

Ольшевский С. Н., Самойлова Е. В., Поплавский С. Ф.

# ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК В УПРАВЛЕНИИ АКТИВАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ПРИМЕРЕ КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ

В современных реалиях на горнодобывающих предприятиях на фоне массовой цифровизации производства и необходимости достижения максимальной производительности не стоит забывать о необходимости повышения технической готовности и надежности техники. На текущий момент одной из серьезных проблем, особенно в связи с необходимостью импортозамещения и использования новых для технологических процессов элементов и технологий, является непредвиденный отказ техники, усугубляющийся нарушением производственных и бизнес-процессов и простоями, влияющими на эффективность и финансовые показатели.

**Энергетический ресурс компании — главный актив в управлении производством.** Поэтому важным является наличие эффективных методов контроля фактического ресурса карьерной техники.

Необходимость выполнения энергонасыщенных операций на перемещение горной массы и затрачиваемой для данных процессов мощности обуславливает использование энергоустановок с характеристиками повышенных значений крутящего момента и мощности, зачастую работающих на пределе своих показателей. При этом актуальны требования к надежности и ресурсу техники. Повышение эффективности горнодобывающего производства требует применения современных и эффективных методов контроля и управления производительностью. На текущий момент параметр мощности **непосредственно в эксплуатации** для отдельной единицы техники и парка в целом не контролируется. Как следствие, из-за потерь мощности существенно снижается производительность технологических процессов, а каждый час простоя техники приводит к существенным финансовым потерям, исчисляемым в сотнях тысяч рублей (для самосвала — \$8000; для экскаватора — \$40000, по данным открытых докладов на форуме MINEX2023).

В эксплуатационных условиях оптимально использовать обобщенный критерий, который способен охарактеризовать эффективность применения техники и учитывать в себе одновременно такие параметры, как техническое состояние конкретной единицы техники, ее ресурс, риск отказа/простоя. Построенная на таком принципе те-

пловая (цветовая) карта парка техники будет способствовать оперативному и своевременному принятию решений о выводе в целях своевременного технического обслуживания конкретной единицы техники из эксплуатации, основанному на оценке риска потери производительности и роста затрат на устранение непредвиденных поломок, и тем самым возможности эксплуатировать технику не по критерию исправности, а по критерию заданной производительности.

Осведомленность о состоянии техники устанавливается наличием данных о способности каждой единицей парка выдавать заданную мощность и поддерживать уровень потерь мощности (механических потерь) в допустимых пределах, соответствующих исправному состоянию. Процедуры определения этих параметров входят в комплекс мер по энергоаудиту парка техники, которые могут быть автоматизированы с помощью цифровых инструментов. При этом информация о выявленных несоответствиях доводится до сведения специалистов в режиме реального времени. Такой способ мониторинга индикаторов риска позволяет проводить упреждающие процедуры проверки и своевременное техническое обслуживание/ремонт

по состоянию, а также вывод из эксплуатации нерентабельной техники.

Ключевой стратегией реализации данного инновационного подхода для осуществления энергоаудита и прогностического анализа технического состояния парка техники является обработка цикла: «испытание → цифра → обслуживание». В таком случае ресурс техники вырабатывается непосредственно до «точки отказа», но не достигая ее, при этом извлекается максимальная производительность. Таким образом, одним из важных параметров целевой функции повышения прибыли и конкурентоспособности горнодобывающих предприятий является управление энергетическим ресурсом для обеспечения технологических процессов, основанное на оценке вероятности рисков потерь производительности техники и уровня последствий от потерь продукции. Задача сводится к грамотному применению методов предиктивной аналитики, алгоритмов машинного обучения, средств обеспечения потока и вида данных, необходимых для их интерпретации в области эксплуатации и сервиса техники.

Реализация происходит за счет системного подхода к построению платформ контроля и управления надежностью функционирования территориально-распределенных структур горнорудного производства, а также инновационных методов, технических средств сбора данных, аналитических инструментов по проведению энергоаудита для разработки плана и стратегии технического обслуживания и ремонта техники.

**Поплавский Станислав, директор по инновациям, направление «Горное дело и Металлургия» Фонда «Сколково»:**

— Рост инновационных решений в горнодобывающей отрасли, активное взаимодействие с IT-компаниями и использование удаленных сервисов, включая обобщенную заинтересованность в планировании и информационном обмене с ведомствами различного уровня, способствовало тому, что Минцифры РФ, МПТ РФ, ФСИ, Фонд «Сколково» предлагают меры поддержки на внедрение инноваций и цифровую трансформацию производства, создаются проекты, в рамках которых предусмотрен комплекс мероприятий по внедрению цифровых технологий и платформенных решений в горнодобывающей отрасли. Одобренные инициативы становятся полноценными программами поддержки отрасли, возникают пилотные проекты, активируются точки роста, усиливается стратегическое мышление руководителей, наблюдается положительная динамика уровня инновационности и диджитализации компаний.

Обоснованным решением может стать привлечение экспертов по реализации процедуры обследования техники или даже передача функции внутреннего энергоаудита парка на аутсорс с целью повышения эффективности горнорудного производ-

ства согласно следующему правилу определения очевидных пределов границ уровня состояния технических систем в реальных условиях:

- нижняя граница — ниже которой производственная деятельность предприятия уже нецелесообразна, т. к. эффективность ее функционирования будет недостаточной для получения прибыли (решение: требуется провести обслуживание техники);

- верхняя граница — это уровень требуемой производительности выше, чем первоначальная мощность, при этом обслуживание никогда не позволит достичь требуемой производительности, т. е. оно нецелесообразно.

При ухудшении производительности возможен выбор стратегии управления обслуживанием, исходя из оценки рисков возможных последствий.

Установление таких зон происходит на основании цепочки следствий: *потеря мощности → снижение производительности → потери продуктивности и продукции → нецелесообразное повышение затрат на обеспечение требуемой производительности → недополучение прибыли → снижение финансовых показателей компании.*

Уровни зон могут быть интерпретированы эффективностью использования мощности при вводе в эксплуатацию ресурсов, как показано на рисунке 1.

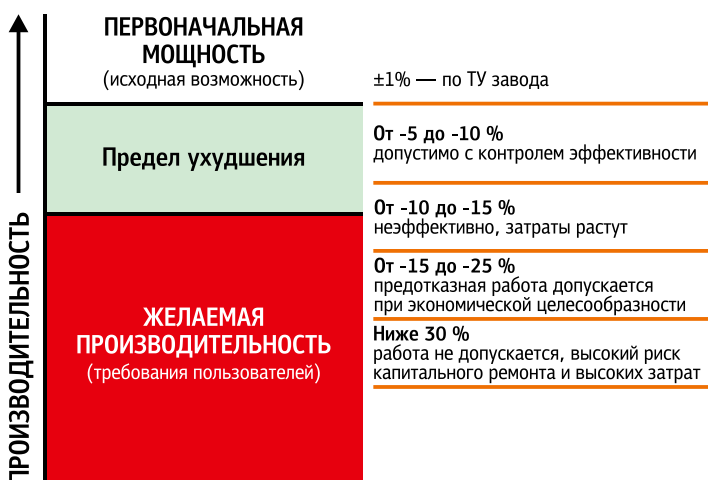


Рис. 1. Задание пределов ухудшения производительности

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И МОЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ — ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ В УПРАВЛЕНИИ

Очевидным требованием к разработке стратегии управления техническим обслуживанием является минимальный уровень производительности в определении функции надежности выполнения технологических процессов, которые характеризуются следующими параметрами: а) мощность энергоустановок; б) условный механический коэффициент полезного действия ( $KПД_{мех}$ ).

Таблица 1. Минимальные требования к функциональным параметрам

Функция	Функциональный отказ*	Режим отказа	
		Потери мощности, %	Уровень $KПД_{мех}$
Производительность	-5 %	5–10	0,7–0,8
	-10 %	10–15	0,67–0,7
	-15 %	15–25	0,6–0,67
	-20 %	>30	0,5–0,6

\* Следует согласовать внутри компании критерий «функционального отказа»

Режим функционального отказа, приведенный в таблице 1, сопровождается различными причинами (увеличение расхода топлива, износ и повышение трения, нарушение регулировок и т. д.), характеризующимися такими комплексными параметрами, как мощность энергоустановки и КПД<sub>мех</sub>. Потери мощности анализируются согласно рисунку 1. Далее принимается решение о целесообразности эксплуатации или необходимости проведения технического обслуживания. Показатель КПД<sub>мех</sub> универсальный, определяет текущий **фактический** уровень в реальных условиях технического объекта и системы в целом.

Предлагаемые стандарты являются исходными данными для цифровой записи технических систем. Такие контрольные параметры, как мощность, производительность, наработка на отказ, расход топлива, энергоэффективность, КПД<sub>мех</sub>, технический ресурс, функционально связаны между собой и прямо с целевой функцией максимизации эффективности компании.

Следует отметить, что даже существенные отклонения мощности и КПД<sub>мех</sub> являются скрытыми — это режимы, результаты которых не становятся очевидными. Специалисты устанавливают факт после очевидного другого отказа или нестандартного события, как правило, приводящего к более серьезным последствиям. Не менее важно учитывать то, что до момента явного отказа эксплуатация технической системы уже неэффективна. Более того — увеличивается риск серьезных поломок и связанных с этим издержек, как следствие — потери продукции. Средства технического контроля должны обладать способностью определять данные параметры с достаточным разрешением для определения тенденций, приводящих к отказам, и показателей надежности технической системы.

**Ольшевский Сергей, доктор технических наук, эксперт РАН:**

— Стратегическое риск-ориентированное планирование, помимо минимизации производственных затрат, позволяет учитывать целевые функции управления предприятием, включая роль производственных активов, вопросы источников создания стоимости, соотношение риска и доходности, а также конкурентное позиционирование компании.

Ключевым моментом являются открывающиеся перспективы аналитики — развитие и взаимосвязи между цифровыми сервисами и реальными фактическими данными; интеграция полученных данных и знаний в цифровой трансформации промышленно-производства.

В таких задачах потоки информации генерируют колоссальные объемы структурированных и неструктурированных данных. Это способствует не только эффективному управлению ресурсами и оптимизации производственных процессов, но также раскрывает ценность предиктивной аналитики — новой информации и новых требований к ее получению для реализации комплексных решений. Вместе с тем многие компании при смене политики в сторону автоматизации бизнес-процессов испытывают ограничения как с точки зрения технологий, так и с точки зрения кадрового обеспечения.

Данные принципы были применены в условиях производственных процессов медно-цинкового рудника при контроле состояния парка техники, основанном на расчете следующих диагностических параметров:

- КПД<sub>мех</sub>;
- эффективная мощность, Ne;
- мощность потерь, Nc;
- неравномерность работы цилиндров, δ.

Характеристики данных параметров обладают следующими свойствами:

- данные выражены в виде точных и понятных величин, позволяющих сравнивать их значения по результатам обработки различных тестов;
- обладают границами, при которых принимается решение об отнесении объекта диагностирования к неисправному/неудовлетворительному состоянию ДВС в целом и по отдельным цилиндрам;
- позволяют по тренду изменения характеристики прогнозировать ресурс ДВС до капитального ремонта, а также показывать локальные отклонения, вызванные неисправностью конкретных цилиндров / пар цилиндров.

Новая методика аналитики основана на предикатах:

1. Достаточным условием при оценке технического состояния техники является отклонение в большую сторону значения параметра КПД<sub>мех</sub> от критического в 65 %.
2. Изменение эффективной мощности коррелирует с причинами, влияющими на эффективность тепловыделения (работа форсунок, качество топлива, состояние ЦПГ и ГРМ и пр.).
3. По изменению мощности потерь судят о причинах, вызывающих сопротивление (механическое, гидравлическое, тепловой режим и пр.).
4. Изменение фазовой диаграммы работы цилиндров отражает причины, влияющие на работу отдельных цилиндров / пар цилиндров.
5. Прогноз строится на экстраполяции уравнения аппроксимированной функции диагностического параметра (включая среднее/суммарное значение) по историческим данным, на точку его критического значения.
6. Средний параметр по объектам оценки характеризует техническое состояние парка техники.
7. Сумма параметра «эффективная мощность» по всем объектам оценки характеризует мощность парка или способность выполнить план.

В представленной выше концепции диагностики и предиктивной аналитики применяется новая технология удаленной диагностики двигателей резидента Фонда «Сколково» **Remote Engine Diagnostics Systems**, реализующая посредством программно-аппаратного комплекса расчет диагностических параметров непосредственно в эксплуатационных условиях подобно расчету, производимому по методу стендовых испытаний. Возможно предоставить наглядную визуализацию данных для пользователя в виде, например, графического отчета, как показано на рисунке 2.

При этом программно-аппаратный комплекс в режиме реального времени обрабатывает поток данных и производит расчет параметров дизеля по скоростной характеристике. Алгоритм расчета включает в себя основные блоки искусственного интеллекта по выделению из потока данных информативных зон для построения скоростной характеристики и анализа ее путем расчета параметров переходного процесса с выводом протокола испытаний, представленного на рисунке 3.

По итогам обследования техники, проведенных расчетов, данных из протоколов и сводных таблиц происходит построение трендов диагностических параметров. Аналитика полученных

**Графический отчет:**

- Сигналы и монитор активности
- Рекомендуемые действия
- Индикаторы с цветовым изображением, система «Светофор»
- Информация о системе



Рис. 2. Графический отчет программно-аппаратного комплекса

процессов раскрывает новые возможности интерпретации полученных трендов в приведенных далее примерах и соответствующих рисунках 4–9.

**ПРИМЕР 1.** Контроль по параметру  $KPD_{мех}$  продемонстрирован на рисунке 4 для объекта № 01. Характеристика тренда снижения  $KPD_{мех}$  достигает критического значения 65 % в точке 10.09.2023. Прогнозным периодом до обслуживания может служить 2,5 мес., за который еще возможна эксплуатация. Динамика снижения  $KPD_{мех}$  10 % за 1 мес.

**ПРИМЕР 2.** В оценке мощности потерь  $Nc$  очевидным фактом является зависимость от параметра  $KPD_{мех}$ , как показано на рисунке 5. Характеристика тренда верхнего графика эффективной мощности  $Ne$  неизменна. Вместе с тем параметр мощности потерь  $Nc$  имеет явную тенденцию роста. Одновременно для этого же случая на рисунке 4 эффективность по параметру  $KPD_{мех}$  существенно снижается, а значение  $Nc$  достигнет критического в 1 000 кВт в тот же период, 10.09.2023. Усредненный рост  $Nc$  за последние измерения составляет те же 10 %. Это значит — параметр  $KPD_{мех}$  и общее состояние двигателя снижается за счет увеличения потерь  $Nc$  вследствие повышенного износа (интенсификации износа).

**ПРИМЕР 3.** Обоснование вывода из эксплуатации. По параметру  $Nc$  установлен факт резкого его повышения на примере объекта № 03, что привело к резкому падению  $KPD_{мех}$  при контроле на дату 10.04.2023. Интерпретация этого случая раскрыта на рисунке 6. Случай демонстрирует пересечение тренда  $KPD_{мех}$  линии критического значения в 65 %, при этом динамика падения  $KPD_{мех}$  22 % за 1 мес. Существенное снижение  $KPD_{мех}$  — это признак резкого ухудшения состояния, повышения износа, повышения риска отказа, в данном случае ресурс отсутствует на дату 10.04.2023, дальнейшая эксплуатация вызывает интенсификацию износа

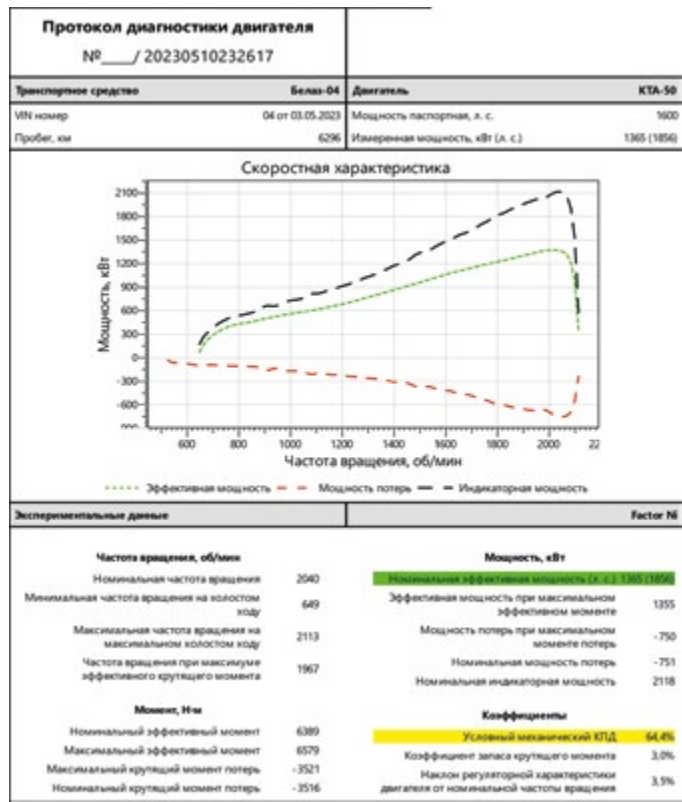


Рис. 3. Протокол испытания дизеля КТА-50

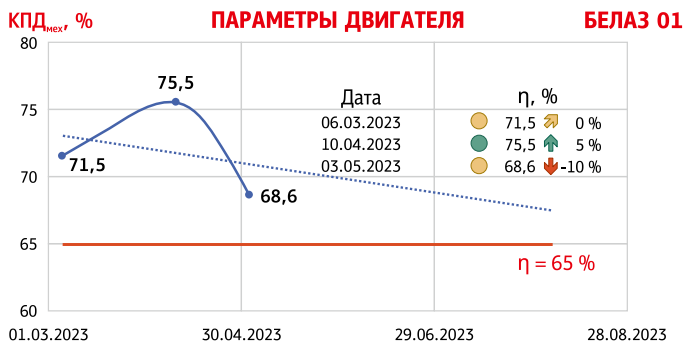


Рис. 4. Тренд изменения  $KPD_{мех}$  для БЕЛАЗ 01

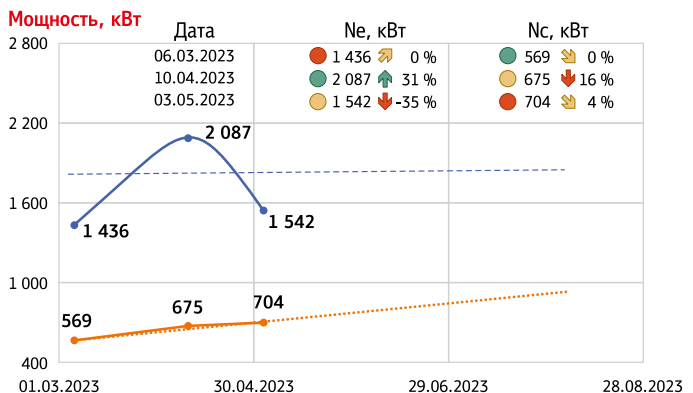


Рис. 5. Диаграмма трендов  $Ne$  и  $Nc$  для БЕЛАЗ 01

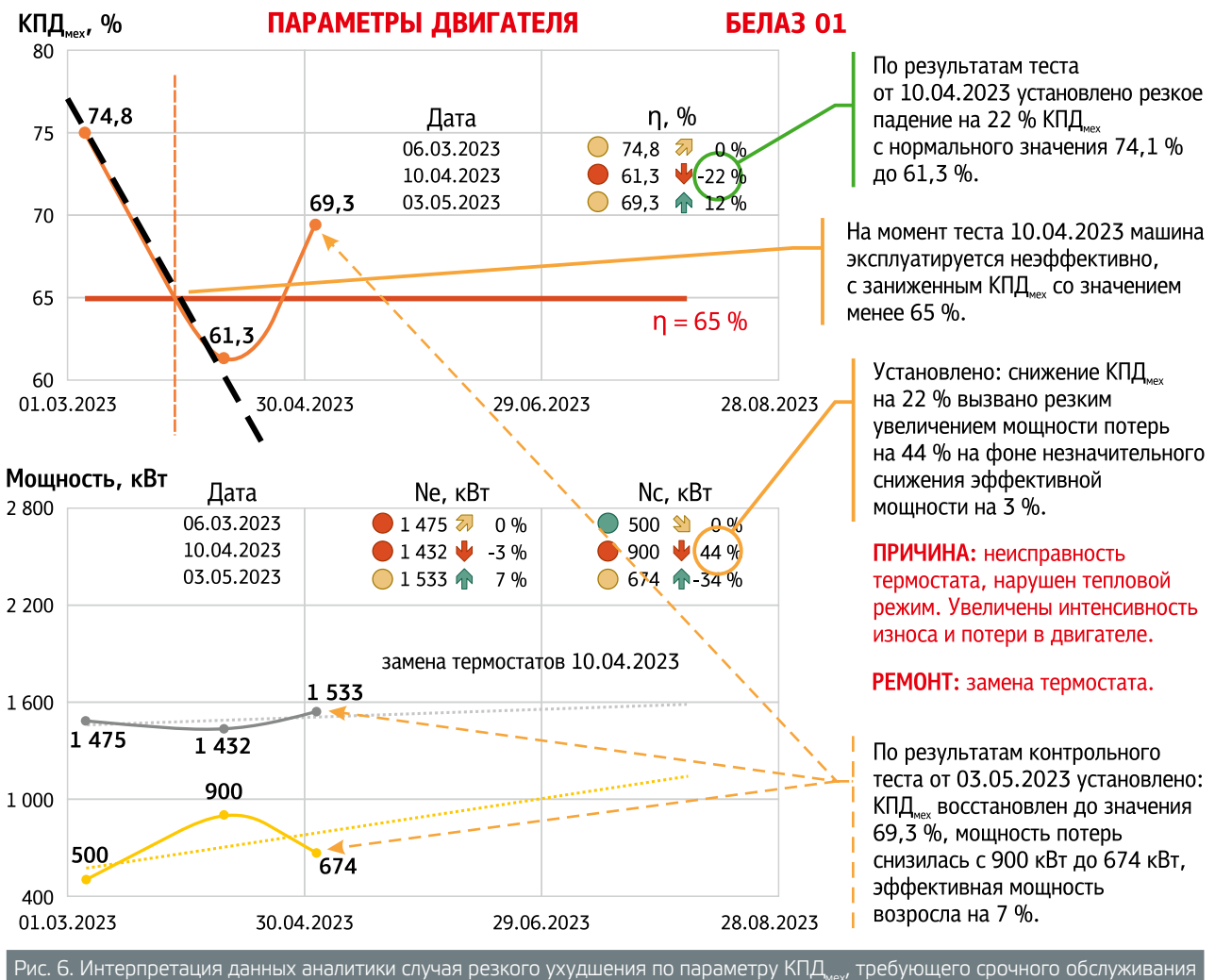


Рис. 6. Интерпретация данных аналитики случая резкого ухудшения по параметру КПД<sub>мех</sub>, требующего срочного обслуживания

ЦПГ, ГРМ, повышенный расход, закоксовывание, повышение абразива кокса в масле, снижение ресурса и может привести к аварии, к капитальному ремонту. Было установлено, что нарушен тепловой режим, что согласуется с проблемами в эксплуатации.

**ПРИМЕР 4.** Важнейшей нерешенной проблемой при эксплуатации горной техники является отсутствие контроля нарушения работы цилиндров, что приводит к неравномерным тепловым и динамическим нагрузкам в корпусе и в движущихся деталях и, как следствие, к разрушению: трещинам в головках, разрыву, задирам, заклиниванию деталей и пр.

Такое нарушение возможно определить путем контроля параметра неравномерности работы цилиндров —  $\delta$ . Этот параметр рассчитывается по функции выделения индикаторной мощности в фазе работы цилиндров / пар цилиндров, как показано на рисунке 7.

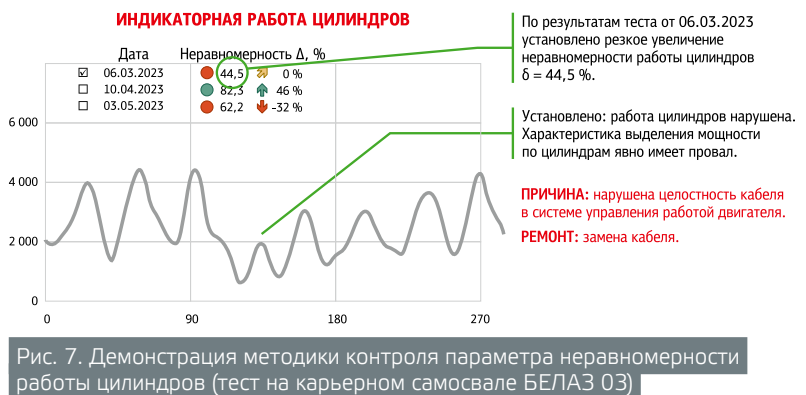


Рис. 7. Демонстрация методики контроля параметра неравномерности работы цилиндров (тест на карьерном самосвале БЕЛАЗ 03)

После устранения неисправности функция индикаторной работы цилиндров изменилась, как показано на рисунке 8.

В этом примере обращает внимание то, что по новой методике REDSystems выявлена скрытая неисправность, которая в общем случае проявляется как небольшое повышение вибрации и ощущается субъективно, тогда как при контроле обнаруживается явный провал работы цилиндра и резкое увеличение значения параметра неравномерности работы цилиндров.



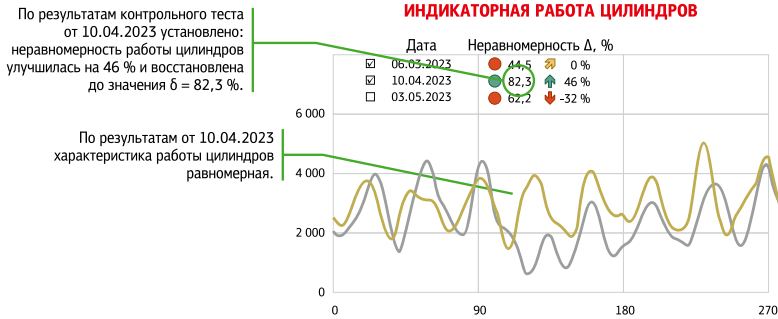


Рис. 8. Демонстрация восстановленной работы цилиндров

**ПРИМЕР 5.** Анализ характеристики парка техники. Парк техники охарактеризовать возможно по его функциональному свойству — выполнить заданный объем работы в срок, что является конкретным и измеряемым параметром, таким как производительность. Учетная политика на предприятии позволяет оценивать данную характеристику в режиме «постфактум», например, анализ сводов за месяц.

Метод оценки всех машин как совокупное среднее может быть использован как уникальный инновационный инструмент, который характеризует парк в целом, а именно: по эффективной мощности, мощности потерь и КПД<sub>мех</sub>, как показано на рисунке 9. То есть перечисленные параметры универсальны для описания объекта, к которому они относятся: ГОК, парк, карьер, транспортные процессы и пр.

Описанные выше методы и алгоритмы оценки состояния единицы техники применимы к описанию и оценке парка техники, причем средняя характеристика наиболее устойчива и менее подвержена погрешности, она отражает эффективность менеджмента производственными процессами.

Уникальную характеристику парка, т. е. его динамику по параметру КПД<sub>мех</sub> и суммарной мощности, возможно использовать как рычаг управления для поддержания эффективности производства.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Применение уникальных методов диагностики, базирующихся на контроле функциональных параметров энергетической установки, а также расширенных методов предиктивной аналитики в управлении парком техники на среднем карьере (20 самосвалов) позволяет достичь эффектов:

- увеличение чистого времени работы до 3 000 часов;
- увеличение добычи горной массы до 200 тыс. м<sup>3</sup>;
- увеличение коэффициента технической готовности на 4,2 %;
- увеличение коэффициента используемого оборудования на 3,1 %;
- увеличение производительности на 3 %;
- общее время теста единицы техники портативным устройством 15 мин;
- вид энергетической установки — поршневой двигатель (30 кВт — 5,7 МВт).

Таким образом, решается проблема возникающих при неконтролируемом износе непредвиденных отказов техники путем мониторинга неявно проявляющихся неисправностей и благодаря проверенным алгоритмам искусственного интеллекта для оценки ресурса техники по параметрам переходных характеристик. Возможно получать выгоду за счет увеличения производительности и сокращения затрат на ремонты. Технология может применяться как способ предиктивной аналитики для управления способностью парка обеспечить выполнение годового плана производства.

Вопросы можно задать здесь: [SPoplavskiy@sk.ru](mailto:SPoplavskiy@sk.ru)

**ПАРАМЕТРЫ ПАРКА ТЕХНИКИ**

	Мощность эффективная	Мощность потерь	КПД <sub>мех</sub>	Неравномерность
БЕЛАЗ 01	1 688 кВт	649 кВт	71,9 %	75,4 %
БЕЛАЗ 03	1 480 кВт	691 кВт	68,5 %	63,0 %
БЕЛАЗ 04	1 473 кВт	728 кВт	66,7 %	66,2 %
БЕЛАЗ 05	1 802 кВт	686 кВт	72,3 %	72,0 %
БЕЛАЗ 06	1 453 кВт	634 кВт	69,3 %	75,4 %
ПАРК СРЕДНЕЕ	1 579 кВт	678 кВт	69,7 %	70,4 %
ПАРК ВСЕГО	7 897 кВт	3 388 кВт		

среднее за выделенные периоды

- ☑ 06.03.2023
- ☑ 10.04.2023
- ☑ 03.05.2023

Рис. 9. Тепловая карта парка техники