



Энтропия технического состояния машинных парков



Владимир ВЕРЕСКУН
Vladimir D. VERESKUN

Алексей МАНАКОВ
Alexei L. MANAKOV



Антон КИРПИЧНИКОВ
Anton Yu. KIRPICHNIKOV

Верескун Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, ректор Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС).

Манаков Алексей Леонидович – кандидат технических наук, доцент, первый проректор СГУПС.

Кирпичников Антон Юрьевич – начальник Учебного сервисного центра СГУПС (г. Новосибирск).

Возможность повышения эксплуатационной надежности машинных парков за счет своевременного обнаружения предотказного состояния подвижного состава, которое обеспечивает непрерывный мониторинг технических характеристик. Разработана двухуровневая структурно-диагностическая схема обобщенной машины, с помощью которой можно однозначно определить предотказное состояние отдельных систем и конструкции в целом. Техническое состояние машины полностью определяется, если уменьшение энтропии равно ее максимальному значению.

Ключевые слова: машинные парки, энтропия, эксплуатационная надежность, структурно-диагностическая схема, методика расчета.

Парки строительных и дорожных машин являются существенно неоднородными и характеризуются широкой номенклатурой входящей в их состав техники. Например, в транспортном строительстве используются строительные, путевые, дорожные, подъемно-транспортные, коммунальные и другие машины, которые могут быть обозначены как транспортно-технологические (ТТМ).

Для повышения эксплуатационной надежности машинных парков за счет своевременного обнаружения предотказного состояния машин, агрегатов или узлов требуется организация непрерывного целевого мониторинга.

Поскольку по результатам мониторинга принимается решение о необходимости выполнения определенных операций технического обслуживания или ремонта (ТО и Р), то одним из основных требований становится непрерывность и полнота информации. Рассматриваемые машины представляют собой системы, которые случайным образом могут оказаться в том или ином состоянии, то есть они обладают неопределенностью.

Рассмотрим систему X , которая может принимать состояния $x_1, x_2 \dots x_n$ с вероят-

ностями $p_1, p_2 \dots p_n$. Вероятность того, что система X примет некоторое состояние x_i :

$$p_i = P(X \sim x_i). \quad (1)$$

Функцией (рядом) распределения дискретной случайной величины является перечень всех ее значений и их вероятностей.

Здесь надо отметить, что для оценки степени неопределенности системы несущественно, какие именно значения принимают величины $x_1, x_2 \dots x_n$, а важны только их количество и вероятности. Чтобы систему X свести к дискретной случайной величине, следует каждому ее состоянию присвоить числовые значения, а именно — номер состояния [1].

В качестве количественной меры неопределенности системы, то есть случайной величины X , применяется энтропия

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \text{ бит.} \quad (2)$$

Для расчета энтропии необходимо сформировать ряд распределения, отображающий структуру исследуемой ТТМ. В технической диагностике, как правило, используются структурно-следственная или функционально-структурная схемы [2]. Структурно-следственная устанавливает множественные связи между основными элементами агрегата, узла, устройства или системы структурными (S) и диагностическими (D) параметрами. При этом множественные связи проявляются наличием нескольких диагностических признаков ($D_1, D_2 \dots D_i$) при изменении какого-либо структурного параметра S_i .

Большой информативностью обладает функционально-структурная схема, в которой часть конструктивных элементов, влияющих на рабочие функции, обособлена. Она представляет собой многоуровневую граф-модель. Так, например, модель дизельного двигателя может содержать четыре и более уровней: энергопреобразование; обеспечение рабочего процесса в двигателе; приборы и узлы; единичные сопряжения и процессы; величины износов и их характер и т.д. Функционально-структурная схема ДВС является сложной диагностической системой с комбинированными связями и позволяет рассчитать количество информации, необходимой для

поиска дефекта с заданной глубиной. При этом сам процесс диагностирования выполняется на стационарных или передвижных постах диагностики.

Для непрерывного мониторинга предлагается структурно-диагностическая схема. В отличие от структурно-следственной и функционально-структурной схем она содержит только конструктивные элементы, техническое состояние которых должно быть определено в ходе диагностирования. Следует отметить, что ТТМ имеют достаточное количество однотипных или схожих агрегатов, механизмов и узлов. Это позволяет построить схему обобщенной машины, увязывающей в единое целое основные ее элементы.

На рис. 1 приведена двухуровневая структурная схема обобщенной машины, корневой вершиной которой является рама с установленными на ней силовыми агрегатами, технологическим оборудованием и устройствами управления и сигнализации.

Здесь надо иметь в виду то обстоятельство, что технологическое (навесное) оборудование ТТМ достаточно разнообразно и его необходимо рассматривать отдельно от силовых агрегатов и устройств управления. К тому же существенную часть технологического оборудования составляет привод, отнесенный к силовым агрегатам.

Первый уровень включает в себя агрегаты и устройства: дизельный или бензиновый ДВС (1); трансмиссию (2); гусеничную или колесную ходовую часть (3); гидропривод (4); основное электрооборудование (5); тормозной механизм (6); управление поворотом (7). Вместо гидропривода (или дополнительно) в структурную схему могут быть предложены и другие приводы: электрический, механический, пневматический.

Ко второму уровню, который ограничен штрихпунктирной линией, относятся узлы и механизмы, входящие в состав агрегатов и устройств. Число уровней может быть увеличено. Например, к третьему можно отнести элементы механизмов или узлов.

На рис. 2 приведена структурно-диагностическая схема машины, каждый из элементов которой является источником диагностической информации. Так как основной задачей мониторинга





Рис. 1. Структурная схема обобщенной машины.

считается определение момента наступления предотказного состояния агрегата, то вполне достаточным будет рассматривать структурно-диагностическую схему как двухуровневую, состав ее элементов приведен в таблице 1. Увеличение количества уровней может осложнить проведение экспресс-диагностирования и чрезмерно увеличить его стоимость.

Первый уровень, который может быть обозначен как система Y , включает в себя силовые агрегаты, устройства управления и сигнализации с возможными состояниями $y_1, y_2 \dots y_m$ ($m=7$). Узлы и механизмы входят в состав системы X с возможными состояниями $x_1, x_2 \dots x_n$ ($n=26$).

Постановка диагноза «машина исправна/машина неисправна» может быть достигнута уже на первом уровне, в состав которого входят 7 агрегатов и устройств. При этом под неисправностью понимается достижение каким-либо параметром состояния предельного значения, за коим следует отказ системы.

Однако такой подход наталкивается на очевидные трудности. Прежде всего оценка неисправности системы или агрегата не всегда может быть выполнена по одному диагностическому параметру, то есть ситуация требует наличия нескольких измерительных приборов. Кроме того, агрегаты имеют различные вероятности безотказной работы, причем их расчет в рассматриваемом случае носит субъективный характер. Эти недостатки устраняются при использовании второго структурного уровня, содержащего узлы и механизмы, т. к. неисправность любого из них однозначно указывает на предотказное состояние системы.

При равных возможностях узлов и механизмов стать причиной неисправности машины энтропия ее технического состояния может быть максимальной:

$$H_{\max}(X) = \log_2 n = \log_2 26 = 4,7 \text{ бит}. \quad (3)$$

Но диагностирование машины с заданной глубиной поиска дефекта предусматривает последовательную ее проверку по уровням, которые могут рассматриваться как зависимые системы Y (I-й уровень) и X (II-й уровень). Если система X примет состояние x_i , то условная вероятность того,

что система Y примет состояние y_i , будет иметь вид:

$$P(y_j / x_i) = P(Y \sim y_j / X \sim x_i). \quad (4)$$

Условная энтропия системы Y при условии, что система X находится в состоянии x_i :

$$H(X) = - \sum_{j=1}^m P(y_j / x_i) \log_2 P(y_j / x_i). \quad (5)$$

Условная энтропия зависит от состояния системы X и может принимать различные численные значения. Умножая каждую условную энтропию (5) на вероятность соответствующего состояния p_i , получаем полную условную энтропию как сумму этих произведений:

$$H(X) = - \sum_{j=1}^m P(y_j / x_i) \log_2 P(y_j / x_i). \quad (6)$$

Так как по теореме умножения вероятностей $p_i P(y_j / x_i) = P_{ij}$, то (6) можно представить в виде:

$$H(Y / X) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \log_2 P(y_j / x_i). \quad (7)$$

Величина $H(Y/X)$ по (6) или (7) характеризует степень неопределенности системы I после того, как состояние системы II полностью определено, а энтропия машины

$$H_{\text{м}} = H(X, Y) = H(X) + H(Y/X). \quad (8)$$

Определим в качестве примера энтропию первого агрегата, в состав которого входят 6 из 26 узлов. По (6)

$$H_1(Y / X) = - \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^1 \frac{6}{26} \log_2 \frac{1}{6} = 0,231 \cdot 0,4346 \cdot 6 = 0,6023;$$

$$H_1(X) = - \sum_{i=1}^6 \frac{6}{26} \log_2 \frac{6}{26} = 0,4877.$$

Энтропия объединенной системы по (8):

$$H_1 = (X1/Y1) = 1,09.$$

В таблице 2 даны результаты расчета энтропии обобщенной ТТМ. Как видно из таблицы, расхождение с первоначальным расчетом энтропии составляет всего 0,06%, что говорит о хорошей сходимости результатов.

Каждую машину в парке можно рассматривать как независимую систему, по-





Таблица 1

Элементы структурно-диагностической схемы

№ п/п	Агрегаты, устройства		Узлы, механизмы	
	Наименование	Номер j	Наименование	Номер i
1	Двигатель внутреннего сгорания	1	Кривошипно-шатунный механизм	1
			Цилиндропоршневая группа	2
			Система питания	3
			Газораспределительный механизм	4
			Система смазки	5
			Система охлаждения	6
2	Трансмиссия	2	Муфта сцепления	7
			Коробка перемены передач	8
			Ведущий мост	9
			Соединительные валы	10
3	Ходовая часть	3	Подвеска	11
			Колеса, катки	12
			Шины, гусеницы	13
4	Гидропривод*	4	Трубопроводы	14
			Гидроцилиндры	15
			Рабочая жидкость	16
			Клапаны, распределители	17
			Насосы, моторы	18
5	Электрооборудование	5	Приборы освещения и сигнализация	19
			Стартер	20
			Генератор	21
			Аккумулятор	22
6	Тормоза	6	Тормозные барабаны	23
			Тормозные колодки	24
7	Управление	7	Рулевой механизм	25
			Усилитель рулевого механизма	26

* Вместо гидропривода может использоваться, например, электропривод в составе: генератор, двигатели, электрические аппараты, трансформаторы, силовые и контрольные кабели.

этому энтропия машинного парка $H(МП)$ будет равна сумме энтропий всех входящих в его состав машин

$$H(МП) = \sum_{k=1}^M H(M_k), \tag{9}$$

где k – порядковый номер машины в парке; M – количество машин.

Необходимо отметить, что увеличение количества элементов второго уровня, как и добавление в структурно-диагностическую схему дополнительных уровней, не оказывают принципиального влияния на энтропию машины. В этом случае повышается ее численное значение, т. е. надежность постановки диагноза.



Рис. 2. Структурно-диагностическая схема машины.

Таблица 2

Энтропия транспортно-технологической машины

№ п/п	Агрегат, устройство	Количество узлов, п	Вероятность состояния (уровень I) P_i	Энтропия (уровень II) $H(X)$, бит	Условная энтропия (уровень I) $H(Y/X)$, бит	Энтропия машины $H(M_k)$, бит
1	ДВС	6	0,231	0,4877	0,6023	1,0900
2	Трансмиссия	4	0,154	0,4105	0,3080	0,7185
3	Ходовая часть	3	0,115	0,3503	0,1821	0,5324
4	Гидропривод	5	0,192	0,4552	0,4458	0,9010
5	Электрооборудование	4	0,154	0,4105	0,3080	0,7185
6	Тормоза	2	0,077	0,2915	0,0770	0,3685
7	Управление	2	0,077	0,2915	0,0770	0,3685
Всего		26	1,000	2,6972	2,0002	4,6974

Таким образом, в результате проводимого мониторинга неопределенность состояния машинного парка будет уменьшаться, а количество информации, получаемой при полном выяснении состояния парка, равняться его энтропии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969.
2. Сидоров В. И. Информационная функционально-диагностическая модель дизельного двигателя/Труды МАДИ. – М., 1978.

ENTROPY OF TECHNICAL CONDITIONS OF TRAIN OF MACHINES

Vereskun, Vladimir D. – D.Sc. (Tech), rector of Siberian State University of Railway Engineering.
Manakov, Alexei L. – Ph.D. (Tech), associate professor, first pro-rector of Siberian State University of Railway Engineering.
Kirpichnikov, Anton Yu. – Ph.D. candidate, head of educational service center of Siberian State University of Railway Engineering.

The authors argue that continued monitoring of technical data makes possible to increase operation reliability of train of machines via prompt detection of the conditions of rolling stock that precede failures. The article describes the two-level structural and troubleshooting pattern of generalized machine that serves to explicitly detect the risk of failure for given systems and devices as well as for the vehicle in the large. Technical state of the machine is detected once entropy decreasing is equal to its maximal value.

Key words: train of machines, entropy, operation reliability, structural troubleshooting pattern, computation technique.

Координаты авторов (contact information): Верескун В. Д. – (383) 328–04–70, Манаков А. Л. – manakov005@mail.ru, Кирпичников А. Ю. – (383) 328–74–27

