

ях. В этом случае все отчеты выводятся путем суммирования для всей совокупности изображений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вудраф Д., Делчар Т., Современные методы исследования поверхности. – М.: Мир, 1989. – 568 с. 2. Методы анализа поверхности / Под ред. А.Задерны. – М.: Мир, 1979. – 582 с. 3. Нефедов В.И. Черепин В.Т. Физические методы исследования поверхности твердых тел. – М.: Наука, 1983. – 296 с.

УДК 621.313

Л.И. Гречихин В.Б. Тимошевич

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В МАШИНОСТРОЕНИИ ПУТЕМ АНАЛИЗА ГЕНЕРИРУЕМОГО РАДИОШУМА**

*Белорусская государственная политехническая академия  
Минск, Беларусь*

Радиоизлучение промышленных объектов или промышленные радишумы чаще всего рассматриваются как явление, мешающее обеспечению надежной радиосвязи. Исследования шумов проводились ранее с целью определения методов их наиболее эффективного ослабления и подавления. При этом физические причины их формирования глубоко не вскрывались, так как поставленные задачи этого не требовали. В условиях возросших требований к надежности контроля технологических процессов с целью удержания их в оптимальных режимах и экономии средств на послеаварийный и текущий ремонт промышленные радишумы приобретают другую значимость, так как являются новым надежным источником информации о состоянии технологических процессов. Дистанционное получение и обработка радиосигнала излучаемого промышленными объектами позволяет не вводить конструктивных изменений в технологическую оснастку и обеспечивает непрерывную техническую диагностику каждого отдельного узла сложной технической системы. Обеспечение безопасности движения самолетов, судов, железнодорожных поездов и автотранспорта в процессе эксплуатации также представляет значительный интерес.

Технологические процессы в машиностроении сопровождаются разделением электрических зарядов, то есть электризацией [1,2]. Разделение зарядов происходит при контакте разнородных материалов, в электрических разрядах, в камерах сгорания реактивных двигателей и двигателей внутреннего сгорания [3] и приводит к образованию электрического диполя, изменяющегося со временем, что сопровождается излу-

чением электромагнитных волн. Мощность излучения дипольного радиоизлучателя определяется по формуле [4]:

$$N = \frac{2}{3 \cdot c^3} \left| \frac{d^2 p_z}{dt^2} \right|^2, \quad (1)$$

где  $c$  – электромагнитная постоянная,  $t$  – время,  $p_z$  – электрический дипольный момент.

В большинстве случаев образование электрического диполя можно рассматривать как последовательный процесс накопления электрических зарядов на конденсаторе, затем пробой зарядного промежутка и разряд конденсатора по образовавшемуся каналу. При таком механизме формирования электрического диполя его временная зависимость представится в виде:

$$p_z(t) = \begin{cases} q_0 \cdot l_0 \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right], & 0 \leq t \leq \tau_1 \\ q_0 \cdot l_0 - \frac{S_0}{S} \cdot (l_0 - \bar{\theta}_e \cdot t) \cdot \int_S^{\frac{l_0}{\bar{\theta}_e}} \int_{n_1} e \cdot \bar{\theta}_e \cdot n_{e,0} \cdot \exp[(\alpha + \beta) \cdot t] dS dt, & \tau_1 < t \leq \tau_1 + \frac{l_0}{\bar{\theta}_e} \\ q_0 \cdot l_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), & \tau_1 + \frac{l_0}{\bar{\theta}_e} < t < \infty, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau_1 = R_1 \cdot C$  – время зарядки конденсатора емкостью  $C$  через сопротивление  $R_1$ ;  $l_0$  – расстояние полного разделения электрических зарядов;  $q_0 = \frac{C}{U}$  ( $U$  – разность потенциалов на обкладках конденсатора);  $\bar{\theta}_e$  – подвижность электронов;  $e$  – заряд электрона;  $n_{e,0}$  – концентрация электронов в окружающей среде;  $\alpha$  и  $\beta$  – соответственно первый и второй коэффициенты Таундсена;  $S_0$  – площадь канала разряда;  $S$  – площадь образующихся пластин конденсатора;  $\tau_2 = R_2 \cdot C$  – время разряда конденсатора емкостью  $C$  через сопротивление канала разряда  $R_2$ .

В уравнении (2) содержатся все основные параметры технологического процесса. Максимальная энергетика реализуется на основной частоте, равной

$$\nu_{\max} = \frac{1}{R_1 \cdot C}.$$

Излучение на отдельных гармониках определяется разложением в ряд Фурье (2). Электромагнитное излучение технологического процесса, промодулировано по амплитуде, частоте и фазе. Причинами этого могут быть неравномерность протекания тока разделения зарядов, механические колебания технологической оснастки, воздействие внешнего электромагнитного поля, интерференция и ряд других явлений. В таких условиях принимаемый радиосигнал имеет сложную форму. Рассмотрим проблему фильтрации совокупности полезных параметров сложного радиосигнала по

методу, основанному на свойствах непрерывных Марковских процессов и концепции переменных состояний. Это позволяет представить все случайные процессы, вызывающие радишумы и модулирующие их с помощью дифференциальных уравнений или уравнений состояния вместо корреляционных функций. Модель оценки радиосигнала, соответствующая реальным физическим процессам формирования электромагнитной волны заданным технологическим процессом как сложным антенным излучателем показана на рис. 1.

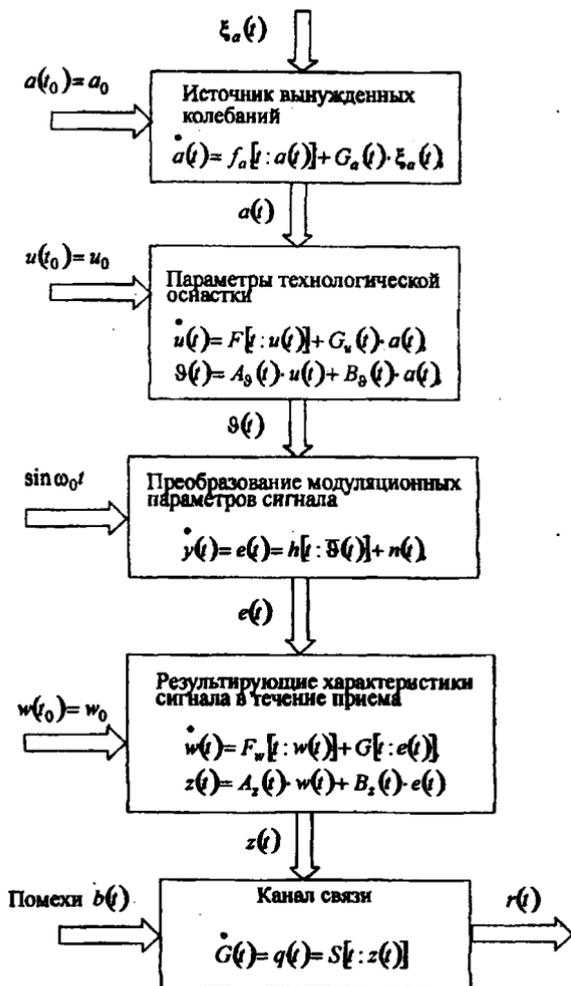


Рис.1. Модель оценки радиосигнала

Пусть  $\xi_{\alpha}(t)$  есть внешний источник воздействия при реализации заданного технологического процесса, который описывается вектором состояния  $a(t)$ , связанного с характеристиками источников вынужденных колебаний отдельных элементов технологического процесса. Вектор  $a(t)$  представляет собой многомерный марковский процесс, определяемый уравнением Ито [5].

$$d[a(t)] = f_{\alpha}[t : a(t)]dt + G_{\alpha}(t)d[\alpha(t)], \quad (3)$$

где  $a(t_0) = a_0$ ,  $\alpha(t)$  – процесс Винера.

Процесс (3) представлен на рис. 2.

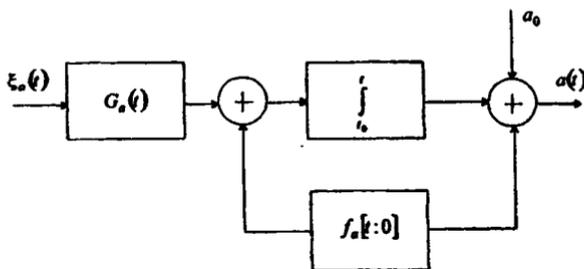


Рис. 2. Воздействие внешнего источника на внутренние колебания элементов технологического процесса

Пусть ковариационная матрица, соответствующая процессу Винера, задана выражением:

$$E[\alpha(t) \cdot \alpha'(t)] = A(t, u), \quad (4)$$

где  $A$  – симметричная неотрицательная матрица вида:

$$A(t, u) = \begin{Bmatrix} M_{\alpha}(t, u) & M_{\alpha', \alpha}(t, u) \\ M_{\alpha', \alpha}(t, u) & M_{\alpha'}(t, u) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Здесь  $M_{\alpha}(t, u) = \|B_{\alpha}(t, u)\|$  – корреляционная функция, а  $M_{\alpha', \alpha}(t, u) = \|B_{\alpha', \alpha}(t, u)\|$  – смешанная корреляционная функция.

Формально поделив уравнение (3) на  $dt$ , получим другой вид его записи:

$$\dot{a}(t) = f_{\alpha}[t : a(t)] + G_{\alpha}(t) \cdot \xi_{\alpha}(t), \quad (6)$$

где  $\xi_{\alpha}(t) = \dot{\alpha}(t)$  – Гауссовский шум с равномерным спектром в полосе частот флуктуаций механических или электрических колебаний всех отдельных звеньев технологического процесса с ковариационной матрицей  $A \cdot \delta(t, u)$  ( $\delta(t, u)$  – дельта-функция). Увеличение количества источников механических или электрических колебаний приводит к увеличению размерности вектора состояния  $a(t)$ . Сигнал  $a(t)$ , выработанный источ-

ником, поступает в модулятор, преобразующий параметры вынужденной силы в параметры шума. Первоначально осуществляется операция нелинейного преобразования колебаний внешней вынуждающей силы в параметры колебательного процесса отдельных узлов технологической оснастки на всех характерных для данной оснастки обертонах. Реализуются как бы линейная фильтрация. Такой линейный фильтр можно описать следующим уравнением состояния:

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) &= F[t; u(t)] + G_u(t) \cdot a(t), \\ \vartheta(t) &= A_v(t) \cdot u(t) + B_v(t) \cdot a(t), \\ u(t_0) &= u_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Над входным сигналом линейного фильтра осуществляется нелинейное преобразование без запоминания

$$\dot{y}(t) = e(t) = h[t; \bar{\vartheta}(t)] + n(t), \quad (8)$$

где  $e(t)$  – промодулированный отдельными звеньями технологического процесса радиосум. Эффекты, связанные с воздействием среды на радиосигнал, и интерференционные эффекты при сложении колебаний одного направления в точке приема опишем следующим уравнением состояния:

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= F_w[t; w(t)] + G[t; e(t)], \\ z(t) &= A_z(t) \cdot w(t) + B_z(t) \cdot e(t). \end{aligned} \quad (9)$$

В канале связи существует процесс возмущения канала. Пусть вектор  $b(t)$ , характеризуется источником возмущения канала и описывает естественные и искусственные помехи в точке приема. Этот вектор взаимодействует с  $z(t)$  и на выходе канала связи имеем сигнал  $r(t)$ . Допустим, что  $b(t)$  при  $t \geq t_0$  – непрерывный марковский процесс, описываемый уравнением Ито:

$$\begin{aligned} d[b(t)] &= f_b[t; b(t)]dt + G_b(t)d[\beta(t)], \\ b(t_0) &= b_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\beta(t)$  – симметричная положительная матрица.

В этих предположениях сигнал на выходе модели можно записать в виде:

$$d[r(t)] = S[t; r(t)]dt + d[\eta(t)] \quad (11)$$

где  $\eta(t)$  – процесс Винера с ковариационной матрицей.

$$E[\eta(t), \eta'(t)] = N(t, u).$$

На основании изложенного предоставляется возможность определить суммарный вектор  $x(t)$ , характеризующий информационные параметры сигнала. Принимаемая реализация промышленного радиосума является функцией четырех векторов

состояния  $a(t)$ ,  $u(t)$ ,  $w(t)$  и  $b(t)$ . Определим  $x(t)$  как вектор, получаемый путем соединения всех четырех векторов состояния в любом порядке. Например, пусть

$$x(t) = \begin{pmatrix} a(t) \\ u(t) \\ w(t) \\ b(t) \end{pmatrix}.$$

Тогда имеем:

$$\begin{aligned} d[x(t)] &= f_x[t; x(t)]dt + G_x(t)d[x(t)], \\ x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$f_x[t; x(t)] = \begin{pmatrix} f_a[t; a(t)] \\ F_u[t; u(t)] + G_u(t) \cdot a(t) \\ F_w[t; w(t)] + G_w[t; h[t; \bar{\theta}(t)]] \\ f_b[t; b(t)] \end{pmatrix},$$

$$G_x(t) = \begin{pmatrix} G_u(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_b(t) \end{pmatrix}, \quad x(t) = \begin{pmatrix} \alpha(t) \\ 0 \\ 0 \\ \beta(t) \end{pmatrix}$$

Спектр вынуждающей силы механического, электрического или электромагнитного происхождения можно представить в виде ряда резонансных дискретных составляющих со следующей аппроксимацией:

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \cdot \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_i)^2}{2\Delta\omega_i}\right], \quad (13)$$

где  $A_i(t)$  – амплитуда  $i$ -той составляющей в спектре,  $\Delta\omega_i$  – дисперсия флюктуации частоты  $i$ -той составляющей.

Будем считать, что каждая составляющая в спектре вынуждающей силы формируется резонансной системой, описываемой дифференциальным уравнением второго порядка:

$$f''(t) + \frac{r(t)}{L(t)} \cdot f'(t) + \frac{1}{L(t) \cdot C(t)} f(t) = \frac{1}{L(t)} \xi'(t), \quad (14)$$

а соответствующее ему дифференциальное уравнение первого порядка в матричной записи имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &= F[t; f(t)] + G(t) \cdot \xi(t), \\ f_{\text{вых}} &= C \cdot f(t), \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$F[t; f(t)] = \begin{bmatrix} -\frac{r(t)}{L(t)} & 1 \\ -\frac{1}{L(t) \cdot C(t)} & 0 \end{bmatrix}, \quad G(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ L(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix},$$

а резонансная частота системы

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L(t) \cdot C(t)}}.$$

Таким образом, промышленный ради шум промодулирован всеми возможными внешними силами и внутренними откликами отдельных элементов или узлов технологического процесса, т.е. он является носителем информации о протекании всего технологического процесса. Поэтому прием и обработка ради шума по мощности излучения на заданной частоте, дисперсии сигнала и спектра амплитудных модуляций позволяет выявить все тонкости протекания технологического процесса и создать датчики для его контроля и регулирования.

Использование радиоизлучения в целях контроля и диагностики технологических процессов представляет значительный интерес. В этом случае вместо спектрограмм вибраций и акустических шумов используются спектральные характеристики радиоизлучения силовых установок, получение которых в реальных условиях эксплуатации может оказаться предпочтительнее других способов диагностики.

С целью выяснения возможностей данного метода было необходимо:

1. Выяснить существование модулирующих воздействий механических колебаний корпуса двигателя на создаваемое им в процессе работы радиоизлучение.
2. Провести исследования различных типов двигателей и выяснить связь между параметрами, режимами работы, техническим состоянием установки в целом и характеристиками создаваемого ими электромагнитного излучения.
3. Разработать физическую модель радиоизлучения, создаваемого при работе каждой конкретной силовой энергетической установки.

Для решения поставленных задач была создана специальная установка для регистрации радиоизлучения (рис. 3). Радиоизлучение с исследуемого объекта регистрируется радиодатчиком, где усиливается и подвергается предварительной обработке. С радиодатчика сигнал поступает на вход анализатора спектра, определяющего спектральный состав ради шума. Полученные спектрограммы записываются на самопи-

пущем потенциометре [7]. При исследовании двигателей внутреннего сгорания дополнительно использовался вибродатчик. Для электродвигателей применялся датчик электрического тока. С обоих датчиков сигнал через коммутатор поступал также на вход анализатора спектра, что давало возможность проводить сравнительный анализ полученных результатов. С целью проверки эффекта модуляции радиоизлучения механическими колебаниями проводилось лабораторное моделирование. В вакуумной камере зажигался электрический заряд в системе отрицательное острие – положительная плоскость, что осуществляло имитацию работы энергетической силовой установки. При этом подбирались такие условия, чтобы электрический разряд по току был промодулирован периодической составляющей. В случае коронарного и тлеющего разрядов возникают так называемые импульсы Тричеля [6], частота которых зависит от радиуса острия, давления и величины разрядного тока. В электрических разрядах разделения электрических зарядов происходит в приэлектродных областях, образуя при этом двойной электрический слой. Этот слой можно рассматривать как электрический диполь, колебания которого приводят к возникновению электромагнитного излучения. Частота следования импульсов Тричеля при атмосферном давлении непостоянна и колеблется около некоторого среднего значения определяемого разрядным током и радиусом кривизны коронирующего острия. При понижении давления частота стабилизируется, что позволяет наблюдать эффект модуляции радиоизлучения механическими колебаниями электрода на его амплитудно-частотной характеристике [8].

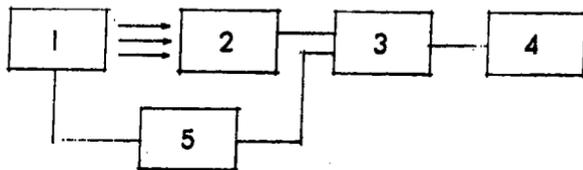


Рис.3. Экспериментальная установка (1 – исследуемый объект; 2 – радиодатчик; 3 – анализатор спектра; 4 – самопишущий потенциометр; 5 – вибродатчик)

Механические колебания осуществляют модуляцию в основном двумя способами:

- 1) вибрациями обусловленных плохой балансировкой трущихся деталей;
- 2) периодичностью работы двигателя. Оба механизма модуляции были смоделированы в вакуумной камере. Оба механизма модуляции были смоделированы в вакуумной камере.

На рис.4. показаны осциллограммы радиоизлучения тлеющего разряда без модуляции и с модуляцией механическими колебаниями одного электрода относительно другого частотой 1200 Гц при давлении 10 тор и токе разряда 150 мкА. На спектре

амплитудных модуляций отчетливо видны комбинационные частоты, то есть дополнительные пики на частотах, равных сумме и разности следования импульсов Тривеля и модулирующей частоты. При осуществлении модуляции переменным электромагнитным полем наблюдается аналогичная ситуация.

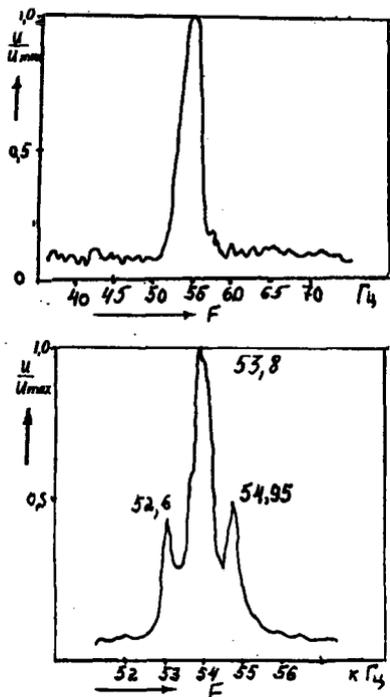


Рис. 4. Осциллограмма радиоизлучения тлеющего разряда без модуляции и с механической модуляцией одного электрода относительно другого с частотой 1200 Гц при давлении 10 тор и токе нагрузки 150 мка

Полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие механических колебаний и переменное электромагнитное поле одинаковым образом воздействуют на радиоизлучение, формируемое системой. В сложных энергетических установках в качестве исполнительных элементов используются электродвигатели. Были проведены исследования характеристик коллекторных электродвигателей постоянного тока при различных режимах работы. Снимались и анализировались осциллограммы и спектрограммы радиоизлучения и тока через электродвигатель при различных питающих напряжениях. Спектрограммы содержали ряд высокочастотных пиков (рис. 5). Частота первого пика соответствует скорости вращения двигателя, а последующие пики,

кратные первому, представляют собой высшие гармоники. При увеличении скорости вращения происходит пропорциональное увеличение частоты данных пиков и изменяется соотношение амплитуд различных гармоник, индивидуальное для каждого двигателя. Например, для двигателя ДПМ-30-Н2-03 амплитуда первой гармоники радиоизлучения и тока возрастает при увеличении питающего напряжения от 5 до 27 В. Седьмая, а также восьмая и шестнадцатая гармоники тока и радиоизлучения минимальны при напряжении питания 20 В, а четырнадцатая гармоника радиоизлучения – максимальная. Анализ подвергались 21 гармоника тока и радиоизлучения. Амплитуда каждой из гармоник различным образом зависит от скорости вращения и может служить исходной предпосылкой для определения технического состояния и режима работы силовой энергетической установки. Кроме гармоник, кратных частоте вращения двигателя, возникают также резонансные пики и на других частотах. В спектре амплитудных модуляций дизеля 8 ЧСП-22/18 имеется ярко выраженный пик на частоте около 700 Гц и пики с кратными частотами (см. рис.6), а для электродвигателя – на частоте около 150 гц и пики с кратными частотами (рис.5). При изменении скорости вращения частота этих пиков изменяется незначительно.

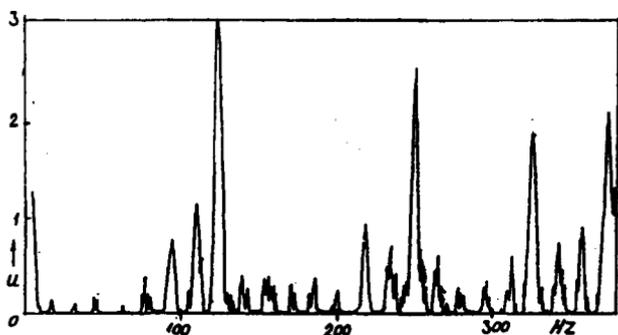


Рис.5. Спектрограмма радиоизлучения электродвигателя ДПМ-30-Н2-03

Для моделирования воздействия крутящего момента на валу снимались спектрограммы тока и радиоизлучения электродвигателя при постоянной частоте вращения и различной нагрузке на валу. Величина тока через двигатель линейно зависит от нагрузки на валу. Поэтому вместо непосредственного измерения тормозящего момента определялся ток через электродвигатель. Величина тормозящего момента регулировалась в широких пределах его изменения путем подачи напряжения на вспомогательный двигатель, соединенного соосно и включенного встречно с исследуемым. Анализ полученных спектрограмм тока и радиоизлучения показал, что амплитуды гармоник, кратных частоте вращения, сложным образом зависят от тормозящего момента. Первая гармоника радиоизлучения имеет максимум при токе через двигатель – 100 мА, десятая – при токе

600 мА, а седьмая и четырнадцатая резко возрастают при токе – 800 мА. Резонансные пики, не кратные частоте вращения, возрастают по амплитуде и частоте, по мере роста нагрузки на валу (рис. 7). Можно предположить, что эти резонансные пики могут быть откликом обобщенного колебательного контура на внешнее воздействие. Таким образом, по частоте и амплитуде резонансных пиков в спектре амплитудных модуляций высокочастотного радиоизлучения возможно бесконтактно определять режим работы и техническое состояние каждого исполнительного двигателя в составе технологического объекта или системы (скорость вращения, нагрузку на валу, износ щеток и коллектора). Были проведены исследования электродвигателей, дизельных и карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. Спектральные характеристики радиоизлучения этих двигателей содержали целый ряд высокочастотных резонансных пиков, в частности, кратных частоте вращения двигателя и другим модулирующим воздействиям. Эти характеристики существенно различаются в зависимости от технического состояния, режима работы, типа конкретного экземпляра двигателя.

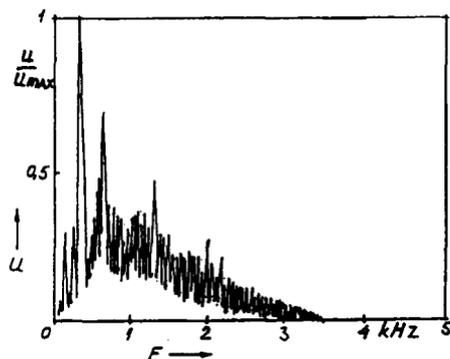


Рис.6. Спектрограмма радиоизлучения дизельного двигателя 8 ЧПС-22/18

Представляет интерес механизм возникновения электрических разрядов при работе электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания. Помимо искрения при разрыве электрических контактов коллекторных машин дополнительное разделение зарядов осуществляется в процессе трения угольных щеток о медный коллектор, причем медь, имеющая большее сродство к электрону, заряжается отрицательно, а угольные щетки – положительно. Наличие радиоизлучения при трении медь-уголь было подтверждено экспериментом, когда двигатель вращался без подачи на него внешнего напряжения и излучал радиошумы. При работе двигателей внутреннего сгорания помимо искрообразования в системе зажигания карбюраторного двигателя возникают разрядные явления с выхлопной трубы на газовую струю продуктов сгорания топлива. Эти разряды обусловлены разделением электрических зарядов

вследствие уноса отрицательно заряженных частиц из камеры сгорания в окружающую атмосферу и периодически импульсными разрядами между выхлопной трубой и газовой струей. Разрядные импульсы имеют малую длительность, что обуславливает радиоизлучение в широкой полосе частот. Для регистрации возникающего излучения можно работать как в ближней, так и в дальней зоне. При работе в ближней зоне возможна регистрация амплитудно-частотных характеристик радиоизлучения во всей области частот с анализом спектра амплитудных модуляций. В дальней зоне регистрируется только высокочастотное излучение и так же анализируется спектр амплитудных модуляций в области частот с максимальным отклонением – сигнал/шум. Мощность радиоизлучения в ближней зоне резко падает с расстоянием (обратно пропорционально кубу расстояния), тогда как в дальней зоне интенсивность радиоизлучения падает гораздо медленнее, что позволяет осуществить прием на достаточном удалении от исследуемого объекта.

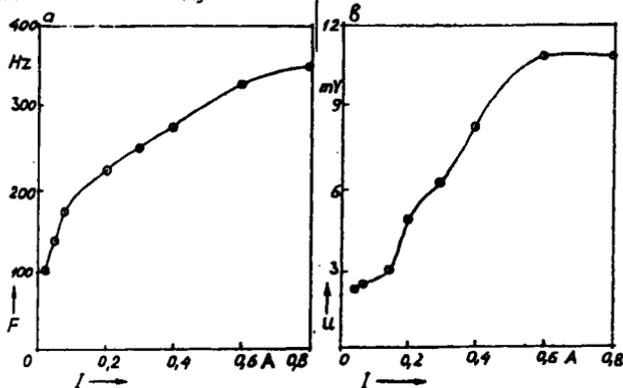


Рис. 7. Графики зависимости частоты и амплитуды резонансных пиков не кратных частоте вращения от тока через двигатель (от нагрузки на валу)

В результате проделанной работы получено:

1. Радиоизлучение работающих энергетических систем и двигательных установок является носителем полезной информации об их техническом состоянии и режимах работы, что позволяет осуществлять неразрушающий контроль и автоматическое регулирование энергетической системы в целом.
2. Причиной возникновения радиоизлучения являются электрические разряды, возникающие вследствие разделения электрических зарядов при трибоэлектричестве и отрицательной термоэмиссии с сажевых частиц.
3. Низкочастотные механические и электромагнитные колебания оказывают моделирующее воздействие на радиоизлучение в высокочастотной области спектра, что позволяет проводить дистанционный контроль за техническим состоянием излучающего объекта на значительных удалениях от него.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании – Горький; Волго-вятское книжное издательство, 1975. – 280с.
2. Тэнзеску Ф., Краманюк Р. Электростатика в технике. – М.: Энергия; 1980. – 296с.
3. Гречихин Л.И., Пушкин Н.М. Влияние сажевых частиц на термодинамическое состояние газов при различных температурах // Известия ВУЗов, Авиационная техника. – 1983. – №1. – С. 84-88.
4. Зоммерфельд Д. Электродинамика. – М.: ИЛ; 1958. – 501с.
5. Анго А. математика для электро- и радиоинженеров. – М.: наука; 1974. 772с.
6. Мик Дж, Крегс Дж. Электрический пробой в газах. – М.: ИЛ; 1960. – 605 с.
7. Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Аппаратура и методы измерений флюктуационных характеристик радиосигналов, возникающих в различных технологических процессах/Приборостроение. – Мн., 1989. – Вып. 11. – С.121–124.
8. Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Спектральные характеристики радиоизлучения электрических разрядов и их применение для контроля и регулирования плазменных технологических процессов/Приборостроение. – Мн., 1991. – Вып. 13. – С. 121–125.

УДК 621.941.2/31-83

П.Н. Гурецкий

### **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СУПОРТА ТОКАРНОГО СТАНКА**

*Белорусская государственная политехническая академия*

*Минск, Беларусь*

Обработка большинства деталей на машиностроительных предприятиях осуществляется с использованием технологических машин, обеспечивающих снятие припуска с заготовки. Как правило, это металлорежущие станки, обработка на которых производится лезвийным или абразивным инструментом. Именно поэтому, в кругу проблем по снижению себестоимости и повышению конкурентоспособности продукции, особое место занимает задача минимизации энергопотребления технологического оборудования в машиностроительном комплексе, который потребляет значительную часть энергетических и материальных ресурсов.

Целью численного исследования являлась оценка степени влияния на величину энергетических потерь законов распределения давлений по рабочим поверхностям направляющих скольжения. В качестве примера был рассмотрен токарно-винторезный станок модели 16К20Ф3 с шарико-винтовой передачей, расчётная схема суппорта представлена на рис. 1 с указанием всех сил, действующих в процессе обработки. Первоначально для упрощения поставленной задачи численное исследование было проведено для случая равномерного поступательного перемещения рабочего органа. На основании приведенной схемы составлена в координатном виде расчётная система уравнений (1):