

Анализ структур и методов управления техническим состоянием технологического оборудования бетонорастворных комплексов

В условиях непрерывного повышения темпов строительства и развития новых технологий, обеспечение эффективности эксплуатации технологического оборудования возможно только за счет совершенствования систем управления их техническим состоянием. Несвоевременная замена рабочих элементов, надежность которых снижается в процессе эксплуатации, приводит к недоиспользованию ресурса и экономическому ущербу от внезапных отказов и простоев технологического оборудования. Кроме того, отсутствие научно-методического аппарата, связанного с оценкой и прогнозированием технического состояния технологического оборудования на основе информационных систем автоматизированного управления оказывает негативное влияние на процесс эффективного их применения по назначению. Поэтому разработка методики оценки и прогнозирования технического состояния технологического оборудования с использованием информационных систем управления является актуальной задачей.

Ключевые слова: бетонорастворные комплексы, управление техническим состоянием, надежность, программа технической эксплуатации, технологическое оборудование, метод адаптивного управления.

Техническое состояние технологического оборудования бетонорастворных комплексов (БРК) формируется на стадии проектирования при выборе конструктивных параметров, конструкционных материалов, способов смазки узлов трения и т.п. На стадии изготовления элементов БРК происходит физическое обеспечение технического состояния путем материализации конструктивных решений. Процесс

использования оборудования по назначению характеризуется ухудшением технического состояния вследствие процессов изнашивания, усталостного разрушения, деформирования, а также разрегулирования. На интенсивность этих процессов, кроме конструктивных и технологических факторов, влияют режимы работы и условия использования объектов [1, 2, 3, 4].

Совокупность взаимодействующих объектов эксплуатации БРК и другого технологического оборудования (программы ТЭ, средств контроля, технического обслуживания и ремонта, обслуживающего персонала) образует систему управления их техническим состоянием (рис. 1).

Выполненный анализ существующих систем управления техническим состоянием технологического оборудования в различных отраслях производства и эксплуатации [5, 6, 7] показал однотипность процессов, составляющих такие системы (табл. 1), поэтому за основу такой системы необходимо принять



Рис. 1. Составляющие элементы системы управления техническим состоянием

И.Н. КРАВЧЕНКО

д-р техн. наук
(Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева),

О.В. ЧЕХА

(Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева),

Д.А. БУМАРСКОВ

[Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева],

М.Н. ЕРОФЕЕВ

д-р техн. наук
(Военная академия РВСН имени Петра Великого)

Процессы и критерии управления техническим состоянием объекта

Процессы	Обозначение	Критерии	Обозначение
Изменения технического состояния	$G_{итс}$	Условия эксплуатации объектов	γ_1
Оперативной оценки состояния	$G_{оос}$	Режим работы объекта	γ_2
Прогнозирования технического состояния	$G_{птс}$	Нормативная база оперативной оценки	γ_3
Принятия оперативного управленческого решения	$G_{пор}$	Нормативная база прогнозирования	γ_4
Принятия перспективного управленческого решения	$G_{ппр}$	Критерий принятия оперативного управленческого решения	γ_5
Подготовки к техническому обслуживанию	$G_{пто}$	Критерий подготовки к техническому обслуживанию	γ_6
Подготовки к ремонту и испытаниям	$G_{при}$	Критерий качества технического обслуживания	γ_7
Техническое обслуживание	$G_{то}$	Критерий принятия управленческого решения	γ_8
Ремонт и испытания	$G_{ри}$	Критерий подготовки к ремонту	γ_9
Влияния комплексов мероприятий на техническое состояние объекта	$G_{вкм}$	Критерий качества ремонта и испытаний	γ_{10}

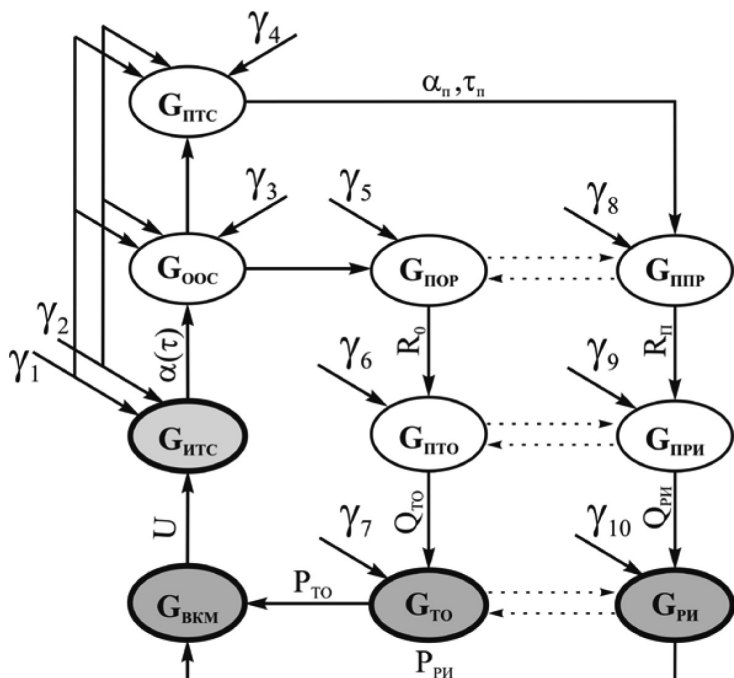


Рис. 2. Обобщенная структура управления техническим состоянием объекта:

$\alpha(\tau)$ – совокупность показателей технического состояния; α_n, τ_n – значение показателей технического состояния и наработки при которых остаточный ресурс будет исчерпан (результат прогнозирования); U – совокупность управляющих воздействий; R_0 – оперативное управленческое решение; R_p – перспективное управленческое решение; $Q_{то}$ – сигнал о готовности к техническому обслуживанию; $Q_{ри}$ – сигнал о готовности к ремонту и испытаниям; $P_{то}$ – сигнал об окончании выполнения мероприятий по техническому обслуживанию; $P_{ти}$ – сигнал об окончании выполнения ремонтных работ и проведения испытаний

обобщенную структуру управления техническим состоянием БРК.

Процесс управления техническим состоянием является замкнутым и двухконтурным (рис. 2). Расходование запаса работоспособ-

ности объекта в блоке $G_{итс}$ происходит при использовании этого объекта по назначению при соответствующих режимах работы и условиях эксплуатации.

Оперативная оценка технического состояния $G_{оос}$ дается как в процессе работы объекта, так и в период, когда он не работает. Прогнозирование технического состояния $G_{птс}$ осуществляется на основе результатов многократной оперативной оценки с учетом режимов работы и условий эксплуатации (прогнозного фона).

Принятие управленческих решений $G_{пор}$ и $G_{ппр}$ производится на основе оценок технического состояния с учетом соответствующих критериев. Подготовка $G_{пто}$ и $G_{при}$ и проведение технического обслуживания $G_{то}$, ремонта и испытаний $G_{ри}$ основываются на принятых управленческих решениях в установленных для них критериях.

Выделение блока $G_{вкм}$ необходимо в связи с тем, что результаты технического обслуживания, ремонта и проведенных испытаний в виде совокупности выполненных работ и процедур непосредственно не могут быть учтены при формализации процесса изменения технического состояния объекта в виде управляющего воздействия. Блок $G_{вкм}$ является преобразователем реальных (физических) управляющих воздействий с языка технологических процессов на язык параметров процесса изменения технического состояния объекта [8, 9].

При анализе структурной схемы (см. рис. 1) возникает вопрос, как обосновать совмещение

в одной системе управления несовместимых во времени процессов и учесть это при создании математических моделей. В модели объекта управления в качестве модельного времени логично использовать наработку (часы работы), а не календарное время. В управляющей части системы модельным временем будет календарное время, определяющее, на какой период объект выводится из эксплуатации, если это необходимо, например при ремонте.

При технологических перерывах в работе объекта, производственных простоях, техническом обслуживании и ремонте календарное время течет, а роста наработки нет. Календарное время в момент начала подготовки к техническому обслуживанию или ремонту останавливает наработку как модельное время объекта. На этой основе можно создать единую имитационную модель процессов расходования технического ресурса объекта и его восстановления.

Для управления техническим состоянием БРК в процессе эксплуатации разрабатывается программа технической эксплуатации (ТЭ), представляющая собой комплекс положений и норм, определяющих организацию и содержание работ по техническому обслуживанию и ремонту изделий в течение всего срока их службы. Таким образом, структура системы управления техническим состоянием БРК, а точнее оптимальная последовательность и сочетание процессов управления и будут составлять программу ТЭ.

Для формализованного описания программы ТЭ рассмотрим процесс управления техническим состоянием элементов БРК как стохастический процесс с дискретным временем.

Пусть техническое состояние БРК описывается случайным вектором $s(t) \in S$ конечного фазового пространства $S = \{0, \dots, 1\}$, а его эволюция во времени – случайной последовательностью $s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_n)$ где t_1, t_2, \dots, t_n – дискретные моменты времени. Обозначим $U = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}$ – пространство управлений, $u(t_n) \in U$ – управление, реализуемое в момент t_n . Динамика управляемого процесса описывается уравнением движения [10]

$$s(t_{n+1}) = f(s(t_n), u(t_n)) \quad (1)$$

и правилом выбора управлений $u(t_n) = \varphi(s(t_n), u(t_{n-1}))$ из некоторой совокупности правил $\Phi = \{\varphi\}$.

Последовательность правил $\sigma = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ определяет стратегию управления для временной последовательности $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$. Совокупность всевозможных стратегий управлений образует пространство стратегий $\Sigma = \{\sigma\}$. Тогда с учетом введенных понятий программа ТЭ включает в себя пространство возможных управлений U , последовательность моментов управления T и заданную для них стратегию управления σ .

Если каждому процессу (см. рис. 2) присвоить какое-либо значение, то пространство управлений U будет ограничено неким числом процессов [11]. Это связано с тем, что выделенные элементы представленной структуры соответствуют процессам, свойственным любым системам при их технической эксплуатации и использованию по назначению. Остальные процессы являются второстепенными и дополняют структуру системы управления техническим состоянием, но правильная вариация этих процессов с основными и будут составлять оптимальную структуру системы управления БРК.

Таким образом, различные сочетания базовых и второстепенных процессов управления представляют собой совокупность правил $\Phi = \{\varphi\}$, а стратегию управления σ можно представить в виде матрицы:

$$\sigma = \begin{vmatrix} G_{ПТС} & 0 & 0 \\ G_{ООС} & G_{ПОР} & G_{ППР} \\ G_{ИТС} & G_{ПТО} & G_{ПРИ} \\ G_{ВКМ} & G_{ТО} & G_{РИ} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Такое представление совокупности стратегий управления позволяет записать матрицу в бинарном виде, если система управления соответствует схеме (см. рис. 2), что в дальнейшем облегчит работу по созданию информационной среды управления:

$$\sigma_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Принимая во внимание, что в нашем случае $U = \text{const}$, выбор программы ТЭ можно варьировать в зависимости от стратегии управления техническим состоянием (табл. 2). При этом каждый процесс стратегий управления техническим состоянием будет зависеть от правил некоторой совокупности и определенной последовательности правил, а также временной последовательности и соответствующего критерия.

Программа ТЭ представляет собой не только определенную структуру процессов управления, но и некоторую управляющую программу, реализующую тот или иной

метод управления техническим состоянием БРК.

В теории управления известны три основных метода управления: программный, управление с обратной связью, адаптивный (табл. 3).

Для реального процесса эксплуатации комплексов при строительстве различных объектов характерна третья информационная ситуация, когда «неточно» задана модель объекта эксплуатации и не полностью известны и выдерживаются условия эксплуатации, но с участием элементов обратной связи.

Таблица 2

Варианты сочетаний стратегии управления техническим состоянием

Программа ТЭ	Стратегия управления	Матрица управления
П ₆	σ_6	$\sigma = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ G_{\text{ИТС}} & 0 & 0 \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$
П ₁	σ_1	$\sigma = \begin{vmatrix} G_{\text{ПТС}} & 0 & 0 \\ G_{\text{ООС}} & G_{\text{ПОР}} & G_{\text{ППР}} \\ G_{\text{ИТС}} & G_{\text{ПТО}} & G_{\text{ПРИ}} \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$
П ₂	σ_2	$\sigma = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ G_{\text{ООС}} & G_{\text{ПОР}} & G_{\text{ППР}} \\ G_{\text{ИТС}} & G_{\text{ПТО}} & G_{\text{ПРИ}} \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$
П ₃	σ_3	$\sigma = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{\text{ПОР}} & G_{\text{ППР}} \\ G_{\text{ИТС}} & G_{\text{ПТО}} & G_{\text{ПРИ}} \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$
П ₄	σ_4	$\sigma = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{\text{ППР}} \\ G_{\text{ИТС}} & G_{\text{ПТО}} & G_{\text{ПРИ}} \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$
П ₅	σ_5	$\sigma = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ G_{\text{ИТС}} & G_{\text{ПТО}} & G_{\text{ПРИ}} \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$
П ₆	σ_6	$\sigma = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ G_{\text{ИТС}} & 0 & G_{\text{ПРИ}} \\ G_{\text{ВКМ}} & G_{\text{ТО}} & G_{\text{РИ}} \end{vmatrix}$

Методы и критерии управления техническим состоянием

Метод управления	Критерии метода
Программный	Программное управление строится в соответствии с жестко заданной программой действий, независимо от реакции объекта управления и внешней среды. Применительно к программе ТЭ должна быть полностью определена математическая модель объекта эксплуатации, известны характеристики внешней среды (условий эксплуатации), четко заданы критерии оптимизации программы.
С обратной связью	При управлении с использованием принципа обратной связи программа управления является гибкой, она формируется в зависимости от реакций объекта управления. Однако при этом считается, что полностью известны модель объекта управления, характеристики внешней среды и четко заданы критерии управления.
Адаптивный	Адаптивное управление строится для «неточно» заданного объекта при не полностью известных характеристиках внешней среды, и, быть может, «нечётко» заданных критериях управления. В этом случае программа управления будет содержать элемент случайности и неопределённости.

Наиболее приемлемым для синтеза программы ТЭ представляется метод адаптивного управления, особенностью которого являются:

1. Управление в каждый момент времени формируется путем коррекции предшествующих управлений на основе текущей информации, поступающей по каналам обратной связи.

2. Адаптивные стратегии управления в общем случае не являются стационарными.

3. Управление строится не для отдельного объекта, а для класса объектов и обеспечивает достижение целей управления «в среднем» для всех объектов рассматриваемого класса.

4. Адаптивное управление является непрерывающимся процессом и осуществляется на бесконечном интервале времени. Только при этих условиях гарантируется достижение конечных целей с высокой вероятностью.

5. Правила выбора управлений подбираются в ходе реализации процесса управления.

В наиболее общем виде цель управления техническим состоянием БРК можно сформулировать следующим образом: обеспечение заданного уровня надежности и эффективности применения самоорганизующейся системы управления при минимальных затратах на их эксплуатацию. Поэтому для оценки эффективности стратегий управления будем их характеризовать векторным критерием типа «стоимость – готовность – эффективность»:

$$\mathcal{E}(t) = \{C_{\Sigma}(t), K_e(t), W(t)\}. \quad (3)$$

Первая компонента критерия $C_{\Sigma}(t)$ представляет собой суммарные затраты на контроль, техническое обслуживание и ремонт изделий за время эксплуатации. Значение затрат выступает как экономическая характеристика, показывающая какую долю занимают эксплуатационные расходы в общей структуре затрат на реализацию жизненного цикла изделия. При этом важным требованием, которому должно удовлетворять значение эксплуатационных затрат $C_{\Sigma}(t)$, является конечность предела

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_{\Sigma}(t)}{t} < \infty. \quad (4)$$

Вторая компонента $K_e(t)$ представляет собой нестационарный коэффициент готовности, который характеризует надежность в процессе эксплуатации с учетом их восстановления.

Третья компонента $W(t)$ показывает, как программа ТЭ обеспечивает эффективность применения системы автоматизированного управления по назначению. Для большинства БРК наиболее общим показателем эффективности является вероятность выполнения некоторой задачи.

Для управления техническим состоянием БРК в настоящее время используется ряд принципов. К ним относятся: управление по ресурсу, управление по уровню надежности, управление по состоянию. Принципы управления техническим состоянием по ресурсу и по состоянию предполагают прекращение технической эксплуатации изделия

до появления отказа с некоторой вероятностью. Характеристикой предотказного состояния при эксплуатации является ресурс изделия (технический, межрегламентный, межремонтный). Изделие эксплуатируется до выработки определенного ресурса. По истечении технического ресурса в целях профилактики и исключения аварийных ситуаций проводится контроль и техническое обслуживание изделий, периодичность которых определяется значением межрегламентного ресурса.

При управлении по состоянию ресурс для изделия не устанавливается. Характеристикой предотказного состояния являются значения параметров технического состояния изделия. Изделие эксплуатируется до тех пор, пока его параметры находятся в пределах установленных допусков. В случае выхода одного или нескольких параметров за пределы допусков на изделиях выполняется техническое обслуживание, либо профилактический ремонт. Важнейшим элементом эксплуатации по состоянию является контроль, с помощью которого осуществляется наблюдение за техническим состоянием изделий, его оценка и прогнозирование.

Управление по уровню надежности также не предусматривает установления для изделия какого-либо ресурса. Изделие эксплуатируется до тех пор, пока интенсивность (частота) отказов не превысит установленный уровень.

Таким образом, критерием предотказного состояния является значение интенсивности (частоты) отказов заданного уровня, производится техническое обслуживание или профилактический ремонт изделий, либо изделие полностью снимается с эксплуатации.

В практике эксплуатации БРК в той или иной степени применяются все три принципа управления, что во многом определяется уровнем технического совершенства объектов эксплуатации (надежностью, эксплуатационной технологичностью, контролепригодностью), информационного и технологического обеспечения системы управления техническим состоянием.

Таким образом, для обеспечения оптимальной стратегии управления техническим состоянием оборудования БРК согласно

анализу методов управления и их критериям, необходима разработка моделей взаимодействия внешней среды с объектом управления и оценки его технического состояния.

Выводы

1. Обеспечить работоспособность и надежность оборудования БРК в процессе эксплуатации возможно путем эффективного управления их техническим состоянием, включающего использование современных моделей и информационного обеспечения. Результаты анализа показали, что применение таких систем относительно БРК должно основываться с учетом адаптивного метода управления на основе принципа их эксплуатации по состоянию с контролем параметров. При этом программа технической эксплуатации является основополагающим элементом системы управления техническим состоянием, эффективность работы которой зависит от выбранной стратегии.

2. В результате формализованного описания программы технической эксплуатации установлено ограниченное пространство стратегий управления, что в дальнейшем позволит разработать необходимые модели процессов, составляющих преимущественную стратегию управления техническим состоянием комплексов.

Список kbntfhnehs

1. Кравченко И.Н. Опыт разработки и эксплуатации технологического оборудования строительной индустрии / И. Н. Кравченко, М.Н. Ерофеев, В.П. Тростин [и др.] // *Механизация строительства*. – 2009. – № 1. – С. 5–9.

2. Кравченко И.Н. Инженерные методы обеспечения долговечности и надежности машин и технологического оборудования в промышленности / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузряков, М.Н. Ерофеев [и др.]; Под общ. ред. И.Н. Кравченко. – М.: Изд-во «Эко-Пресс», 2011. – 424 с.

3. Кравченко И.Н. Повышение технологической надежности оборудования строительно-дорожных комплексов / И.Н. Кравченко, Н.И. Саляев, Д.А. Бумарсков // *Механизация строительства*. – №12. – 2015. – С. 9–15.

4. Кравченко И.Н. Модель взаимодействия рабочих элементов смесительного оборудования с ударно-абразивной средой / И.Н. Кравченко, Н.И. Саляев, Д.А. Бумарсков // *Строительные и дорожные машины*. – №5. – 2015. – С. 29–33.

5. Буравлев А.И. Управление техническим состоянием динамических систем / А.И. Буравлев, Б.И. Доценко, И.Е. Казаков. – М.: Машиностроение, 1995. – 240 с.

6. Кравченко И.Н. Система автоматизированного контроля управления техническим состоянием машин и оборудования / И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, Ю.В. Катаев, Т.А. Чеха // Сельский механизатор. – 2016. – №9. – С. 22-24.

7. Кравченко И.Н. Моделирование мобильных строительно-дорожных комплексов методами математического программирования / И.Н. Кравченко, Н.И. Саляев // Механизация строительства. – 2013. – №2. – С. 19-23.

8. Кравченко И.Н. Модель изменения параметров технического состояния механического оборудования бетонорастворных комплексов на основе критерия интенсивности износа / И.Н. Кравченко, Н.И. Саляев, Д.А. Бумарсков // Механизация строительства. – 2014. – №2. – С. 46-50.

9. Кравченко И.Н. Автоматизированный контроль изменения технического состояния машин и оборудования / И.Н. Кравченко, М.Н. Ерофеев, М.С. Захарова // Строительные и дорожные машины. – 2016. – №12. – С. 35-40.

10. Зырянов Ю.Т. Управление профилактикой в организационно-технических системах / Ю.Т. Зырянов, К.А. Малыков; под общ. ред. Ю.Т. Зырянова. – М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2005. – 160 с.

11. Саушев А.В. Марковские модели управления состоянием сложных технических систем / А.В. Саушев // Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 57-62.

ANALYSIS OF THE STRUCTURES AND METHODS OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF CONCRETE COMPLEXES

Abstract. In conditions of continuous increase in the rate of construction and development of new technologies, providing efficiency of operation of technological equipment is possible only by improving management systems of their technical condition. Failure to replace the work item, the reliability of which decreases in the process of operation, leads to underutilization of the resource and economic damage from catastrophic failure and downtime of production equipment. In addition, the lack of scientifically-methodical device associated with the assessment and forecasting of the technical condition of technological equipment on the basis of information systems of automated management has a negative impact on the process of effective use. Therefore, development of methods of evaluation and prediction of technical state of technological equipment with the use of information management systems is an urgent task.

Keywords: concrete complexes, technical condition control, reliability, the program of technical operation, process equipment, adaptive control method.

СДМ