

УДК 621.9.08

А. П. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук

Московский государственный технологический университет "Станкин"

А. В. КАЛЯШИНА, канд. техн. наук

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева

E-mail: anna\_vik@mail.ru

## Методы оценки эффективности промышленного оборудования

В статье проведен сравнительный анализ методов оценки эффективности промышленного оборудования — методика, предложенная Г. А. Шаумяном и концепция ОЕЕ — Overall equipment effectiveness. Исследуются понятия производительности, готовности оборудования и качества изделий. Показатели, предложенные Г. А. Шаумяном определены в терминах ОЕЕ, проведена оценка влияния на результат эффективности цикловых и внецикловых потерь.

The article presents a comparative analysis of methods for assessing the effectiveness of industrial equipment — a technique proposed by G. A. Shaumyan and OEE concept — Overall equipment effectiveness. The concepts of productivity, equipment availability and product quality are investigated. The indicators proposed by G. A. Shaumyan is defined in terms of OEE and the impact on the result of cyclical and non-cyclic losses is evaluated.

**Ключевые слова:** оборудование, эффективность использования ресурсов, технология, производственная система

**Key words:** equipment, resource efficiency, technology, production system

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня не вызывает сомнений важность информации об эффективной работе существующего на предприятии оборудования. Понятие это двояко. С одной стороны, чтобы повысить эффективность оборудования, нужно ее измерять. С другой — само измерение эффективности оборудования подталкивает к действиям, направленным на повышение данного показателя [1].

В данном научном исследовании представлены различные подходы, отражающие реальный уровень оценки эффективности использования оборудования.

Впервые понятия и способы оценки эффективности оборудования представлены в работе Шаумяна Г. А. в начале 70-х годов 20-го века [2].

В работе [1] дано комплексное определение производительности труда и оборудования. Выделены понятия цикловой, технологической и фактической производительности. А также разработаны инженерные методы оценки эффективности и прогрессивности оборудования.

Многим позже (в середине 90-х годов 20 века) сформулирована концепция Overall equipment effectiveness (ОЕЕ) — общая эффективность оборудования [3]. Базовые понятия этой

концепции во многом схожи с методиками Шаумяна Г. А. Авторы ОЕЕ вводят понятие "общая эффективность оборудования" в качестве базового (интегрального) показателя, включающего три составляющих:

- производительность
- готовность оборудования
- качество

Авторы методики ОЕЕ считают, что полученный интегральный показатель максимально полно отражает состояние оборудования и дает представление не только о темпе выпуска продукции, но и о потерях, вызванных неполадками в работе оборудования или низким уровнем качества продукции [4].

В рамках данного исследования проведен сравнительный анализ показателей эффективности работы оборудования, входящих в методику ОЕЕ и показателей эффективности, предложенных Шаумяном Г. А. в 70-х годах 20-го века.

### 1. Определение потерь времени — готовность оборудования

Для выполнения любой производственной операции требуются определенные затраты времени:

$$T = t_p + t_x$$

$T$  — время, в течение которого производится определенная порция продукции

$t_p$  — время рабочего хода

$t_x$  — время холостых ходов

Холостые ходы Шаумян Г. А. трактует как "цикловые потери", одновременно вводя еще

одно понятие "внецикловые потери", к которым относятся:

— потери, вызванные техническими причинами, связанными с конструкцией и режимом работы станка, например потери, связанные с инструментом, регулировкой механизмов и устройств, потери связанные с браком и т.д.

— потери, вызванные внешними организационно-техническими причинами, например, отсутствие заготовок, брак предыдущих операций и т.д.

В методике ОЕЕ используется понятие *готовность оборудования* — сравнение времени, в течение которого изготавливается продукт, и номинального времени выпуска изделия. При этом время, в течение которого производится определенная операция, считается рабочим циклом. В работах по оценке ОЕЕ понятие "запланированные остановки" — аналог термина "цикловые потери", то есть — холостые ходы по определению А. Г. Шаумяна. А к "внецикловым" потерям относятся все остальные простои: поломки, неисправности, переналадка оборудования, замена режущего инструмента, потери при запуске оборудования, потери не предусмотренные производственным графиком. В табл. 1 приведено сравнение временных показателей технологической операции:

В идеале каждый станок должен постоянно находиться в работоспособном состоянии. Эффективно используемое оборудование всегда работает на оптимальной скорости и в процессе эксплуатации не создает ситуаций, при которых возможно появление дефек-

Таблица 1

Составляющие времени технологической операции	Методика Шаумяна Г. А.	Методика ОЕЕ
Рабочий ход	$t_p$ — время непосредственной обработки	Рабочий цикл
Цикловые потери	Холостые ходы	Запланированные остановки
Внецикловые потери	Потери, вызванные техническими причинами; потери, вызванные организационными причинами	Незапланированные простои

Таблица 2

Показатель	Методика Шаумяна Г. А.	Методика ОЕЕ
Общее время цикла	$T = t_p + t_x + \sum t_{n_i}$ $T$ — время выпуска партии продукции; $t_p$ — время на рабочие ходы (машинное время); $t_x$ — время на холостые ходы (цикловые потери); $\sum t_{n_i}$ — время на внецикловые потери всех видов	Общее время цикла = Чистое время цикла (A) + запланированные остановки = Машинное время (B) + простои + запланированные остановки
Машинное время	$t_p$ — чистое машинное время выпуска продукции $t_p = T - (t_x + \sum t_{n_i})$	$B =$ чистое время цикла (A) — простои = Общее время цикла — запланированные остановки — простои
Чистое время цикла	$T - \sum t_{n_i} = t_p + t_x$	$A =$ общее время цикла — незапланированные остановки = Машинное время (B) + простои
Показатель готовности оборудования (в %) машинное время чистое время цикла	$\frac{t_p}{T - t_x} = \frac{T - (t_x + \sum t_{n_i})}{t_p + t_x}$ С учетом всех видов потерь	$\frac{B}{A}$

тов продукции. Тем не менее, на практике, это условие выполняется далеко не всегда [5]. Достижение максимальных скоростей при обработке изделий также составляет значительную проблему. К тому же иногда работа оборудования прямым или косвенным образом способствует появлению дефектов [9].

Сравнительный анализ потерь времени, связанных с готовностью технологического оборудования приведен в табл. 2.

Как видно из табл. 2, в методике ОЕЕ для оценки готовности оборудования используются два эмпирических показателя, значения которых находятся эмпирически:

- A — чистое время цикла,
- B — машинное время.

Практически отсутствуют уточняющие формулировки и классификация таких понятий как "непредвиденные остановки" и "простои".

В методике Шаумяна Г. А. [2] все показатели работы оборудования — расчетные данные, основанные на математических зависимостях, кроме того, проведена четкая классификация цикловых и внецикловых потерь с оценкой влияния каждого вида потерь на конечный результат работы оборудования

### Анализ производительности

При любом подходе к проблеме повышения эффективности работы оборудования выделяется базовое понятие — производительность. Не вызывает сомнений, что производительно затраченным считается только то время, которое расходуется на основные процессы обработки [6].

Все остальное время — это потери: вспомогательные (холостые) ходы рабочего цикла и внецикловые простои. В разных методиках расчета эффективности потери классифицируются по-разному.

Идеальной будет считаться машина, у которой при высоком потенциале производительности и качестве продукции отсутствуют потери времени на холостые ходы и простои [11].

Основа для определения производительности оборудования — количественная оценка по затратам времени на рабочие и холостые операции.

В методике Шаумяна Г. А. [2] понятие "производительность" включает 2 составляющих:

- цикловая
- технологическая

Цикловая производительность станка

$$Q_{ц} = \frac{1}{T}$$

$T$  — время в течение которого производится определенная порция продукции если за время цикла производится  $z$  изделий:

$$Q_{ц} = \frac{z}{T}$$

Если в машине отсутствуют холостые ходы  $t_x = 0$  и технологический процесс непрерывный:  $K = \frac{z}{t_p}$  — технологическая производительность, фактически, этот показатель определяет "запланированную выработку", то есть, сколько изделий произведено за машинное время  $t_p$  без каких либо потерь

Коэффициент производительности:

$$\eta = \frac{1}{Kt_x + 1} = \frac{Q_{ц}}{K} = \frac{t_p}{T}$$

Этот коэффициент характеризует степень непрерывности процесса и использования оборудования во времени.

В работах Шаумяна Г. А. доказано, что максимальной производительности станка можно достичь при  $t_x = \text{const}$

$$Q_{\max} = \lim_{K \rightarrow 0} \frac{K}{Kt_x + 1} = \frac{1}{t_x}$$

В этой формуле заложен смысл двух показателей ОЕЕ — готовность оборудования ( $t_x = \text{const}$ ) и скорости (производительности)  $K \rightarrow \infty$ .

В методике ОЕЕ понятие производительности рассматривается как один из элементов эффективности, наряду с готовностью работы оборудования и качеством. Производительность характеризует скорость работы оборудования [7], [9]. Запланированная выработка определяет количество изделий, которое можно произвести на данном станке за машинное время без каких — либо потерь скорости.

Но, так как оборудование работает не идеально, существуют процессы, которые негативно влияют на скорость работы оборудования. К таким процессам в методике ОЕЕ относятся "потери скорости обработки" — кратковременные остановки автоматических линий, снижение скорости обработки из-за низкой квалификации оператора и т.д. Таким образом, реальное количество выпущенных изделий несколько ниже запланированного, этот фактор учитывается показателем производительности работы оборудования.

В табл. 3 приведен сравнительный анализ показателей, влияющих на скорость (производительность) работы оборудования.

Как видно из табл. 3, для расчета производительности по методике ОЕЕ используются показатели выработки — текущей и запланированной.

Коэффициент производительности Шаумяна Г. А. характеризует степень непрерывности процесса и использования единицы оборудования во времени [2].

### 3. Потери на брак

Часть фактически произведенных изделий может быть ненадлежащего качества. В методике ОЕЕ качество производственного процесса на участке определяется соотношением показателей  $E$  (общее время производства деталей) и  $F$  (время производства бракованных деталей). Причины дефектов возможны, например, при запуске оборудования или при несоблюдении оператором оптимальных условий выполнения операции, при этом доля качественной продукции снижается. К этой категории относятся как бракованные изделия, так и изделия, нуждающиеся в повторной обработке [8].

Причиной бракованных изделий по методике Шаумяна Г. А. являются внецикловые потери 5-го вида [2]. Это обусловлено, например, неверной наладкой станка, нарушением настроек станка, брака исходного материала и

Таблица 3

Показатель	Методика Шаумяна Г. А.	Методика ОЕЕ
Запланированная выработка	Технологическая производительность — количество изделий произведено за машинное время $t_p$ при отсутствии потерь скорости и качества $K = \frac{Z}{t_p}$ [шт.]	Количество изделий, которое может быть произведено за машинное время работы оборудования $C$ [шт.]
Текущая выработка	Фактическая производительность, с учетом всех потерь, влияющих на скорость работы оборудования $Q_n = \frac{Q_{ц}}{1 + Q_{ц} \frac{\sum t_{n_i}}{Z}}$ Здесь $Q_{ц} = \frac{Z}{T}$ — цикловая производительность; $\sum t_{n_i}$ — время потерь; $Z$ — количество изделий в партии. После подстановки получим: $Q_n = \frac{Z/T}{1 + \frac{\sum t_{n_i}}{T}} = \dots = \frac{Z}{T + \sum t_{n_i}}$	$D$ = запланированная выработка ( $C$ ) — количество не изготовленных изделий из-за потерь скорости обработки [шт.]
Показатель производительности оборудования (в %)	$\frac{Q_n}{K} = \frac{K Q_{ц}}{1 + Q_{ц} \frac{\sum t_{n_i}}{Z}}$ Коэффициент производительности, предложенный Шаумяном $\eta = \frac{1}{K t_x + 1} = \frac{Q_{ц}}{K} = \frac{t_p}{T}$	$\frac{\text{текущая выработка (D)}}{\text{запланированная выработка}}$

Таблица 4

Методика Шаумяна Г. А.		Методика ОЕЕ	
Общее время производства изделий	$t_p = T - (t_x + \sum t_{n_i})$ С учетом цикловых и внецикловых потерь. Параметр $\sum t_{n_i}$ — включает потери на брак	Текущая выработка	$E$ [шт.]
Фактическая производительность. Производство качественных изделий	$Q_n = \frac{z}{T + \sum t_{n_i}} = \frac{Z - N_B}{t_p}$	Качественные изделия	$F$ [шт.]
Показатель эффективности	$\frac{\frac{z}{T + \sum t_{n_i}}}{\frac{Z - N_B}{t_p}} = \frac{z t_p}{(T + \sum t_{n_i})(Z - N_B)}$	Показатель потерь на брак %	$\frac{F}{E}$

ОБЩЕЕ ВРЕМЯ ЦИКЛА		
(A) чистое время цикла		Непредвиденные остановки
(B) машинное время	Простои	
(C) запланированная выработка		
(D) текущая выработка	Потери скорости оборудования	
(E) текущая выработка		
(F) качественные изделия	Дефекты	

$$OEE = V/A \times D/C \times F/E \times 100 \%$$

Рис. 1. Составляющие показателей методики OEE

ОБЩЕЕ ВРЕМЯ ЦИКЛА = рабочие ходы + холостые ходы + внецикловые потери		
чистое время цикла = общее время цикла – внецикловые потери всех видов		Внецикловые потери
машинное время = чистое время цикла – потери на холостые ходы		Потери на холостые ходы
Технологическая производительность [шт.]		
Фактическая производительность [шт.]		Потери скорости обработки
Фактическая производительность [шт.]		
качественные изделия [шт.]		Потери на брак

Рис. 2. Составляющие определения эффективности по методике Г. А. Шаумяна

т.д. Этот вид потерь обычно связан с организационно-техническими причинами. В методике Шаумяна Г. А. предлагается использовать 2 коэффициента:

$\eta_{\text{тех}}$  — коэффициент технического использования, который учитывает только собственные потери и характеризует прежде всего долговечность и надежность механизмов и инструмента, стабильность технологического процесса.

$\eta_3$  — коэффициент загрузки, который учитывает не только собственные, но и органи-

зационно-технические потери, к которым относятся, в том числе, потери на брак. Этот коэффициент показывает, какую долю общего запланированного времени станок работает, ремонтируется, наладывается и т.д., а какую простаивает по внешним причинам.

В табл. 4 приведен сравнительный анализ показателей, связанных с производством бракованных изделий.

На рис. 1 и 2 приведены составляющие показателей расчета эффективного использования оборудования по методике OEE (рис. 1) и

по методике Г. А. Шаумяна (рис. 2). Как видно из этих рисунков внецикловые потери в методике Шаумяна Г. А. сводятся к понятиям "непредвиденные остановки", "потери скорости

оборудования" и "потери на дефекты" в методике ОЕЕ

$$OEE = B/A \times D/c \times F/E \times 100 \%$$

Таблица 5

Методика Шаумяна Г. А.	Методика ОЕЕ	Сопоставление показателей
Готовность оборудования (цикловые и внецикловые потери)		
$T = t_p + t_x = \sum_{i=1}^n t_{n_i}$	$t_p = B; t_p + t_x = A;$ $T = B + (A - B) + \sum t_{n_i} = A + \sum t_{n_i}$	$T_{ш} = t_p + t_x + \sum t_{n_i};$ $T_{OEE} = A + \sum t_{n_i}$
Эффективность использования оборудования	$\frac{B}{A} = \frac{t_p}{t_p + t_x} = \frac{B}{B + \sum t_{n_i}}$	
Производительность (потери скорости обработки)		
Технологическая производительность $K = \frac{Z}{t_p}$	Запланированная выработка за машинное время $\frac{C}{B} \left( \frac{\text{запланированная выработка}}{\text{машинное время}} \right)$	$\frac{Z}{t_p} = \frac{C}{B}$
Фактическая производительность за машинное время $Q_{ц} = \frac{Q_{ц}}{1 + Q_{ц} \frac{\sum t_{n_i}}{Z}}$	Текущая выработка за машинное время $\frac{D}{B}$	$\frac{D}{B} = Q_{п} = \frac{C}{A + 2\sum t_{n_i}}$
Коэффициент производительности	$\frac{D}{C} = \frac{Q_{п}}{K} = \frac{B}{A + 2\sum t_{n_i}}$	
Качество обработки (потери на брак)		
Шаумян	ОЕЕ	общее
Фактическая производительность за машинное время $Q_{п} = \frac{Q_{ц}}{1 + Q_{ц} \frac{\sum t_{n_i}}{Z}}$	Текущая выработка за машинное время: $\frac{E}{B} = \frac{D}{B}$	$\frac{E}{B} = Q_{п} = \frac{C}{A + 2\sum t_{n_i}}$
Качественные изделия за машинное время: $\frac{Z - N_{Б}}{t_p}$	$\frac{F}{B}$	$\frac{F}{B} = \frac{Z - N_{Б}}{B}$
Показатель обеспечения качества	$\frac{F}{E} = \frac{\frac{Z}{T + \sum t_{n_i}}}{\frac{Z - N_{Б}}{t_p}} = \frac{z t_p}{(T + \sum t_{n_i})(z - N_{Б})} = \frac{CB}{(A - 2\sum t_{n_i})(C - N_{Б})}$	

Для сравнительной оценки двух методик, введем обозначения:

Методика Шаумяна Г. А.	
Z	— общее количество изделий за машинное время [шт.]
N <sub>Б</sub>	— количество бракованных изделий [шт.]
T	— общее время цикла [ед. времени]
t <sub>р</sub>	— машинное время [ед. времени]
t <sub>х</sub>	— время холостых ходов [ед. времени]
$\sum_{i=1}^n t_{n_i}$	— суммарное время всех внецикловых потерь [ед. времени].
Методика ОЕЕ	
A	— чистое время цикла [ед. вр.]
B	— машинное время [ед. вр.]
C	— запланированная выработка [шт.]
D	— текущая выработка [шт.]
F	— качественные изделия [шт.]

Для анализа двух методик приведем показатели эффективности по методике Г. А. Шаумяна в терминах ОЕЕ (табл. 5).

Оценка составляющих эффективности

Для оценки эффективности, найдем разницу показателей и оценим ее количественно.

1. Время (готовность оборудования)

$$\frac{B}{A} - \frac{B}{B + \sum t_{n_i}} = \frac{B(B + \sum t_{n_i}) - AB}{A(B + \sum t_{n_i})} = \dots$$

$$\dots = \frac{B}{A} \frac{(B + \sum t_{n_i} - A)}{(B + \sum t_{n_i})}$$

Здесь

$(B + \sum t_{n_i} - A)$  – время холостых ходов (цикловые потери)

$(B + \sum t_{n_i})$  – машинное время + внецикловые потери.

2. Производительность (скорость работы оборудования)

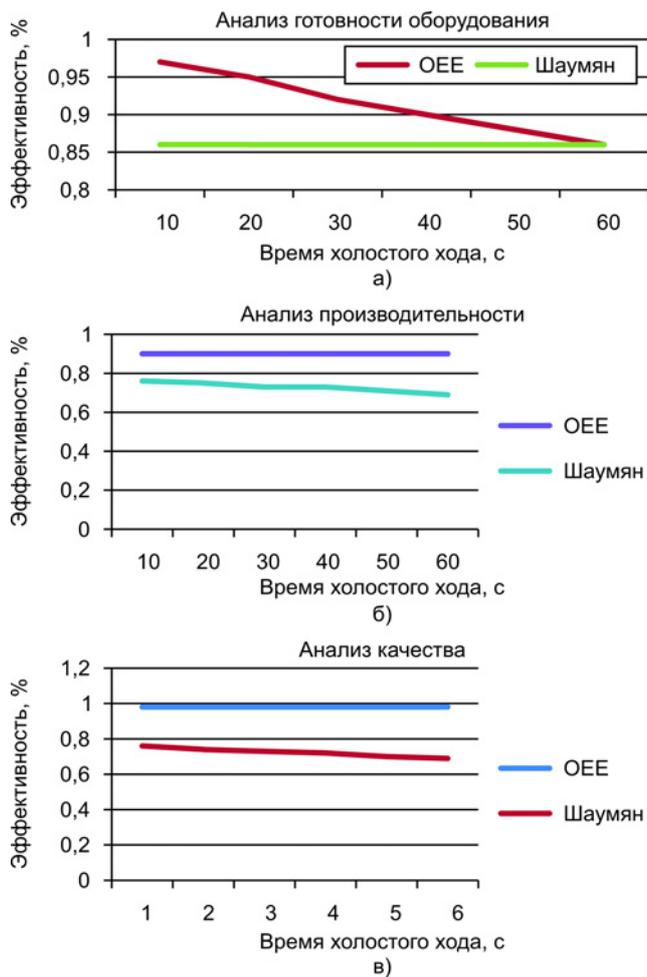
$$\frac{D}{C} - \frac{B}{A + 2\sum t_{n_i}} = \frac{D(A + 2\sum t_{n_i}) - BC}{C(A + 2\sum t_{n_i})}$$

Таблица 6

A [мин]	B = t <sub>р</sub> [мин]	C = z [шт.]	D [шт.]	E [шт.]	F [шт.]	N <sub>Б</sub> [шт.]	T [мин]
420	390	400	360	360	355	5	480

Таблица 7

t <sub>х</sub>	Оценка готовности оборудования		Оценка производительности				Оценка качества	
	$\frac{B}{A} \frac{(B + \sum t_{n_i} - A)}{(B + \sum t_{n_i})}$		$\frac{D(A + 2\sum t_{n_i}) - BC}{C(A + 2\sum t_{n_i})}$				$\frac{F(A + 2\sum t_{n_i})(C - (E - F)) - ECB}{E(A + 2\sum t_{n_i})(C - (E - F))}$	
	B/A	$\frac{T - (t_x + \sum t_n)}{t_p + \sum t_n}$	D/C	Q <sub>п</sub>	K	Q <sub>п</sub> /K	F/E	$\frac{Z - N_{Б}}{t_p} \bigg/ \frac{T + \sum t_n}{t_p}$
10	0,97	0,86	0,9	0,76	1,025	0,74	0,98	0,76
20	0,95	0,86	0,9	0,75	1,025	0,73	0,98	0,74
30	0,92	0,86	0,9	0,73	1,025	0,71	0,98	0,73
40	0,90	0,86	0,9	0,73	1,025	0,71	0,98	0,72
50	0,88	0,86	0,9	0,71	1,025	0,69	0,98	0,70
60	0,86	0,86	0,9	0,69	1,025	0,68	0,98	0,69



**Рис. 3.** Приведена динамика изменения показателей: а) анализ готовности оборудования при изменении цикловых потерь, б) анализ производительности при изменении цикловых потерь, в) анализ качества при изменении цикловых потерь

3. Качество

$$\frac{F}{E} - \frac{C * B}{(A + 2\sum t_{n_i})(C - N_B)} = \dots \left\{ \begin{matrix} z = C \\ N_B = E - F \end{matrix} \right\} = \frac{F(A + 2\sum t_{n_i})(C - (E - F)) - ECB}{E(A + 2\sum t_{n_i})(C - (E - F))}$$

Здесь  $(E - F)$  — количество бракованных изделий.

Исходные данные для расчета показателей эффективности (табл. 6).

В табл. 7 отражено влияние цикловых потерь на составляющие эффективности.

Влияние внецикловых потерь  $\sum t_n$  на составляющие эффективности отражено в табл. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

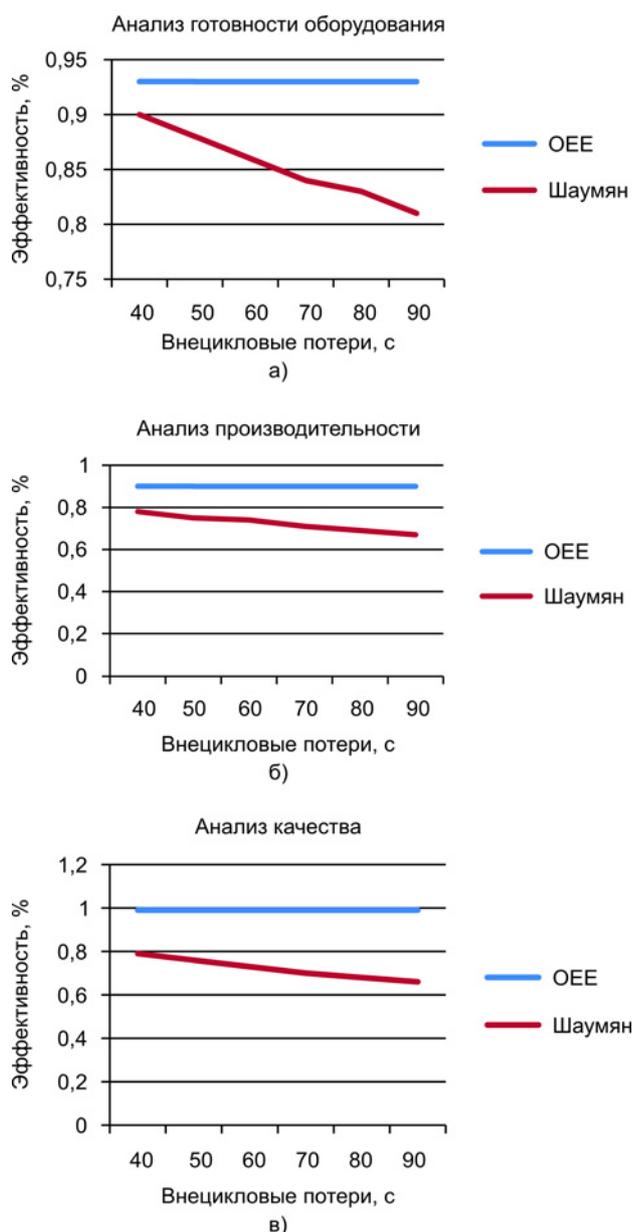
Проведенный анализ двух подходов к оценке эффективности работы оборудования позволяет сделать следующие выводы:

- показатель эффективности работы оборудования должен быть многофакторным, учитывающим различные причины, влияющие на результат

- методика, предложенная Шаумяном в середине 20-го века, предлагает оценивать временные показатели работы оборудования по всем временным составляющим: рабочий ход, цикловые потери и внецикловые потери, свя-

Таблица 8

$\sum t_n$	Оценка готовности оборудования		Оценка производительности				Оценка качества	
	$\frac{B}{A} \frac{(B + \sum t_{n_i} - A)}{(B + \sum t_{n_i})}$	$\frac{T - (t_x + \sum t_n)}{t_p + \sum t_n}$	$\frac{D}{C}$	$Q_n$	$K$	$Q_n/K$	$\frac{F}{E}$	$\frac{z - N_B}{t_p} \frac{T + \sum t_n}{t_p}$
40	0,93	0,9	0,9	0,8	1,025	0,78	0,99	0,79
50	0,93	0,88	0,9	0,76	1,025	0,75	0,99	0,76
60	0,93	0,86	0,9	0,72	1,025	0,74	0,99	0,73
70	0,93	0,84	0,9	0,69	1,025	0,71	0,99	0,70
80	0,93	0,83	0,9	0,67	1,025	0,69	0,99	0,68
90	0,93	0,81	0,9	0,65	1,025	0,67	0,99	0,66



**Рис. 4. Приведена динамика изменения показателей:** а) анализ готовности оборудования при изменении внецикловых потерь, б) анализ производительности при изменении внецикловых потерь, в) анализ качества при изменении внецикловых потерь

занные с техническими и организационными причинами. Таким образом, можно оценить не просто общую эффективность работы оборудования, как соотношение временных показателей, но и оценить влияние различных потерь на конечный результат.

— в методике OEE не полностью учтены составляющие внецикловых потерь, а именно их технологические и организационные причины. В результате (как видно из графиков) составляющие методике OEE оказались больше по абсолютному значению, а значит — общая эффективность работы оборудования завышается, по сравнению с ее реальными показателями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков О. А. Модульный подход к созданию системы комплексной автоматизации проектирования технологических процессов // *Технология машиностроения*. 2019. № 1. С. 54—61.
2. Шаумян Г. А. Комплексная автоматизация производственных процессов / М.: Машиностроение, 1973. 173 с.
3. *Общая эффективность оборудования* / Пер. с англ. / М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2002. 174 с.
4. Kuznetsov A. P. Structure of Cutting Processes and Equipment. Part 1. Energy // *Information Model of the Structure of Machining Processes. Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 5. P. 347—357.
5. Kuznetsov A. P., Blau P., Koriath H.-J., Richter M. Criteria for Energy-efficiency of Technological Processes, Technological Machines and Production Engineering *Procedia CIRP.7th HPC 2016 — CIRP Conference on High Performance Cutting* // Published by Elsevier B. V. 2016. Vol. 46. P. 340—343.
6. Nakajima S. Introduction to TPM / Total Productive Maintenance. Cambridge, MA: Productivity, 1988. P. 46—51.
7. *Standard for Definition and Measurement of Equipment Productivity, Semiconductor Equipment and Material International (SEMI) E79-0200*, 2000.
8. Leachman R. C. Closed-loop measurement of equipment efficiency and equipment capacity // *IEEE Trans. Semiconduct. Manufact.*, 1997. Vol. 10. 112 p.
9. Chand G., Shirvani B. Implementation of TPM in cellular manufacture // *Mater. Processing Technol.*, 2000. Vol. 103. P. 149—154.
10. Kuznetsov A. P., Koriath H. J., Kalyashina A. V.: Comparative Integrated Manufacturing Efficiency in Production Engineering; 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems CMS // *Procedia CIRP*. 2017. 6 p.
11. Kuznetsov A. P., Koriath H. J., Kalyashina A. V., Langer T. Equivalence assessment method for the resource efficiency of equipment, technologies and production systems // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 21. 36 p.