



УДК 622.331.002.5

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, Е.В. Полетаева
ФГБОУ ВПО «Тверской государственный
технический университет»
г. Тверь, Россия
E-mail: gorloviv@yandex.ru

М.Г. Рахутин
Национальный исследовательский
технологический университет
«МИСиС», Горный институт
г. Москва, Россия
E-mail: mtm98@yandex.ru
Дата поступления 04.09.2015

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация

Определение с помощью имитационного моделирования периодичности операций по восстановлению работоспособности трибоэлементов с учётом их состояния и внешних факторов воздействия, даёт возможность существенно улучшить параметры эксплуатации технологических машин. Имитационные модели позволяют осуществлять объективный выбор наиболее оптимальных решений по воздействию на трибоэлементы машины, что позволит повысить эффективность производства.

Ключевые слова: восстановление, ремонт, алгоритм, информационные технологии, техническое состояние, имитационные модели.

Введение

Актуальным направлением повышения эффективности технологических машин является создание систем управления состоянием на основе имитационного моделирования эксплуатации объектов и параметрической оптимизации компонентов, отвечающих за их работоспособность.

Методы воздействия на параметры эксплуатации конкретной технологической машины зависят от большого количества условий, а каждое реализуемое мероприятие строго индивидуально, и определяется состоянием объекта и внешним воздействием на него (организационно-технические и другие факторы). Решить задачу оценки эффективности использования любой технологической машины можно на основе имитационного моделирования [1].

В середине прошлого века задачи управления материальными объектами на уровне предприятий были достаточно простыми, требовалось получить календарный

план производства продукции, на основе договоров поставки и прогноза реализации. Исходя из прогнозируемого плана производства, устанавливалась потребность в сырье, материалах, комплектующих, требующихся для производства. Поставленные задачи решались с помощью автоматизированных систем MPS (Master Production Scheduling) – объемно-календарного планирования.

Дальнейшим развитием этого направления стали ERP (Enterprise Resource Planning) и EAM (Enterprise Asset Management) системы. Термины были введены в 1990 и в 1998 году аналитической компанией Gartner Group и используются во всём мире. Данные термины используются для обозначения, с одной стороны, определенных совокупных методов (методологии) управления материальными активами предприятия, а с другой стороны, наименования определённого класса информационных систем, отвечающих за автоматизацию функций

менеджмента и информационную поддержку производства. Производители ERP систем, пытаясь максимально занять рынок автоматизированного управления материальными активами предприятий, дополнили свои системы программными модулями, отвечающими за управление ТО и ремонтами оборудования. Так, например, модуль ТО и Р (корпорации Oracle) был использован в ERP-системе Oracle E-Business Suite в 2002 году. ЕАМ системы формировались как независимые информационные продукты, направленные на решение задач связанных с управлением производственными фондами, а также ТО и ремонтом. Использование таких систем, адаптированных к условиям использования конкретного типа оборудования, позволяет повысить эффективность машин за счёт более точного планирования операций по восстановлению работоспособности и прогнозированию эксплуатации с учётом изменяющихся факторов воздействия на технологический процесс.

Основная часть

Для формализации анализа параметров технического состояния машины необходимо разложить её на структурные подсистемы нескольких уровней, на самом нижнем уровне которых будут объекты (трибоэлементы – сопряжения трения) с определённым количеством свойств, по которым можно оценивать их состояние с точки зрения надёжности [2].

В случае рассмотрения технологической системы с точки зрения надёжности такими свойствами являются: триботехнические параметры сопряжений, периодичность их обслуживания, наработка с начала эксплуатации, наработка с последнего ТО и остаточный ресурс, по которым можно оценивать техническое состояние машины в целом.

На основе анализа конструкции торфяных машин (ТМ) для фрезерного способа добычи были выявлены основные структурные схемы механизмов и выбраны элементы, которые оказывают определяющее

значение на надёжность. Разработана структурная схема комплексного агрегата, отражающего свойства большинства ТМ, на основе, которой создана имитационная модель. Удалив из структуры комплексного агрегата элементы, несвойственные конкретной торфяной машине, можно получить модели большинства ТМ.

В таблице 1 представлена часть структурной модели, в которой отображены основные свойства несущей подсистемы бункерной уборочной машины МТФ-43А. На нижнем уровне модели представлены трибосопряжения, которые обеспечивают функционирование подсистемы, и именно от них зависит работоспособность технологического объекта.

Единица на пересечении i -той строки и j -того столбца обозначает, что i -тый структурный элемент обладает j -тым свойством, в противном случае ставится 0. Каждая строка матрицы, описывающей свойства сопряжений, представляет собой булев вектор логические операции с которой, обеспечивают возможность автоматизации процессов принятия решения на основе алгебры логики.

Имитационная модель M комплексного агрегата содержит 430 основных элементов, позволяет определить работоспособность ТМ в любой момент времени

$$M = \begin{cases} y^1(t) = \gamma_1(t, u_{11}(t), u_{12}(t), \dots, u_{1p}(t)) \\ y^2(t) = \gamma_2(t, u_{21}(t), u_{22}(t), \dots, u_{2p}(t)) \\ \dots \\ y^i(t) = \gamma_i(t, u_{i1}(t), u_{i2}(t), \dots, u_{ip}(t)) \end{cases},$$

где: y – значение характеристики состояния i -того элемента (1 – исправен, 0 – неисправен); γ – функция изменения состояния i -того элемента; t – наработка машины с предыдущего состояния; $u_{i\varphi}$ – элемент структурной модели описывающий свойства сопряжений (трибоэлемента) с точки зрения безотказности (может принимать значения 1 , 0 или натурального числа – значения описывающего свойство элемента).

Свойства структурных элементов несущей подсистемы

Сопряжения	Обозначение элемента	Сопряжение скольжения	Сопряжение качения	Сопряжение антифрикционное	Сопряжение фрикционное	Сопряжение регулируемое	Сопряжение нерегулируемое	Сопряжение без смазки	Сопряжение с консистентной смазкой	Сопряжение с жидкой смазкой	Периодичность ТО-1, 60 мото.час	Периодичность ТО-2, 240 мото.час	Периодичность ТР, 1920 мото.час	Периодичность КР, 3840 мото.час	Общий ресурс, мото.час	Трудоёмкость ТО, чел/час	Трудоёмкость ремонта, чел/час
Корпус каретки и втулка	A211	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1920		0,5
Втулка и опорная ось	A212	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	3840	0,15	0,1
Корпус каретки и ось колеса	A213	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	3840		0,2
Колесо опорное и подшипник	A221	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3840		0,3
Подшипник и ось опорного колеса	A222	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1920		0,3
Подшипник качения опорного колеса	A223	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1920	0,15	0,2
Уплотнение подшипника опорного колеса	A224	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	3840		0,3
Поддерживающее колесо и подшипник	A231	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	3840		0,2
Подшипник и ось поддерживающего колеса	A232	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	3840		0,2
Подшипник поддерживающего колеса	A233	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	3840		0,2
Уплотнение подшипника поддерж. колеса	A234	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1920		0,5
Колесо натяжное и подшипник	A241	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1920		0,5
Подшипник и ось натяжного колеса	A242	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	3840		0,2
Ось натяжного колеса и натяжителя	A243	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	3840		0,5
Натяжитель и рама	A244	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	3840		0,5
Подшипник натяжного колеса	A245	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1920	0,15	0,2

Модель M торфяной машины представляет собой несколько матриц M_i , состоящих из элементов $u_{i\varphi}$, связанных между собой логическими функциями (рисунок 1).

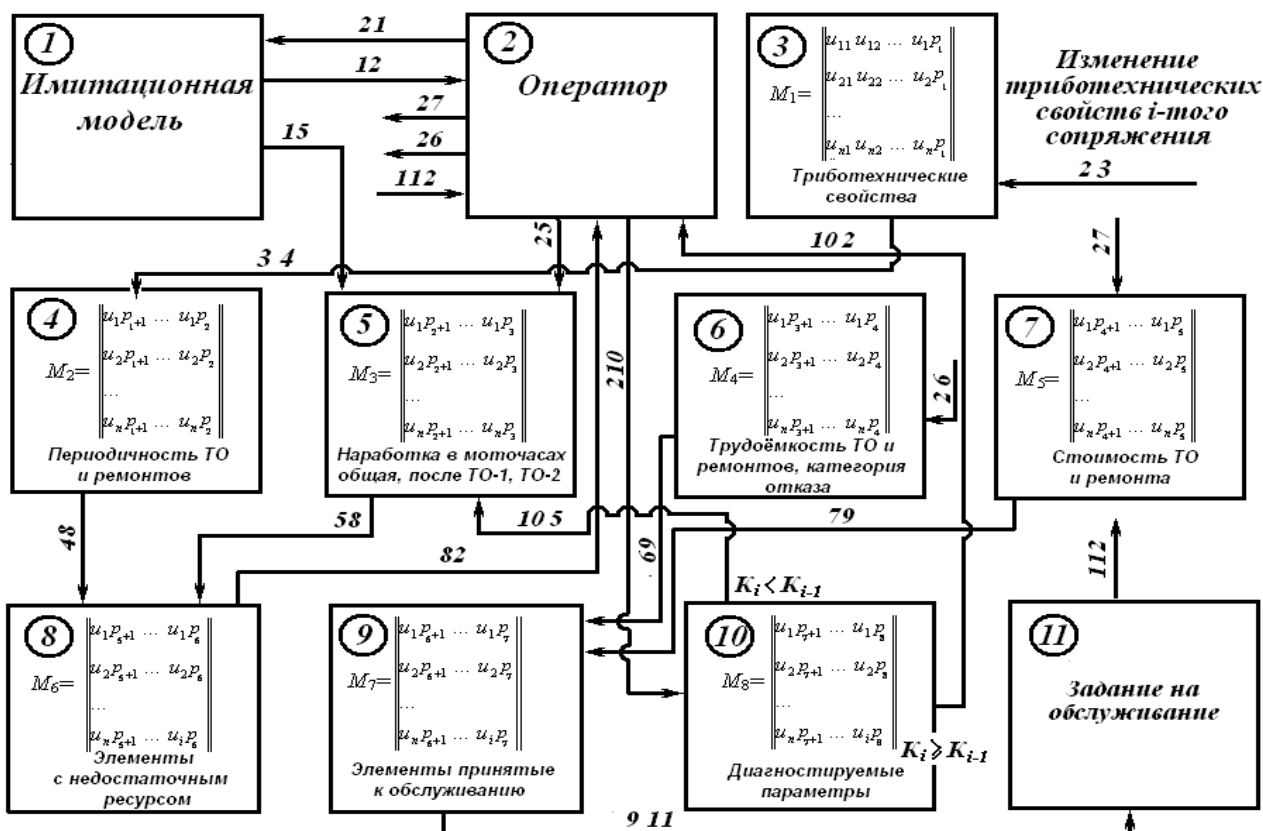


Рисунок 1. Логические связи между блоками структурной модели технического состояния технологической машины

В имитационной модели изменение возможности функционирования технологической машины на отрезке времени $[t_m, t_{m+1}]$ выражается через функции

$$f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)),$$

где z^r – простые по погодным и организационным причинам.

Располагая значениями внутренних характеристик можно вычислить значения основных параметров отвечающих за возможность осуществления технологического процесса при всех t_j :

$$f^i(t_{m+1}) = f^i(t_m) + \Delta t f^i(t_m, y^1(t_m), \dots, y^n(t_m), z^1(t_m), \dots, z^r(t_m)), \quad (1)$$

$i = 1, \dots, n, m = 0, 1, \dots, T$.

Система (1) определяет значения характеристик элементов изучаемого процесса в дискретные моменты времени $t_m, m = 1, \dots, T$ (время функционирования машины в часах), Δt – шаг дискретизации модели (один час).

Анализ структурной модели позволил выявить трибоузлы, имеющие сходные параметры и воздействовать на них для снижения затрат на эксплуатацию [3]. Например, узел A212 – сопряжение втулки и опорной оси рамы несущей. Диаметр опорной оси 50 мм, выполнена из стали 40X с твёрдостью поверхности 50 HRC, шероховатостью Ra 0,16-0,32 мкм. Типовая втулка выполнена из бронзы БрО-10Ц2. Сопряжение требует периодического обслуживания из-за срабатывания смазки на контактных поверхностях (периодичность обслуживания 60 моточасов). Давление на рабочей поверхности сопряжения 3,3-3,8 МПа.

Для оптимизации функционирования подсистемы выгодно воздействовать на этот элемент с целью увеличения его цикла обслуживания, т.е. выявить его основные триботехнические свойства и предложить способ решения поставленной задачи (синтезировать трибоузел с соответствующими свойствами). Возможным способом увеличения цикла обслуживания является использование в качестве материала для втулки опорной каретки самосмазывающегося полимера – графитонаполненного капролона.

Физико-механические свойства капролона (полиамид-6 блочный) позволяют использовать его вместо цветных металлов и сплавов. Для улучшения антифрикционных свойств полимера его насыщают графитом (около 2% по массе). Графитонаполненный капролон сохраняет практически все свойства обычного капролона, но имеет значительно меньший коэффициент трения, который при трении по стали составляет около 0,15. Использование такого материала, не требующего обслуживания, обеспечивает существенное сокращение трудоёмкости ТО, и повышает надёжность трибоузла.

Оценить предлагаемые мероприятия по совершенствованию узла необходимо с помощью имитационного моделирования. Для проведения имитационного исследования необходимо загрузить данные о ма-

шине (суммарная наработка с начала эксплуатации, данные о погоде на десять дней и общее количество дней неблагоприятных для добычи торфа в месяце). После выполнения указанных операций в диалоговом окне имитационной модели отображаются результаты исследования в виде файла с расширением xls (рисунок 2) [4].

В результатах исследования представлены обслуживаемые элементы, трудоёмкость их обслуживания и день проведения соответствующих операций ТО. Так же выводится общее число часов работы машины и времени нахождения в ремонте и обслуживании.

Определив количество часов работы машины и времени нахождения в обслуживании и ремонте можно провести оценку эффективности мероприятий по совершенствованию трибоэлементов.

Номер по порядку	Общая наработка ко времени ТО	Оставшаяся наработка до ТО	Проедлагаемый день проведения ТО	
69	B1	Преобразователи энергии	Двигатель ЯМ3238	2
70	B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25
71	G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25
72	G331	Ремённая передача	Ремень	0,25
73				3
74				
75	5	376	176	30
76				Внеочередное обслуживание в связи с выходом из строя эле
77	Код	Система	Элемент	Трудоёмкость
78	A233	Колесо поддерживающее	Подшипник поддерживающего колеса	0,5
79				0,5
80				
81	6	380	180	33
82				Внеочередное обслуживание в связи с выходом из строя эле
83	Код	Система	Элемент	Трудоёмкость
84	G721	Цепная передача 1	Цепь и звёздочка	0,5
85				0,5
86				
87	7	383	183	36
88				Обслуживание совмещено с плохими погодными условиями
89	Код	Система	Элемент	Трудоёмкость
90	A212	Опорная каретка	Втулка и опорная ось	0,25
91	B1	Преобразователи энергии	Двигатель ЯМ3238	2
92	B2	Преобразователи энергии	АКБ	0,25
93	G213	Муфта сцепления	Подшипник выжимной и направляющая втулка	0,25
94	G331	Ремённая передача	Ремень	0,25
95				3

Рисунок 2. Результаты анализа обслуживания технологической машины

С помощью имитационной модели комплексного агрегата был проведён анализ изменения сезонной производительности машины. На рисунке 3 показана зависимость изменения производительности Q комплексного агрегата (с наработкой 1000 часов с начала эксплуатации при 50 метеонеблагоприятных днях за сезон) при увели-

чении цикла обслуживания за счёт модификации трибоэлементов. Увеличение ресурса трибоэлементов позволяет сократить практически на треть сервисные работы, что обеспечивает повышение производительности технологической машины на 7-15% в зависимости количества метеонеблагоприятных дней.

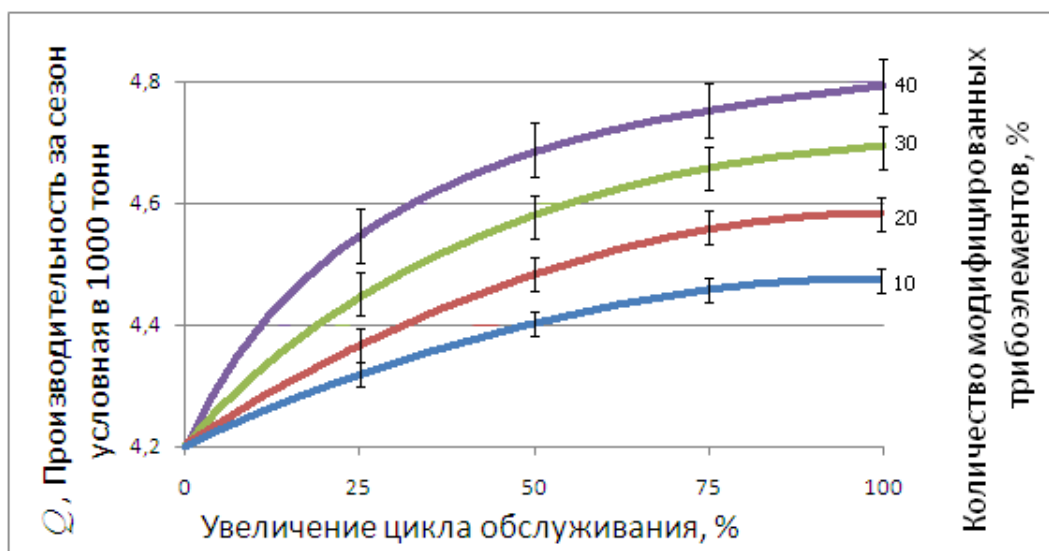


Рисунок 3. Изменения производительности Q за сезон комплексного агрегата за счёт модификации трибоэлементов

Исследование на имитационной модели показывает, что изменение цикла обслуживания трибоэлементов влияет на производительность технологической машины нелинейно и зависит от большого количества факторов. Следовательно, принятие решения о воздействии на трибоэлементы должно быть основано на анализе результатов моделирования и обосновано с точки зрения затрат.

Выявление наиболее значимых свойств трибосопряжений, на основе моделирования, и синтез трибоэлементов с улучшенными параметрами, позволяет управлять изменением технического состояния узлов и технологических машин в целом, что обеспечивает повышение эффективности их эксплуатации.

Затраты на мероприятия по совершенствованию параметров трибоэлементов могут быть значительными и не окупаться в процессе эксплуатации машины. Поэтому с помощью моделирования необходимо проводить анализ предлагаемых мероприятий с точки зрения их эффективности.

Для сравнения эффективности эксплуатации ТМ можно использовать относительную эффективность $\Delta \mathcal{E}$, которая определяется как отношение объёма выполненных работ (в рублях) технологической машиной по результатам моделирования процесса эксплуатации \mathcal{E}_k с использованием модифицированных узлов к объёму работ

машины \mathcal{E}_{k-1} без соответствующих мероприятий

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_k / \mathcal{E}_{k-1},$$

$$\mathcal{E}_k = C_T q' ((N_{ном} - N'_{мнд}) t_{дн} - \sum_{i=1}^n \tau_i) - \sum_{i=1}^n \psi_i,$$

где C_T – цена единицы продукции, q' – условная производительность технологической машины, $N_{ном}$ – номинальный фонд работы машины, $N'_{мнд}$ – количество неблагоприятных дней, $t_{дн}$ – дневная наработка машины, τ_i – время нахождения машины в ТО и ремонтах не совпавшее с неблагоприятными днями, ψ_i – стоимость ремонта и обслуживания i -того трибоэлемента.

Величина $\Delta \mathcal{E}$ позволяет провести сравнительную оценку различных вариантов эксплуатации торфяных машин с целью выбора наиболее оптимальных мероприятий по совершенствованию трибоэлементов ТМ.

Заключение

С помощью имитационного моделирования может быть проведён анализ эксплуатации любой технологической машины, это позволяет выбирать наиболее эффективные с точки зрения осуществления технологического процесса решения по воздействию на их трибоэлементы. Имитационное моделирование позволяет на основе компьютерных исследований выявлять узлы, требующие частых сервисных работ и недостаточный ресурс, и за счёт их

улучшения снижать затраты на обслуживание и ремонт, повышая эффективность эксплуатации.

Библиографический список

1. Горлов И.В., Болотов А.Н. Информационная составляющая системы управления работоспособностью торфяных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 1. – С. 216-221.
2. Горлов И.В., Полетаева Е.В. Управление безотказностью технологической машины на основе анализа структурной

модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 9. – С. 223-226.

3. Горлов И.В., Полетаева Е.В. Анализ состояния технологического объекта на основе структурной модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2014. № 1. – С. 146-149.
4. Горлов И.В., Полетаева Е.В. Прогнозирование эксплуатации технологической машины на основе агрегативной модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2013. № 10. – С. 218-222.



УДК 669.1.002.5-192

**В.А. Русанов, Д.П. Паньков, А.С. Губин,
И.А. Анцупова, Р.Н. Савельева**
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: volody-74mgn@mail.ru
Дата поступления 23.11.2015

МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СТЕНДА ПЕРЕВАЛКИ ВАЛКОВ СТАНА 2000 ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Аннотация

Разработана физико-вероятностная модель прогнозирования надежности направляющих узлов станда перевалки валков стана 2000 холодной прокатки ОАО «ММК». С этой целью поставлена и решена однопараметрическая краевая задача теории надежности трибосистем для граничных условий и расчетной схемы сопряжения «планка - плита скольжения». На основе проведенных проектных исследований на модели предложены способы повышению долговечности направляющих узлов и рассчитан предполагаемый срок их службы по критерию износостойкости планок. Наиболее долговечная конструкция внедрена в промышленную эксплуатацию.

Ключевые слова: трибосопряжение, направляющий узел перевалки валков; модель отказов; критерий; износостойкость, ресурс, срок службы, прогнозирование и повышение.

Введение

Одной из актуальных проблем производства холоднокатаного листа является вопрос обеспечения требуемого уровня надежности и долговечности вспомогательных устройств и агрегатов прокатных станов. Как показывает практика, главной причиной их отказов является износ подвижных сопряжений, значительную часть которых составляют опоры скольжения, работа-

ющие в условиях граничного или полужидкостного трения [1]. К ним относятся направляющие системы самых различных типов и модификаций, в частности, направляющие узлы скольжения стандов перевалки валков станов холодной и горячей листовой прокатки, ползуны кантователей рулонов и множество других подобных пар трения поступательного движения.