁾

N := 123

$$mU := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k$$

$$DU := \frac{1}{N-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^{N-1} (U_k - mU)^2 \right]$$

mU = 384.479

DU = 0.513

k := 0.. 0.8N t_k := 360 · k

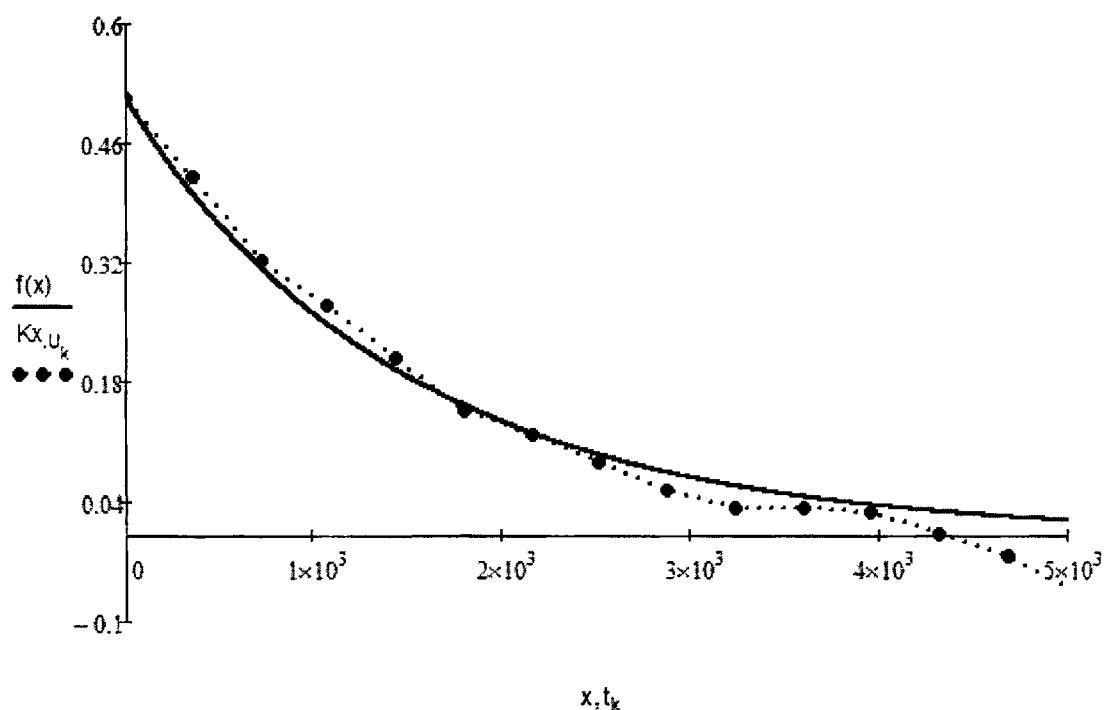
$$Kx_{U_k} := \frac{1}{123-k-1} \left[\sum_{i=0}^{123-k-1} [(U_i - mU) \cdot (U_{i+k} - mU)] \right]$$

T_α := 1470

$$\alpha := \frac{1}{T_\alpha} = 6.803 \times 10^{-4}$$

x := 0, 0.1.. 10000

$$f(x) := DU \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$



$M := \text{READPRN}("P.txt")$

$t := M^{(1)}$

$I := M^{(2)}$

$N := 122$

$$mI := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N I_k$$

$$DI := \frac{1}{N-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^N (I_k - mI)^2 \right]$$

$mI = 1.63$

$DI = 0.35$

$$k := 0..0.8N \quad t_k := 360 \cdot k$$

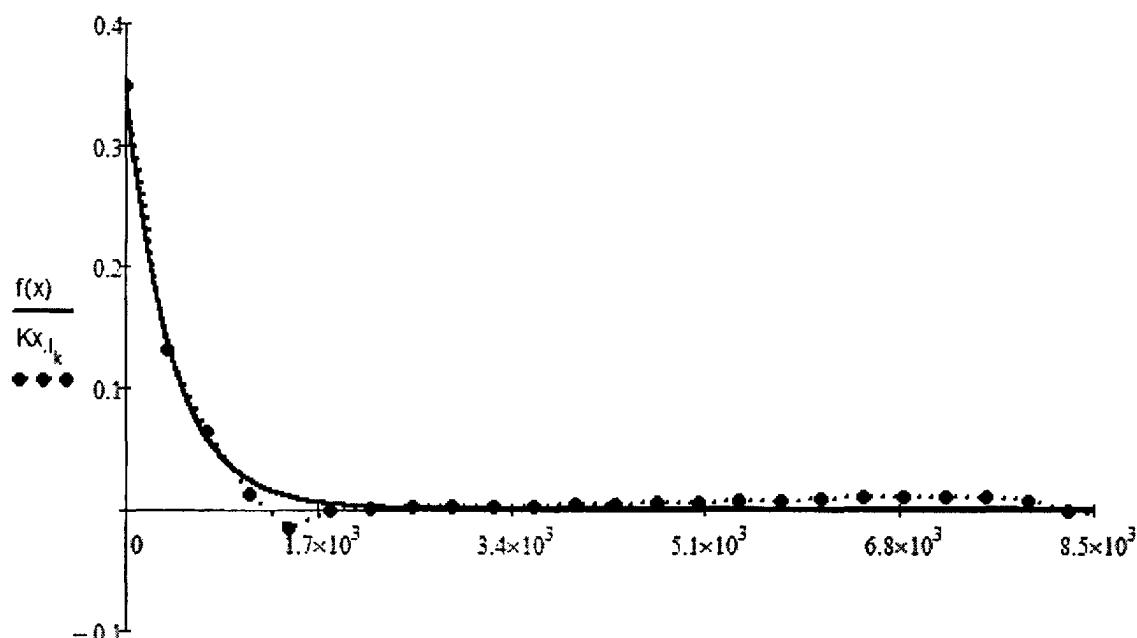
$$Kx_{l,k} := \frac{1}{122 - k - 1} \left[\sum_{i=0}^{122-k-1} [(l_i - m) \cdot (l_{i+k} - m)] \right]$$

$$T\alpha := 400$$

$$\alpha := \frac{1}{T\alpha} = 2.5 \times 10^{-3}$$

$$x := 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := Dl \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$



x, t_k

M := READPRN("cos.txt")

t := M⁽¹⁾

cos := M⁽²⁾

|

$$N := 122$$

$$mcos := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N cos_k$$

$$Dcos := \frac{1}{N-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^{N-1} (cos_k - mcos)^2 \right]$$

$$mcos = 0.836$$

$$Dcos = 1.19 \times 10^{-3}$$

$$k := 0..0.8N \quad t_k := 360 \cdot k$$

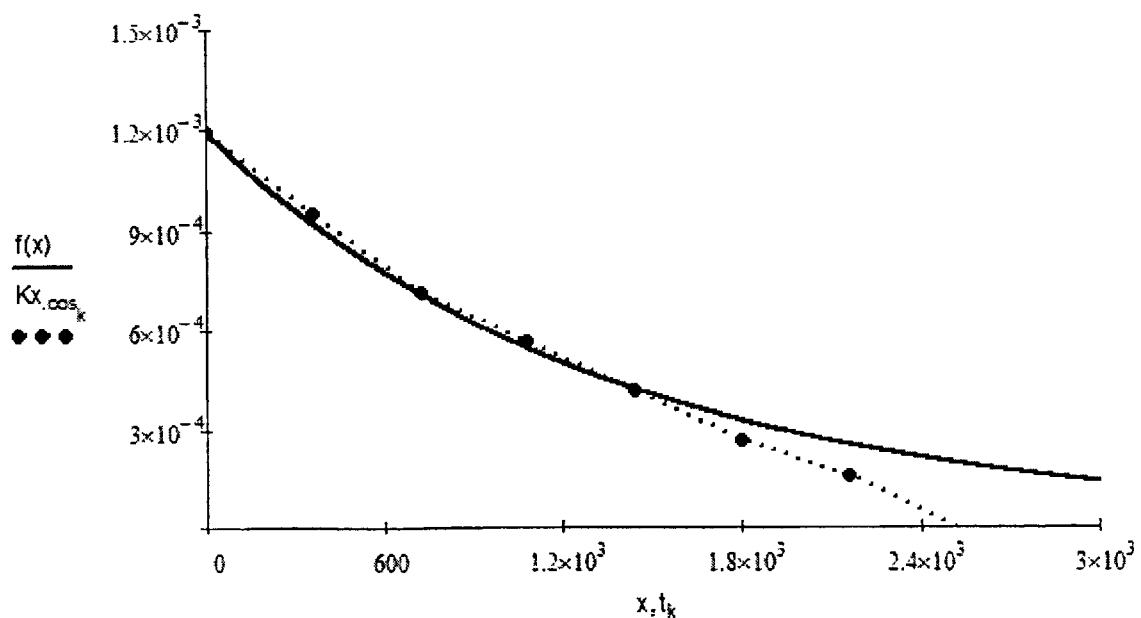
$$Kx_{cos_k} := \frac{1}{122-k-1} \left[\sum_{i=0}^{122-k-1} [(cos_i - mcos) \cdot (cos_{i+k} - mcos)] \right]$$

$$T_\alpha := 1390$$

$$\alpha := \frac{1}{T_\alpha} = 7.194 \times 10^{-4}$$

$$x := 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := Dcos \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$



```

B1 := ( 83  83.11  81  80.9  79  84.5  83  85  82.89  77.41  76  79  80.94  78  79  83  83.11  80
m := cols(B1)
i := 1.. m
B := B1T
Δt := 0.5
ti := i · Δt

```

$$\begin{aligned}
N &:= 120 \\
mB &:= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N B_k \\
DB &:= \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^N (B_k - mB)^2
\end{aligned}$$

$$mB = 77.441$$

$$DB = 10.582$$

$$k := 0..0.8N \quad t_k := 360 \cdot k$$

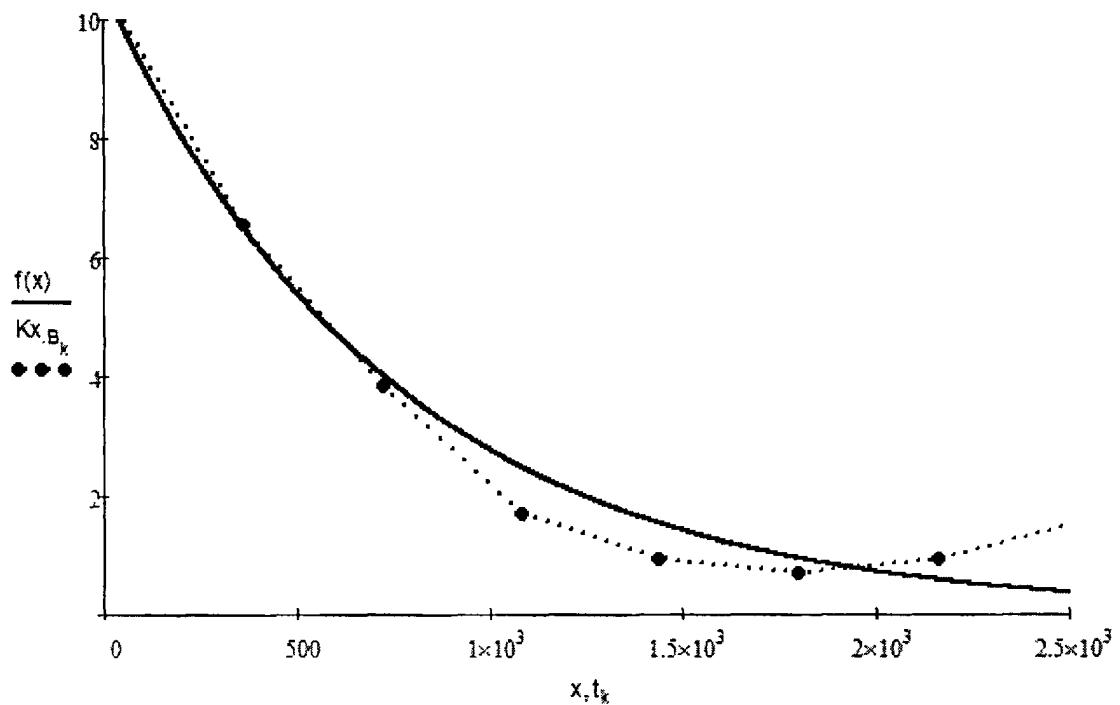
$$Kx_{B_k} := \frac{1}{120 - k - 1} \left[\sum_{j=0}^{120-k-1} [(B_j - mB) \cdot (B_{j+k} - mB)] \right]$$

$$T\alpha := 740$$

$$\alpha := \frac{1}{T\alpha} = 1.351 \times 10^{-3}$$

$$x := 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := DB \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Программы имитации сигналов и проверки адекватности моделей сигналов

Моделирование сигнала напряжения:

$$T_f := 30 \quad N := 123$$

$$T_d := 30 \quad t_d := 1$$

$$q := 1$$

$$T_s := 2$$

$$t_0 := 1$$

```
Y2 := | for i ∈ 1..N
      |   xi ← rnd(1) · 0.083
      |   y1 ← 0
      |   for i ∈ 1..N - 1
      |     yi+1 ← yi + (xi - yi) · 1/9
      |   for i ∈ 1..N
      |     Y2i ← (yi) · √{2 · 1/α1 · D1 / 0.083} + μ1
      |   Y2
```

Моделирование сигнала силы тока:

$$T_f := 30 \quad N := 123$$

$$T_d := 30 \quad t_a := 1$$

$$T_w := 2 \quad Q := 1$$

$$t_0 := 1$$

```
Y3 := | for i ∈ 1..N
      |   x_i ← rnd(1) · 0.083
      |   y_1 ← 0
      |   for i ∈ 1..N - 1
      |     y_{i+1} ← y_i + (x_i - y_i) · 1/10
      |   for i ∈ 1..N
      |     Y3_i ← {y_i} · √{2 · 1/alpha_2 · D_2 / 0.083} + mu_2
      |   Y3
```

Моделирование сигнала $\cos \phi$:

$T_e := 30$ $t_0 := 1$
 $T_d := 30$ $N := 123$
 $T_w := 2$ $t_1 := 1$
 $g := 1$

$Y4 := \begin{cases} \text{for } i \in 1..N \\ \quad x_i \leftarrow md(1) \cdot 0.083 \\ \quad y_1 \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } i \in 1..N-1 \\ \quad \quad y_{i+1} \leftarrow y_i + (x_i - y_i) \cdot \frac{1}{5} \\ \quad \text{for } i \in 1..N \\ \quad \quad Y4_i \leftarrow (y_i) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{1}{\alpha_3} \cdot D_3}{0.083}} + \mu_3 \\ \end{cases}$
 $Y4$

Моделирование сигнала вибрации:

$T_e := 30$ $N := 300$
 $T_d := 30$ $t_0 := 1$
 $T_w := 2$
 $t_1 := 1$

$Y1 := \begin{cases} \text{for } i \in 1..N \\ \quad x_i \leftarrow md(1) \cdot 0.083 \\ \quad y_1 \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } i \in 1..N-1 \\ \quad \quad y_{i+1} \leftarrow y_i + (x_i - y_i) \cdot \frac{1}{10} \\ \quad \text{for } i \in 1..N \\ \quad \quad Y1_i \leftarrow (y_i) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{1}{\alpha_4} \cdot D_4}{0.083}} + \mu_4 \\ \end{cases}$
 $Y1$

Проверка адекватности по напряжению:

$M := \text{READPRN}("Cg2.txt")$

$t := M^{(1)}$

$U := M^{(2)}$

$N := 123$

$$mU := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k$$

$$DU := \frac{1}{N-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^{N-1} (U_k - mU)^2 \right]$$

$$mU = 384.479$$

$$DU = 0.513$$

$$k := 0..0.8N$$

$$t_k := 360 \cdot k$$

$$Kx_{U_k} := \frac{1}{123-k-1} \left[\sum_{i=0}^{123-k-1} [(U_i - mU) \cdot (U_{i+k} - mU)] \right]$$

$$T\alpha := 1470$$

$$\alpha := \frac{1}{T\alpha} = 6.803 \times 10^{-4}$$

$$x := 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := DU \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

$i := 1..N$

$$MU := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Y2_i$$

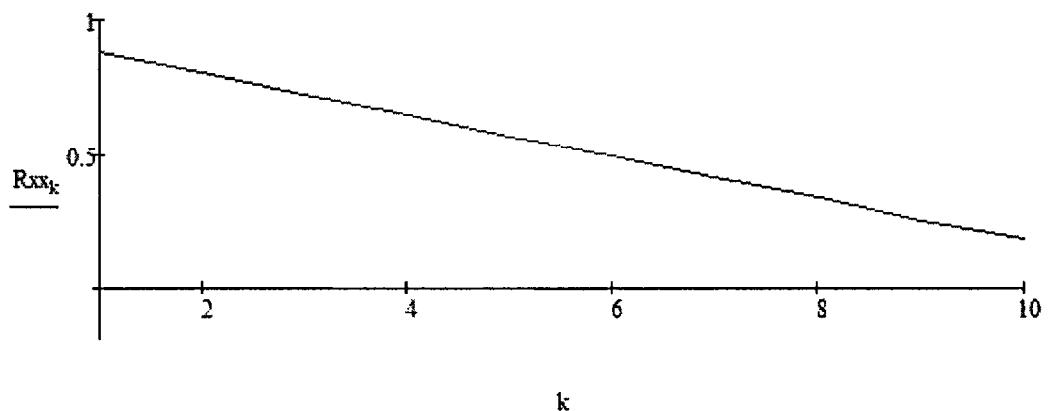
$$\sigma_U := \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (MU - Y2_i)^2$$

$$MU = 384.695$$

$$\sigma_U = 0.522$$

$k := 1..0.8 \cdot N$

$$R_{xx_k} := \frac{N-1}{N-k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [(Y2_i - MU) \cdot (Y2_{i+k} - MU)]}{\sum_{i=1}^N (Y2_i - MU)^2}$$



$k := 1..0.8 \cdot N$

$Y := \begin{cases} p \leftarrow 0 \\ N \leftarrow 123 \\ \text{for } k \in 1..0.8 \cdot N \\ \quad p \leftarrow p + 1 \text{ if } R_{xx_k} > 0.05 \\ \end{cases}$
p

$t0 := 1$

$\underline{k_m} := Y$

$k_m = 38$

$R_{xx_{k,m}} := 0.05$

$\tau_{km} := k_m \cdot t0$

$T_{km} := \tau_{km} \cdot 100$

$\underline{t0} := \frac{\tau_{km}}{100}$

$N1 := 123$

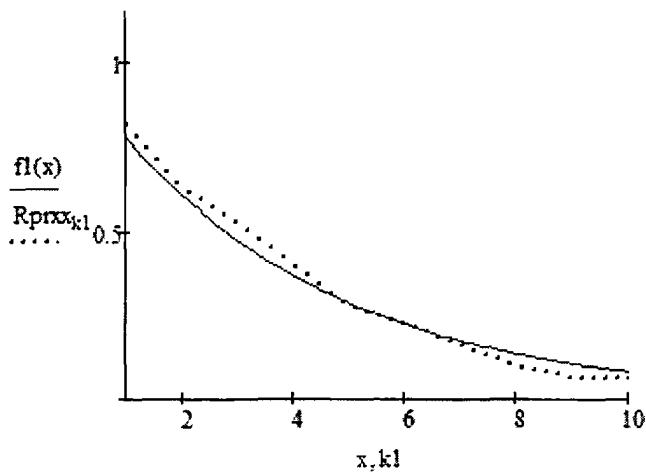
$k1 := 1..40$

$$R_{pxx_{k1}} := \frac{N1 - 1}{N1 - k1 - 1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N1-k1} [(U_i - mU) \cdot (U_{i+k1} - mU)]}{\sum_{i=1}^{N1} (U_i - mU)^2}$$

$\alpha1 := 0.25$

$x := 1..1..40$

$f1(x) := e^{-\alpha1 \cdot x}$



```
X := | p ← 0
      | N ← 50
      | for k1 ∈ 1..0.8 · N
      |   p ← p + 1 if Rpxxk1 > 0.05
      |
      | p
```

$$k_{0.5} := X$$

$$k_{0.5} = 11$$

$$\tau_{k0.5} := k_{0.5} \cdot t_0$$

$$\tau_{k0.5} = 4.18$$

$$T_{k0.5} := \tau_{k0.5} \cdot 100$$

$$T_{k0.5} = 418$$

$$\sigma_m := \sqrt{\frac{\sigma U}{N} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{km} \left[\left(1 - \frac{i}{N} \right) \cdot R_{xi} \right] \right]}$$

$$\sigma_m = 0.127$$

$$t := \frac{|MU - mU|}{\sigma_m}$$

$$t = 1.709$$

$$\nu := \frac{2 \cdot N}{km}$$

$$\nu = 6.474$$

$$t_M := 2.447$$

$$F := \frac{\max(\sigma U, DU)}{\min(\sigma U, DU)}$$

Проверка адекватности по току:

$M := \text{READPRN}("P.txt")$

$t := M^{(1)}$

$I := M^{(2)}$

$N := 122$

$$m_l := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N I_k$$

$$DI := \frac{1}{N-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^N (I_k - m_l)^2 \right]$$

$$m_l = 1.63$$

$$DI = 0.35$$

$$k := 0..0.8N$$

$$t_k := 360 \cdot k$$

$$Kx_{l_k} := \frac{1}{122 - k - 1} \left[\sum_{i=0}^{122-k-1} [(I_i - m_l) \cdot (I_{i+k} - m_l)] \right]$$

$$T_\alpha := 400$$

$$\alpha := \frac{1}{T_\alpha} = 2.5 \times 10^{-3}$$

$$x := 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := DI \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

$i := 1..N$

$$MI := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Y3_i$$

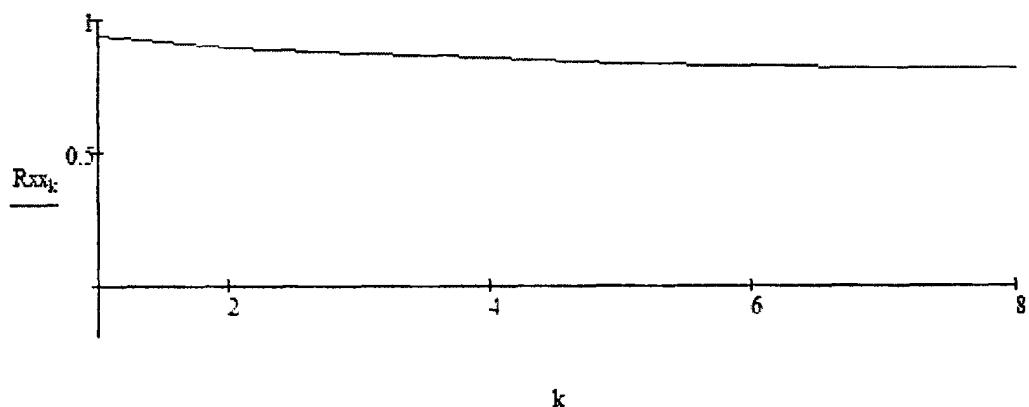
$$\sigma I := \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (MI - Y3_i)^2$$

$$MI = 1.636$$

$$\sigma I = 0.33$$

$k := 1..0.8 \cdot N$

$$Rxx_k := \frac{N-1}{N-k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [(Y3_i - MI) \cdot (Y3_{i+k} - MI)]}{\sum_{i=1}^N (Y3_i - MI)^2}$$



$k := 1..0.8 \cdot N$

$\begin{aligned} Y := & \left| \begin{array}{l} p \leftarrow 0 \\ N \leftarrow 123 \\ \text{for } k \in 1..0.8 \cdot N \\ \quad p \leftarrow p + 1 \text{ if } R_{xx_k} > 0.05 \\ \end{array} \right| \\ & p \end{aligned}$

$t0 := 1$

$km := Y$

$km = 90$

$R_{xx_{km}} := 0.05$

$T_{km} := km \cdot t0$

$T_{km} := T_{km} \cdot 100$

$t0 := \frac{T_{km}}{100}$

$t0 = 0.9$

$N1 := 121$

$k1 := 1..40$

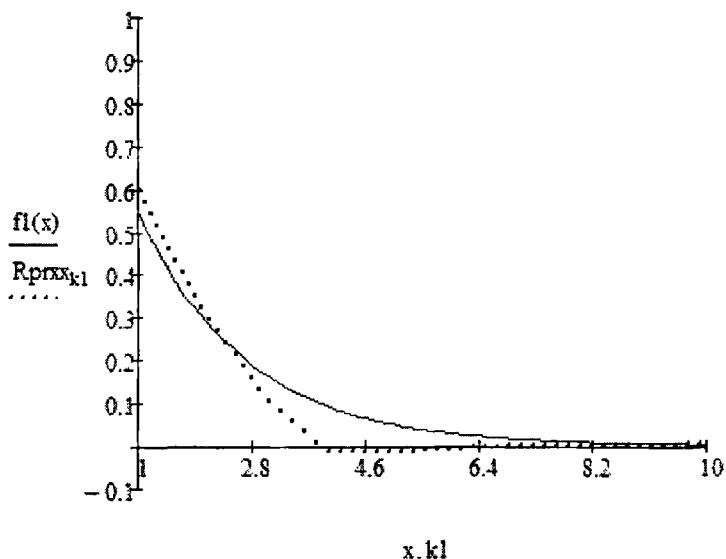
$i := 1..N$

$$R_{pxx_{k1}} := \frac{N1 - 1}{N1 - k1 - 1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N1-k1} [(I_i - mI) \cdot (I_{i+k1} - mI)]}{\sum_{i=1}^{N1} (I_i - mI)^2}$$

$\alpha1 := 0.6$

$x := 1, 1..40$

$f1(x) := e^{-\alpha1 \cdot x}$



```
X := | p ← 0
      | N ← 50
      | for k1 ∈ 1..0.8 · N
      |   p ← p + 1 if Rpxxk1 > 0.05
      |
      | p
```

$k_{0.5} := X$

$k_{0.5} = 3$

$T_{k0.5} := k_{0.5} \cdot t_0$

$\tau_{k0.5} = 2.7$

$T_{k0.5} := \tau_{k0.5} \cdot 100$

$T_{k0.5} = 270$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sigma I}{N} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{33} \left[\left(1 - \frac{i}{N} \right) \cdot R_{xx_i} \right] \right]}$$

$\sigma_m = 0.358$

$$t := \frac{|MI - mI|}{\sigma_m}$$

$t = 0.016$

$$\nu = 2.733$$

$$t_{\text{av}} := 4.033$$

$$F := \frac{\max(\sigma I, D)}{\min(\sigma I, D)}$$

Проверка адекватности по $\cos \varphi$:

$$M := \text{READPRN}("cos.txt")$$

$$t := M^{(1)}$$

$$\cos := M^{(2)}$$

|

$$N := 122$$

$$m\cos := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N \cos_k$$

$$D\cos := \frac{1}{N-1} \cdot \left[\sum_{k=1}^N (\cos_k - m\cos)^2 \right]$$

$$m\cos = 0.836$$

$$D\cos = 1.19 \times 10^{-3}$$

$$k := 0..0.8N$$

$$t_k := 360 \cdot k$$

$$Kx_{\cos_k} := \frac{1}{122-k-1} \left[\sum_{i=0}^{122-k-1} [(\cos_i - m\cos) \cdot (\cos_{i+k} - m\cos)] \right]$$

$$T_{\alpha} := 1390$$

$$\alpha := \frac{1}{T_{\alpha}} = 7.194 \times 10^{-4}$$

$$x := 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := D\cos \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

$i := 1..N$

$$Mcos := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Y4_i$$

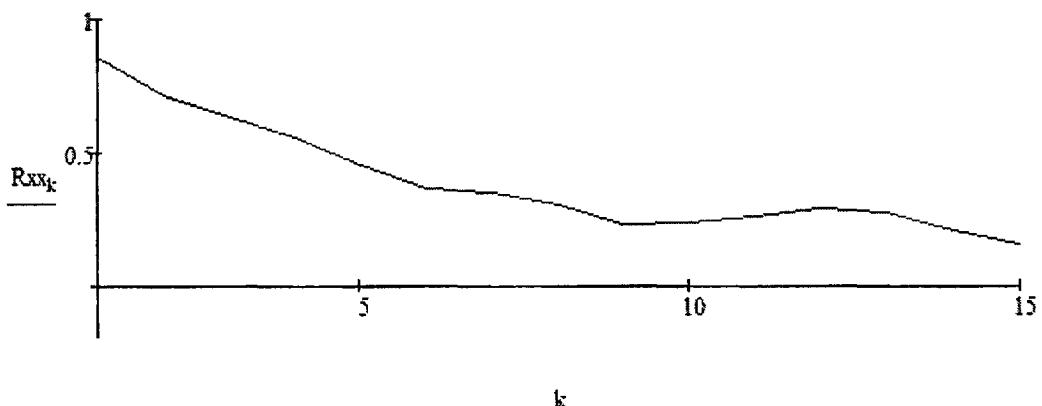
$$\sigma cos := \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (Mcos - Y4_i)^2$$

$$Mcos = 0.839$$

$$\sigma cos = 1.19 \times 10^{-3}$$

$k := 1..0.8 \cdot N$

$$Rxx_k := \frac{N-1}{N-k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [(Y4_i - Mcos) \cdot (Y4_{i+k} - Mcos)]}{\sum_{i=1}^N (Y4_i - Mcos)^2}$$



$k := 1..0.8 \cdot N$

$\begin{aligned} Y := & \left| \begin{array}{l} p \leftarrow 0 \\ N \leftarrow 123 \\ \text{for } k \in 1..0.8 \cdot N \\ \quad p \leftarrow p + 1 \text{ if } R_{xx_k} > 0.05 \end{array} \right| \\ & p \end{aligned}$

$t0 := 1$

$km := Y$

$km = 51$

$R_{xx_{km}} := 0.05$

$T_{km} := km \cdot t0$

$T_{km} := T_{km} \cdot 100$

$t0 := \frac{T_{km}}{100}$

$t0 = 0.51$

$N1 := 121$

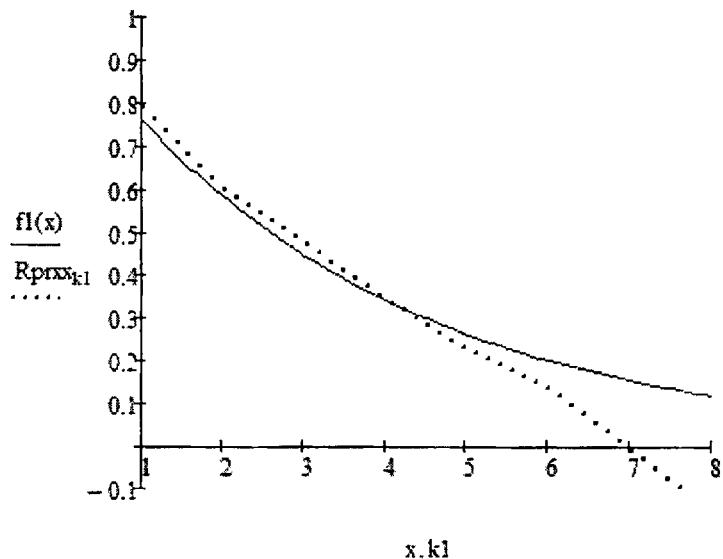
$k1 := 1..40$

$$R_{pxx_{k1}} := \frac{N1 - 1}{N1 - k1 - 1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N1-k1} [(\cos_i - m\cos) \cdot (\cos_{i+k1} - m\cos)]}{\sum_{i=1}^{N1} (\cos_i - m\cos)^2}$$

$\alpha1 := 0.27$

$x := 1..1..40$

$f1(x) := e^{-\alpha1 \cdot x}$



```

X := 
  ⎛ p ← 0
  ⎛ N ← 50
  ⎛ for k1 ∈ 1..0.8 · N
  ⎛   p ← p + 1 if Rpxxk1 > 0.05
  ⎝ p

```

$k_{0.5} := X$

$k_{0.5} = 20$

$T_{k0.5} := k_{0.5} \cdot t_0$

$T_{k0.5} = 10.2$

$T_{k0.5} := T_{k0.5} \cdot 100$

$T_{k0.5} = 1.02 \times 10^3$

$$\sigma_m := \sqrt{\frac{\sigma_{cos}}{N} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{km} \left[\left(1 - \frac{i}{N} \right) \cdot R_{xx_i} \right] \right]}$$

$$\sigma_m = 9.773 \times 10^{-3}$$

$$t := \frac{|M_{cos} - m_{cos}|}{\sigma_m}$$

$$t = 0.317$$

$$\frac{V}{\lambda} := \frac{2 \cdot N}{km}$$

$$\nu = 4.824$$

$$\frac{V}{\lambda} := 2.776$$

$$F := \frac{\max(\sigma \cos, D \cos)}{\min(\sigma \cos, D \cos)}$$

Проверка адекватности по вибрации:

$$B1 := (83 \ 83.11 \ 81 \ 80.9 \ 79 \ 84.5 \ 83 \ 85 \ 82.89 \ 77.41 \ 76 \ 79 \ 80.94 \ 78 \ 79 \ 83 \ 83.11 \ 80)$$

$$m := \text{cols}(B1)$$

$$i := 1..m$$

$$B := B1^T$$

$$\Delta t := 0.5$$

$$t_i := i \cdot \Delta t$$

$$N := 120$$

$$m_B := \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N B_k$$

$$D_B := \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^N (B_k - m_B)^2$$

$$m_B = 77.441$$

$$D_B = 10.582$$

$$k := 0..0.8N$$

$$t_k := 360 \cdot k$$

$$Kx_{B_k} := \frac{1}{120 - k - 1} \left[\sum_{j=0}^{120-k-1} [(B_j - m_B) \cdot (B_{j+k} - m_B)] \right]$$

$$T_\alpha := 740$$

$$\alpha := \frac{1}{T_\alpha} = 1.351 \times 10^{-3}$$

$$x \approx 0, 0.1..10000$$

$$f(x) := D_B \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

$$i := 1..N$$

$$MB := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N Y1_i$$

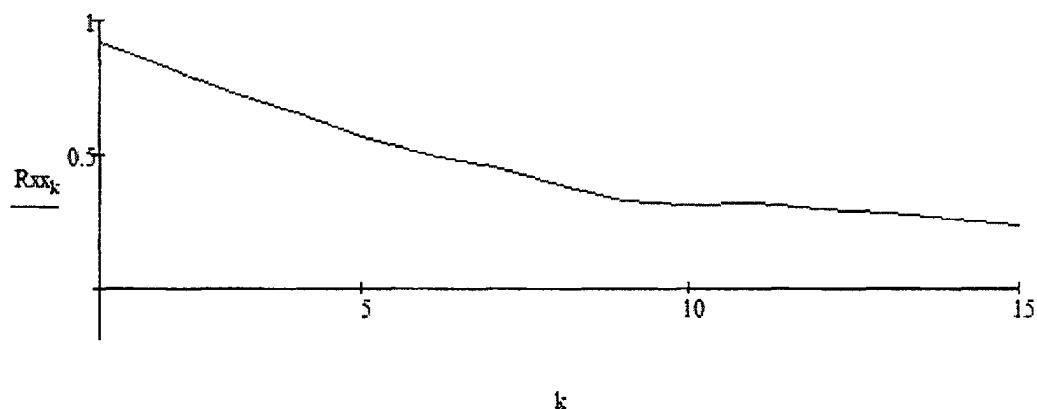
$$\sigma_B := \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (MB - Y1_i)^2$$

$$MB = 78.69$$

$$\sigma_B = 10.07$$

$$k := 1..0.8 \cdot N$$

$$Rxx_k := \frac{N-1}{N-k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [(Y1_i - MB) \cdot (Y1_{i+k} - MB)]}{\sum_{i=1}^N (Y1_i - MB)^2}$$



$$k := 1..0.8 \cdot N$$

$$Y := \begin{cases} p \leftarrow 0 \\ N \leftarrow 123 \\ \text{for } k \in 1..0.8 \cdot N \\ \quad p \leftarrow p + 1 \text{ if } Rxx_k > 0.05 \\ p \end{cases}$$

$$t0 := 1$$

$$km := Y$$

$$km = 46$$

$$Rxx_{k, \text{min}} := 0.05$$

$$\tau_{km} := km \cdot t0$$

$$Tkm := \tau_{km} \cdot 100$$

$$t_0 := \frac{\tau_{km}}{100}$$

$$t_0 = 0.46$$

$$N1 := 121$$

$$k1 := 1..40$$

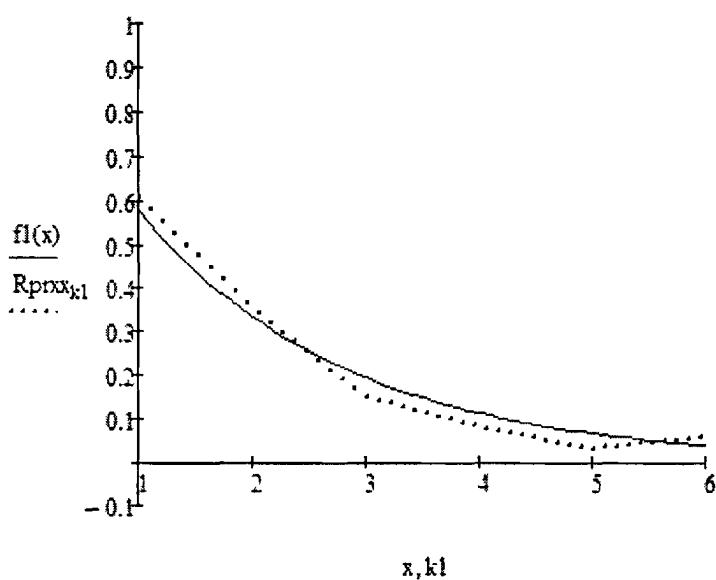
$$i := 1..N$$

$$R_{prox_{k1}} := \frac{N1 - 1}{N1 - k1 - 1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N1-k1} [(B_i - mB) \cdot (B_{i+k1} - mB)]}{\sum_{i=1}^{N1} (B_i - mB)^2}$$

$$\alpha_1 := 0.55$$

$$x := 1, 1..40$$

$$f_1(x) := e^{-\alpha_1 \cdot x}$$



```


$$\begin{aligned} X := & \left| \begin{array}{l} p \leftarrow 0 \\ N \leftarrow 50 \\ \text{for } k1 \in 1..0.8 \cdot N \\ \quad p \leftarrow p + 1 \text{ if } R_{\text{prox}}_{k1} > 0.05 \end{array} \right| \\ & p \end{aligned}$$


```

$$k_{0.5} := X$$

$$k_{0.5} = 13$$

$$T_{k0.5} := k_{0.5} \cdot t_0$$

$$T_{k0.5} = 5.98$$

$$T_{k0.5} := T_{k0.5} \cdot 100$$

$$T_{k0.5} = 598$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sigma_B}{N} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{91} \left[\left(1 - \frac{i}{N} \right) \cdot R_{xx_i} \right] \right]}$$

$$\sigma_m = 0.939$$

$$t := \frac{|MB - mB|}{\sigma_m}$$

$$t = 1.33$$

$$M := \frac{2 \cdot N}{km}$$

$$\nu = 5.217$$

$$t_{k0.5} := 4.303$$

$$F := \frac{\max(\sigma_B, DB)}{\min(\sigma_B, DB)}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Оптимизация затрат на эксплуатацию роторного оборудования [78]

$$N := 120$$

Напряжение роторного оборудования, В:

$$mU := 384.479$$

$$M := \text{READPRN}("Cg2.txt")$$

$$t := M^{(1)}$$

$$U_1 := M^{(2)}$$

$$U_i := \frac{U_1}{1000}$$

Сила тока роторного оборудования, А:

$$mI := 1.63$$

$$M := \text{READPRN}("P.txt")$$

$$t := M^{(1)}$$

$$I := M^{(2)}$$

$$I_1 := I_2$$

$\cos \phi$:

$$mCosphi := 0.836$$

$$M := \text{READPRN}("cos.txt")$$

$$t := M^{(1)}$$

$$\cos := M^{(2)}$$

Активная мощность роторного оборудования, кВт:

$$mP := \frac{\sqrt{3} \cdot mU \cdot mI \cdot mCosphi}{1000}$$

$$mP = 0.907$$

$$P_i := \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1i} \cdot I_i \cdot \cos_i}{1000}$$

Реактивная мощность роторного оборудования, кВар:

$$mQ := \frac{\sqrt{3} \cdot mU \cdot mI \cdot \sqrt{1 - m\cos\phi^2}}{1000}$$

$$mQ = 0.596$$

$$Q_i := \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1i} \cdot I_i \cdot \sqrt{1 - (\cos_i)^2}}{1000}$$

Сопротивление роторного оборудования, кОм:

$$I_1 = I_2$$

$$mR := \frac{mU}{mI \cdot 1000}$$

$$mR = 0.236$$

$$R_i := \frac{U_{1i}}{I_i \cdot 1000}$$

Время работы роторного оборудования, сутки:

$$T_w := 200$$

$$Trd := 1..T$$

Доля потерь вносимой дефектом роторного оборудования:

$$d_x := 0.3$$

Потеря электроэнергии за одни сутки, кВТч:

$$dW_i := \frac{(P_i)^2 + (Q_i)^2}{(U_i)^2} \cdot R_i \cdot 24 \cdot [d_x + (1 - d_x) \cdot 0.9]$$

Потеря электроэнергии за определенное количество суток, кВТч:

$$\Delta W_{Trd,i} := (Trd \cdot dW_i)$$

$$W(U, P, Q, R) := \begin{cases} d_x \leftarrow 0.3 \\ \text{for } i \in 1..N \\ \quad \text{for } Trd \in 1..T \\ \quad \Delta W_{i, Trd} \leftarrow \frac{(P_i)^2 + (Q_i)^2}{(U_i)^2} \cdot R_i \cdot Trd \cdot 24 \cdot [d_x + (1 - d_x) \cdot 0.9] \\ \Delta W \end{cases}$$

Стоимость электроэнергии за 1 кВтч, руб.:

$$c := 4.5$$

Потеря электроэнергии при отсутствии дефектов в подшипнике, кВтч:

$$W_0(U, P, Q, R) := \begin{cases} d_x \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..N \\ \quad \text{for } T_{pd} \in 1..T \\ \quad \Delta W_{0,i,T_{pd}} \leftarrow \frac{(P_i)^2 + (Q_i)^2}{(U_i)^2} \cdot R_i \cdot T_{pd} \cdot 24 \cdot [d_x + (1 - d_x) \cdot 0.9] \\ \Delta W_0 \end{cases}$$

Стоимость оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб.:

$$cW_{TpD} := (w(U, P, Q, R)_{TpD} - w_0(U, P, Q, R)_{TpD}) \cdot c$$

Стоимость ремонтных работ, руб.:

$$cR_1 := 1000$$

Разница между стоимостью ремонтных работ и стоимостью оплаты повышенных потерь электрической энергии, руб.:

$$\Delta c_{TpD} := cR_1 - cW_{TpD}$$