

А. И. Власов, П. В. Григорьев, А. И. Кривошеин

МОДЕЛЬ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ¹

A. I. Vlasov, P. V. Grigoryev, A. I. Krivoshein

MODEL OF PREDICTIVE EQUIPMENT MAINTENANCE WITH APPLICATION OF WIRELESS TOUCH NETWORKS

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе основное внимание уделено методам предиктивного обслуживания (обслуживанию по фактическому техническому состоянию). При таком виде обслуживания состояние оборудования контролируется непрерывно или периодически. В зависимости от полученных результатов составляется прогноз технического состояния оборудования и формируются программы технического обслуживания. Системы предиктивного обслуживания способны прогнозировать состояние системы на основе текущего состояния оборудования и определяют необходимые мероприятия по техническому обслуживанию, что на сегодняшний день является актуальным и находит широкое применение в промышленности. Целью работы является разработка обобщенной концепции реализации системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей с радиочастотной идентификацией и оценка эффективности реализации такой системы по комплексной стоимостной модели. При реализации данного подхода вероятность незапланированного выхода системы из эксплуатации сводится к минимуму. Это повышает эффективность обслуживания и производительность системы и снижает затраты на техническое обслуживание. *Материалы и методы.* Для мониторинга текущего фактического состояния промышленных систем с целью предотвращения сбоев предложена модель системы, основанной на беспроводной сети датчиков. Системы предиктивного обслуживания, основанные на беспроводной сети датчиков, в отличие от остальных видов технического обслуживания сохраняют данные, полученные в процессе мониторинга, что позволяет применять прогрессивные методы контроля технического состояния и анализировать данные в реальном масштабе времени, а также делать прогнозы по техническому состоянию оборудования. Предложенная в статье модель предиктивного ремонта основана на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и риски сбоя компонентов. При оценке

Abstract. *Background.* In work the main attention is paid to methods of predictive service (to service on the actual technical condition). At such type of service the condition of the equipment is controlled continuously or periodically. Depending on the received results the forecast of technical condition of the equipment is formed and programs of maintenance are formed. The systems of predictive service are capable to predict a condition of system on the basis of current state of the equipment and define necessary actions for maintenance that is today relevant and finds broad application in the industry. The purpose of work is development of the generalized concept of realization of system of predictive service on the basis of touch networks with radio-frequency identification and assessment of efficiency of realization of such system on complex cost model. At realization of this approach the probability of an unplanned exit of system from operation is minimized. It increases efficiency of service and productivity of system and reduces costs of maintenance. *Materials and methods.* For monitoring of the current actual state of industrial systems for the purpose of prevention of failures the model of the system based on wireless network of sensors is offered. The systems of predictive service based on wireless network of sensors unlike other categories of maintenance, keep the data obtained in the course of monitoring that allows to apply progressive control methods of technical condition and to analyze data in real time and also to do forecasts for technical condition of the equipment. The model of predictive repair offered in article is based on minimization of costs of service, diagnostics and risks of failure of components. At assessment of average time of work it is offered to apply the simplified model in which deterioration in technical condition (change of a diagnostic signal) takes place in a straight line from an initial state to extreme value of technical condition (to the full) of object *i*-go. *Results.* The concept of creation of system of predictive service on the basis of touch networks with radichastotny identification is offered. For assessment of efficiency of predictive ser-

¹ Отдельные результаты получены при поддержке МОН РФ в рамках проекта по Соглашению No.14.579.21.0142 UID RFMEFI57917X0142.

среднего времени работы предлагается применять упрощенную модель, в которой ухудшение технического состояния (изменение диагностического сигнала) проходит по прямой линии от начального состояния до предельного значения технического состояния (до отказа) i -го объекта. *Результаты.* Предложена концепция построения системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей с радиочастотной идентификацией. Для оценки эффективности предиктивного обслуживания предложена стоимостная модель оптимизации предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей, основанная на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и развертывание системы мониторинга оборудования. *Выводы.* Предиктивное обслуживание оборудования направлено на предсказание места и времени вероятного возникновения неполадок, а также на избежание простоя ресурсов и сокращения расходов на обслуживание. Применение беспроводных каналов связи в системе мониторинга позволяет в кратчайшие сроки развернуть сенсорную сеть в независимости от пространственного расположения датчиков. Представленная концепция системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей позволит в режиме реального времени проводить анализ состояния оборудования. Согласно полученным с датчиков сенсорной сети данным формируется программа технического обслуживания оборудования.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, предиктивный ремонт, передача данных, техническое обслуживание, обработка информации, мониторинг технологических процессов, прогнозирование возникновения дефектов.

vice the cost model of optimization of predictive equipment maintenance with application of wireless touch networks based on minimization of costs of service, diagnostics and expansion of system of monitoring of the equipment is offered. *Conclusions.* Predictive equipment maintenance is directed to prediction of the place and time of probable emergence of malfunctions and also to avoidance of idle time of resources and cut in expenditure on service. Application of wireless channels of communication in the system of monitoring allows to develop in the shortest possible time touch network in independence of a spatial arrangement of sensors. The submitted concept of system of predictive service on the basis of touch networks will allow to carry out in real time the analysis of a condition of the equipment. It agrees to the data obtained from sensors of touch network the program of maintenance of the equipment is formed.

Key words: wireless sensor networks, predictive repair, data transmission, maintenance, information processing, monitoring of technological processes, prediction of defects.

Введение

В настоящее время сформировалось несколько методов обслуживания оборудования, среди которых можно выделить три основных: аварийное, регламентное, предиктивное.

Первый вид – это обслуживание оборудования после выхода его из строя. Данный подход оправдан при обслуживании простого, дешевого оборудования, когда имеется резервирование, и замена будет дешевле, чем ремонтные работы по восстановлению оборудования.

Второй вид обслуживания – планово-профилактическое обслуживание оборудования согласно регламенту. В этом случае обслуживание производится в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя через определенные промежутки времени. Работы по обслуживанию оборудования производятся с определенным периодом, который определяется методами статистического анализа и в соответствии с регламентирующими документами период обычно составляет время, в течение которого не менее 98 % оборудования работает без отказов.

При обслуживании по регламенту, казалось бы, не теряется по крайней мере возможность воспользоваться гарантией завода-изготовителя. Но оказывается, что не менее 50 % из числа всех технических обслуживаний по регламенту выполняются без фактической их необходимости (P/PM Technology magazine, 98). Кроме того, для многих типов оборудования обслуживание и ремонт по регламенту не снижают частоту выхода их из строя.

Более того, надежность работы оборудования после технического обслуживания, если обслуживание предусматривает разборку механизма или замену деталей, часто снижается, иногда временно, до момента их приработки, а иногда это снижение надежности обусловлено появлением от-

существовавших до обслуживания дефектов монтажа. Исследования показали, что порядка 70 % дефектов вызвано обслуживанием машин и оборудования (P/PM Technology magazine, Apr 98).

Третий вид обслуживания, который подробно рассматривается в статье – предиктивное [1, 2], также известное как обслуживание по фактическому техническому состоянию. При этом виде обслуживания состояние оборудования контролируется непрерывно или периодически. В зависимости от полученных результатов составляется прогноз технического состояния оборудования и формируются программы технического обслуживания. Системы предиктивного обслуживания способны прогнозировать состояние системы на основе текущего состояния оборудования и определяют необходимые мероприятия по техническому обслуживанию [3]. Таким образом, вероятность незапланированного выхода системы из эксплуатации сводится к минимуму. Это повышает эффективность обслуживания и производительность системы и снижает затраты на техническое обслуживание. Для мониторинга промышленных систем с целью предотвращения сбоев в работе предложена модель системы, основанной на беспроводной сети датчиков [4, 5].

В настоящее время задача построения распределенных систем сбора данных и мониторинга технологических процессов как никогда актуальна в самых различных областях жизнедеятельности человека. В качестве элементов систем, регистрирующих различные данные, используются датчики – средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и/или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем [6].

В зависимости от среды передачи сигналов датчики могут быть проводными и беспроводными. Применение проводных систем не всегда эффективно из-за высокой стоимости монтажных и пусконаладочных работ, а также технического обслуживания. Кроме того, в некоторых ситуациях установка проводных датчиков вообще невозможна по технологическим или организационным причинам. Достоинствами беспроводных датчиков являются минимальные ограничения по их размещению, возможность внедрения и модификации сети таких датчиков на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования, надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [7]. Кроме того, в некоторых ситуациях установка проводных датчиков вообще невозможна по технологическим или организационным причинам. Достоинствами беспроводных датчиков являются минимальные ограничения по их размещению, возможность внедрения и модификации сети таких датчиков на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования, надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [8].

Системы предиктивного обслуживания, основанные на беспроводной сети датчиков, в отличие от остальных видов технического обслуживания, сохраняют данные, полученные в процессе мониторинга, что позволяет применять прогрессивные методы контроля технического состояния и анализировать данные в реальном масштабе времени, а также делать прогнозы по техническому состоянию оборудования.

Анализ принципов построения беспроводных сенсорных сетей

В течение длительного времени системы с проводными каналами связи обеспечивали надежную среду передачи и высокую скорость при большом сроке службы. Несмотря на многие достоинства, проводные решения вместе с тем имеют ряд ограничений, которые постепенно делают их менее привлекательными по сравнению с беспроводными технологиями. Среди этих ограничений можно выделить следующие:

- пространственное расположение датчиков;
- затраты на обслуживание каналов связи;
- время развертывания проводных сетей.

Эти три главных недостатка проводной передачи объясняют то, что беспроводные сети – сети радиосвязи, очень стремительно набирают силу. Это объясняется удобством их использования, низкой стоимостью и приемлемой пропускной способностью.

При построении беспроводной сенсорной сети необходимо определить протокол передачи данных. Поскольку в зависимости от области применения беспроводной сенсорной сети используется тот или иной протокол или стандарт для взаимодействия с беспроводными датчиками считы-

вающей аппаратуры [9]. В табл. 1 представлено сравнение видов радиочастотного интерфейса для беспроводных меток/датчиков.

Таблица 1

Сравнение видов радиочастотного интерфейса для беспроводных меток/датчиков

Показатели	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee	RFID UHF
Частотный диапазон (РФ)	2,4 ГГц	2,4 ГГц 5 ГГц	2,4 ГГц 868 МГц	868 МГц
Максимальная дальность связи, м	1/10/100 (зависит от класса оборудования)	100	200	50
Скорость передачи данных	721 кбит/с	450/900/1,3 Гбит/с	256 кбит/с	128–620 кбит/сек
Топология сети	Точка-точка Звезда	Точка-точка Звезда	Точка-точка Звезда Дерево Ячеистая	Считыватель-множество меток/датчиков
Длительность автономной работы от батарейного питания при 30-секундном периоде опроса датчиков	0,5 года	60 дней	1,5 года	2–3 года
Одновременное считывание многих меток одновременно	До 20	До 20	До 10	До 300
Программные протоколы взаимодействия с управляющей системой	Стек протоколов Bluetooth	Стек протоколов TCP/IP	Стек протоколов ZigBee	Протокол LLRP (Low Level Reader Protocol)

Сеть беспроводных датчиков состоит из набора пространственно-распределенных интеллектуальных датчиков, предназначенных для контроля физических параметров – вибрации, температуры, деформации, давления и пр. Каждый узел датчика в сети выполняет функцию считывания, обработки и беспроводной передачи данных. Использование технологии микроэлектромеханической системы (МЭМС) предоставляет возможность недорогого производства маломощных multifункциональных датчиков малого размера и малого веса.

Применение беспроводных датчиков с автономным электропитанием обуславливает необходимость детального рассмотрения принципов их построения, функционального наполнения и используемых схмотехнических решений в соответствии с обобщенной структурной схемой на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема беспроводного датчика

Регистрация контролируемых характеристик осуществляется чувствительным элементом (ЧЭ) датчика. При этом для измерения одной и той же величины могут применяться датчики, использующие различные физические процессы ее преобразования в электрические сигналы и разнообразные принципы действия (рис. 2) [10–12]. Блок обработки предназначен для усиления электрического сигнала и его преобразования к виду, удобному для передачи. Функциональное наполнение блоков обработки зависит от вида выходного сигнала. Следует отметить, что критерии достижения минимального токопотребления противоречат критериям достижения максимального быстродействия, поэтому микромощные ОУ имеют очень скромные скоростные параметры [11, 12].

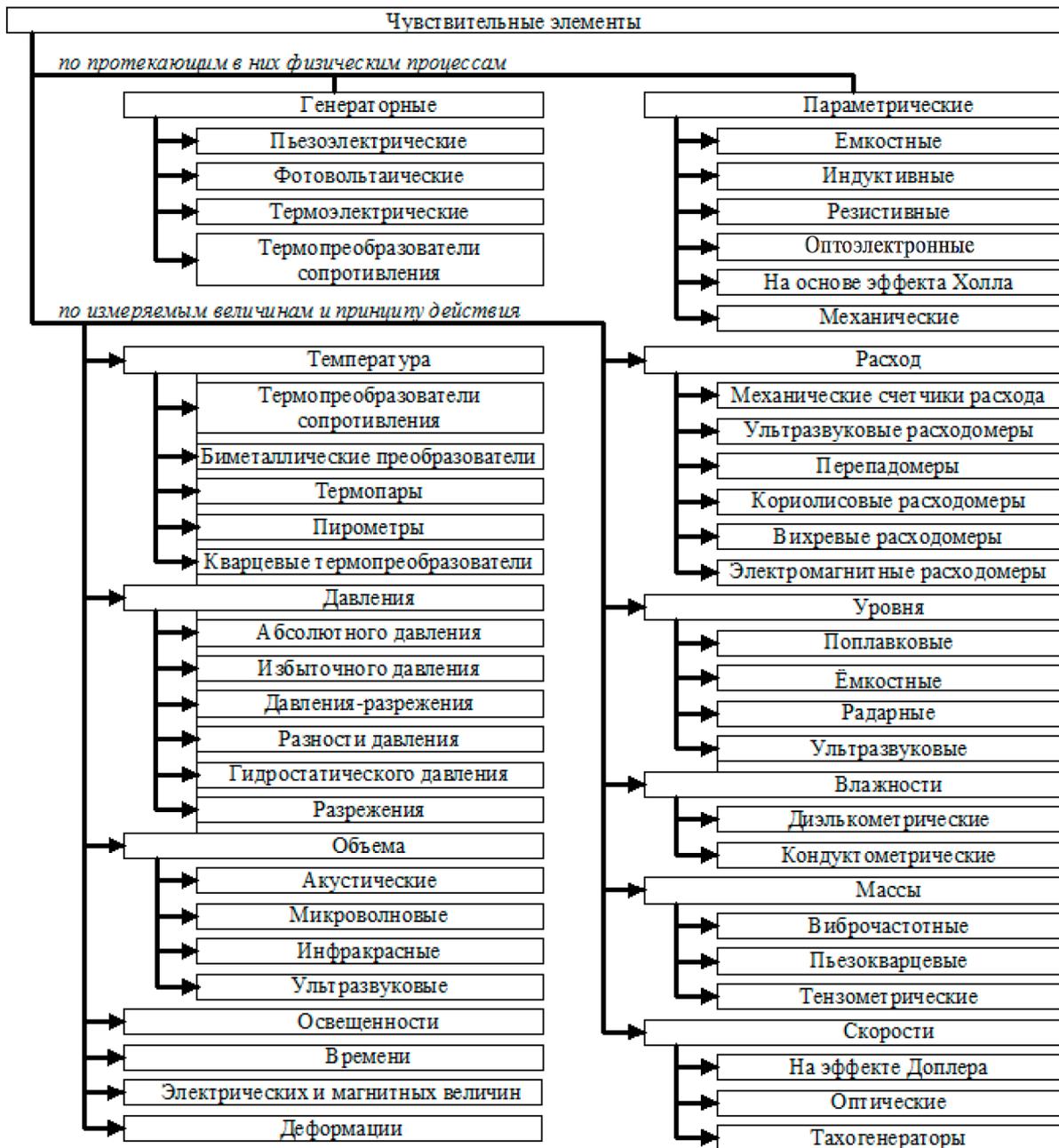


Рис. 2. Типы чувствительных элементов беспроводных датчиков [11, 12]

Согласно данным, представленным в табл. 1, предложено использовать беспроводные сенсорные сети на базе радиочастотной идентификации (RFID) [13], поскольку длительность автономной работы и количество одновременно считываемых меток являются основными параметрами при выборе радиочастотного интерфейса в системах предиктивного обслуживания оборудования.

Концепция системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей

На производственных цепочках для получения данных о состоянии оборудования применяются беспроводные сенсорные сети, которые состоят из различных датчиков, включая инфракрасные датчики, акустические, датчики вибрации, удара и ускорения [11, 12]. На рис. 2 представлена обобщенная схема получения данных и анализа состояния оборудования в режиме реального времени. В процессе работы происходит непрерывный контроль состояния модулей, а также сравнение полученных данных с датчиков с показаниями во время нормальной работы оборудования, для определения возможных неисправностей.

На рис. 2 изображена производственная цепочка (1), на оборудование которой установлены беспроводные сенсорные метки. Отказ от проводных датчиков позволяет расположить сенсоры в труднодоступных местах, тем самым увеличить количество самих датчиков и точность получаемых в процессе мониторинга параметров. Данные с датчиков считываются и передаются по беспроводной сети на внешние сервера, где происходит преобразование, хранение и обработка данных (2).

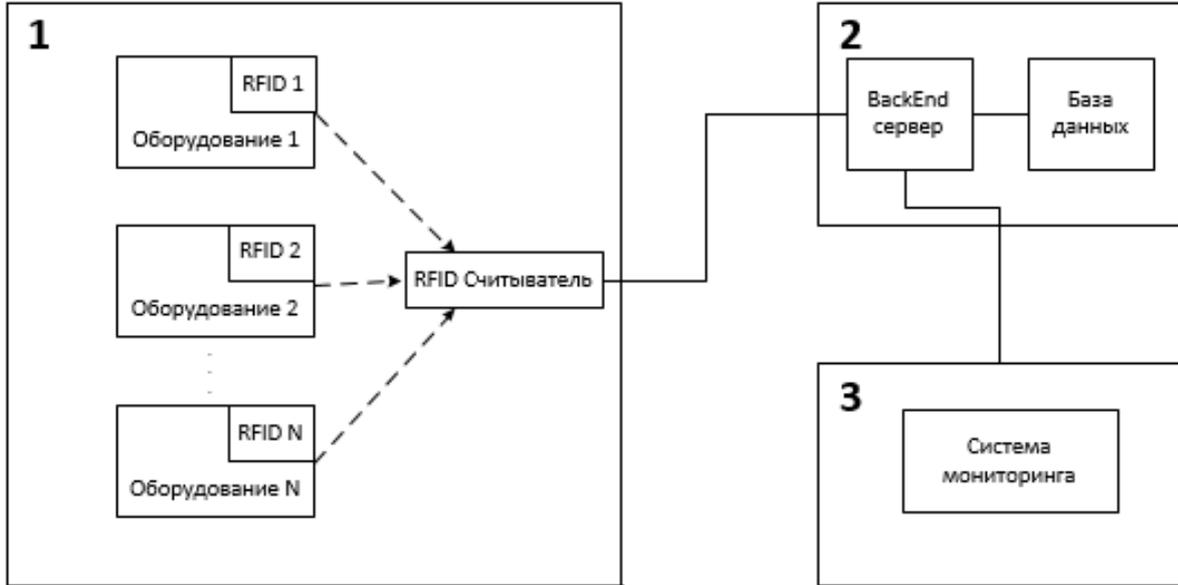


Рис. 3. Анализ состояния оборудования в режиме реального времени

Все полученные с датчиков данные сохраняются в базе данных, расположенной в облаке. Данные необходимы для отображения статистики. Также существует база данных дефектов, которая включает в себя информацию, связанную с дефектами различных устройств, соответствии возникающих дефектов и времени эксплуатации, на котором обычно происходят такие дефекты. Данные, полученные в результате мониторинга, обрабатываются и в дальнейшем сортируются в порядке частоты возникновения. Данный подход позволяет сформировать программу предиктивного обслуживания оборудования, а также спрогнозировать выход из строя каких-либо его частей [13–14].

Сохраненные данные в любой момент времени могут быть получены в виде графиков или же отдельных событий и отображены на экране системы мониторинга компьютера, планшета или мобильного телефона (3).

Стоимостная модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей

Предложенная в статье модель предиктивного ремонта основана на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и риски сбоя $c(S_p)$ компонентов [3, 14]:

$$c(S_p) = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\bar{t}(S_p)} + c_d, \quad (1)$$

где C_{pr} – затраты на предиктивное обслуживание; S_p – значение сигнала, получаемого с датчиков в процессе мониторинга состояния оборудования (является случайной величиной); $F(S_p)$ – функция распределения вероятности отказа в зависимости от сигнала с датчика; L_f – потери из-за рисков сбоя; c_d – единичные затраты на мониторинг состояния оборудования для получения диагностического сигнала; $\bar{t}(S_p)$ – среднее время работы оборудования до выхода из строя, которое определяется по формуле

$$\bar{t}(S_p) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right], \tag{2}$$

где $t_i(S_p)$ – это время работы i -го объекта с нормальным значением сигнала S_p ; $t_j(S_p)$ – это время работы j -го объекта, который вышел из строя до того момента, как диагностический сигнал с датчика достиг состояния S_p ; $m(S_p)$ – количество объектов, достигающих состояния S_p без сбоев; n – общее количество мониторинга.

Для получения среднего значения времени до выхода оборудования из строя необходимо провести испытания, включающие диагностические измерения. При анализе полученных данных необходимо рассчитать среднее время с момента получения сигнала о нестабильной работе оборудования до полного выхода его из строя. В данном случае, применив уравнение (2), можно рассчитать среднее время работы оборудования с момента получения сигнала о нестабильной работе до полного выхода из строя.

При расчете среднего времени работы предлагается применять упрощенную модель, в которой ухудшение технического состояния (изменение диагностического сигнала) проходит по прямой линии от начального состояния S_{pz} до предельного значения технического состояния (до отказа) S_{pfi} i -го объекта. Расчет $t_i(S_p)$ выполняется по формуле

$$t_i(S_p) = t_i(S_{pfi}) \frac{S_{pi} - S_z}{S_{pfi} - S_z}. \tag{3}$$

На рис. 4 представлен графический способ определения входных данных для расчета среднего времени работы оборудования в зависимости от диагностических сигналов с датчиков при предиктивном обслуживании.

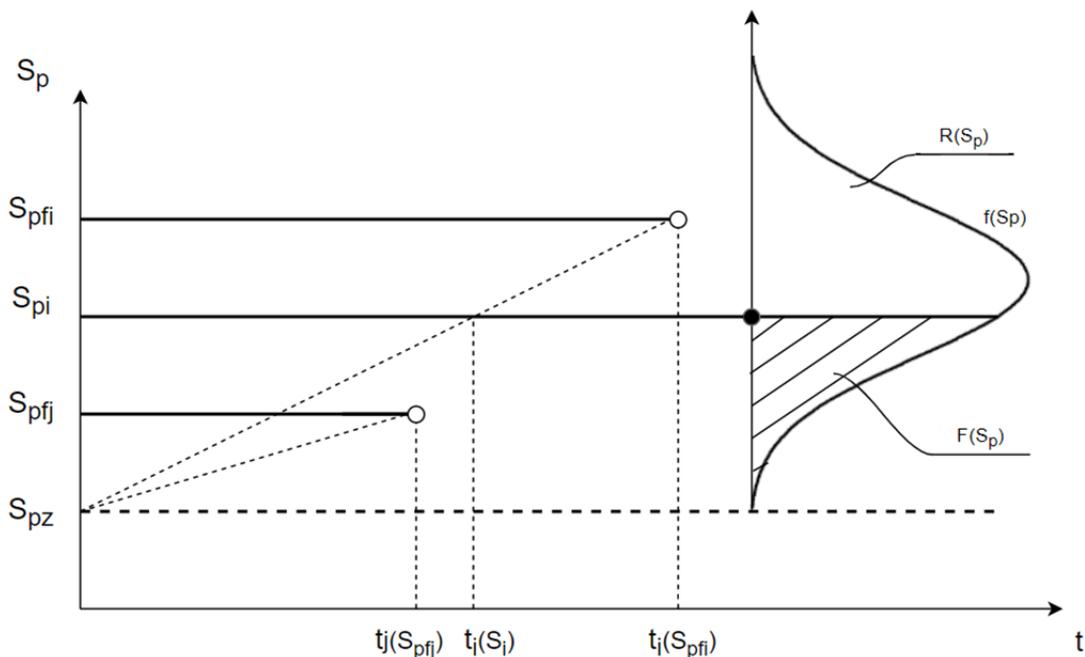


Рис. 4. Графический способ определения входных данных для расчета среднего времени работы оборудования в зависимости от диагностических сигналов с датчиков

К единичным затратам на мониторинг состояния оборудования для получения диагностического сигнала можно отнести затраты на развертывание беспроводной сенсорной сети и обслуживание, может быть описана согласно формуле

$$c_d = l(C_i + C_s) + kC_r. \tag{4}$$

Таким образом, модель оптимизации предиктивного ремонта с применением беспроводных сенсорных сетей, основанная на минимизации затрат на техническое обслуживание оборудования, может быть описана согласно формуле

$$c(S_p) = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\bar{t}(S_p)} + c_d = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right]} + c_d = \frac{C_{pr} + L_f F(S_p)}{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{m(S_p)} t_i(S_p) + \sum_{j=1}^{n-m(S_p)} t_j(S_p) \right]} + l(C_t + C_s) + kC_r, \quad (5)$$

где C_{pr} – затраты на предиктивное обслуживание; S_p – значение сигнала, получаемого с датчиков в процессе мониторинга состояния оборудования (является случайной величиной); $F(S_p)$ – функция распределения вероятности отказа в зависимости от сигнала с датчика; L_f – потери из-за рисков сбоя; c_d – единичные затраты на мониторинг состояния оборудования для получения диагностического сигнала; $\bar{t}(S_p)$ – среднее время работы оборудования до выхода из строя, которое определяется по формуле (2); l – количество сенсорных меток с датчиками; C_t – стоимость одной сенсорной метки; C_s – стоимость одного датчика; k – количество считывателей; C_r – затраты на приобретение и установку одного ридера [15–17].

Заключение

Предиктивное обслуживание оборудования направлено на предсказание места и времени вероятного возникновения неполадок, а также на избежание простоя ресурсов и сокращения расходов на обслуживание. Применение беспроводных каналов связи в системе мониторинга позволяет в кратчайшие сроки развернуть сенсорную сеть в независимости от пространственного расположения датчиков.

Представленная концепция системы предиктивного обслуживания на основе сенсорных сетей позволит в режиме реального времени проводить анализ состояния оборудования. Согласно полученным с датчиков сенсорной сети данным формируется программа технического обслуживания оборудования.

Предложена стоимостная модель оптимизации предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей, основанная на минимизации затрат на обслуживание, диагностику и развертывание системы мониторинга оборудования.

Библиографический список

1. *Rawi Zaid. Machinery Predictive Analytics / Rawi Zaid // SPE Intelligent Energy (March 23–25, Utrecht, Netherlands). – 2010. – DOI <https://doi.org/10.2118/128559-MS>.*
2. *Stone, P. Introducing Predictive Analytics: Opportunities / P. Stone // Digital Energy conference and exhibition (April 11–12, Houston, Texas, USA). – 2007. – DOI <https://doi.org/10.2118/106865-MS>.*
3. *Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Considering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices / A. I. Vlasov, A. V. Yudin, M. A. Salmina, V. A. Shakhnov, K. A. Usov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, № 20. – P. 9390–9396.*
4. *Власов, А. И. Применение методов и средств радиочастотной идентификации в корпоративных информационных производственных системах / А. И. Власов, П. В. Григорьев, В. П. Жалнин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 272–277.*
5. *Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.*
6. *Козлова, Е. И. Метрологическое обеспечение систем обработки информации : конспект лекций / Е. И. Козлова. – Минск : БГУ, 2009. – 99 с.*
7. *Богданов, С. П. Перспективы и проблемы применения беспроводных датчиков с автономным питанием / С. П. Богданов, О. О. Басов // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 20–23.*

8. Пат. 2556423 Российская Федерация. Способ функционирования беспроводной сенсорной сети / В. А. Шахнов, А. И. Власов, Е. В. Резчикова, С. В. Токарев, И. М. Смурыгин, Н. А. Денисенко, К. А. Муравьев ; опубл. 05.07.2013.
9. *Власов, А. И.* Методы упреждающего прогнозирования состояния широкополосной сети связи / А. И. Власов, В. В. Иванов, И. А. Косолапов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 3–6.
10. Отчет по НИР № 7.6161.2011 Гибридные чувствительные элементы интеллектуальных сенсоров распределенных управляющих систем / под ред. В. А. Шахнова ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 2013. – 247 с.
11. *Фрайден, Дж.* Современные датчики : справочник / под ред. Е. Л. Свинцовой ; пер. с англ. Ю. А. Забалотной. – М. : Техносфера, 2005. – 589 с.
12. Датчики : справочник / под ред. З. Ю. Готры, О. И. Чайковского. – Львов : Каменяр, 1995. – 312 с.
13. *Григорьев, П. В.* Оценка потенциального объема рынка систем на базе радиочастотной идентификации и его динамика / П. В. Григорьев, А. И. Власов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2017. – С. 389–390.
14. *Burduk, A.* Evaluation of the risk in production systems with a parallel reliability structure / A. Burduk, E. Chlebus // *Eksploatacja i Niezawodność -Maintenance and Reliability.* – 2009. – № 2 (42). – P. 84–95.
15. *Горячев, Н. В.* Информационно-измерительный лабораторный комплекс исследования теплоотводов электрорадиоэлементов / Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 239–240.
16. *Горячев, Н. В.* Исследование и разработка средств и методик анализа и автоматизированного выбора систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / Н. В. Горячев, М. К. Танатов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 70–75.
17. *Горячев, Н. В.* Типовой маршрут проектирования печатной платы и структура проекта в САПР электроники ALTIUM DESIGN / Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 120–122.

Власов Андрей Игоревич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: vlasov@iu4.ru

Григорьев Павел Валерьевич

ассистент,
кафедра проектирования и технологии
производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: vlasov@iu4.ru

Кривошеин Алексей Игоревич

магистрант,
кафедра проектирования и технологии
производства радиоэлектронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва,
2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: vlasov@iu4.ru

Vlasov Andrey Igorevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of engineering and manufacturing
technology of radio-electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, 5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Grigor'ev Pavel Valer'evich

assistant,
sub-department of engineering and manufacturing
technology of radio-electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, page 1, 5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Krivoshein Aleksey Igorevich

master degree student,
sub-department of engineering and manufacturing
technology of radio-electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University,
(105005, page 1, 5 2-ya Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

УДК 681.324

Власов, А. И.

Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей / А. И. Власов, П. В. Григорьев, А. И. Кривошеин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 26–35. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-4.