

В.И.Большаков, В.В.Веренев, С.В.Белодеденко, Н.И.Подобедов

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ НАГРУЗОК ЛИНИИ ПРИВОДА КЛЕТЕЙ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА

Предложена методика оценки нагружения линии привода клетки с учётом случайных возмущений и временного фактора, от которого зависят износ и угловые зазоры в оборудовании. Показана возможность получения нагрузочных данных, необходимых для расчётов на прочность и долговечность узлов и деталей оборудования. Приведены параметры и характеристики для построения спектров нагрузок в течение длительной работы стана. Рассмотрен пример статистического моделирования динамических и статических нагрузок с учётом неупорядоченной задачи при прокатке партий полос разного сортаразмера.

модель нагружения, динамическая нагрузка, захват полосы валками, статистическое моделирование, технологическое возмущение.

Состояние вопроса. При создании и эксплуатации прокатных станов ответственным этапом являются расчеты на прочность и долговечность оборудования. Данные о статических и динамических нагрузках и их статистических характеристиках можно получить путём опытно-промышленных измерений или статистического моделирования переходных процессов при захвате полосы валками. В одной из ранних работ по определению частот повторяемости динамических нагрузок в линии привода прокатного стана отмечается трудоёмкость продолжительных измерений [1]. В современных производственных и экономических условиях из-за сворачивания и недостаточного финансирования хоздоговорных исследований становится практически невозможным проведение длительных и достаточно представительных измерений на действующих станах. Кроме того, для измерения момента сил упругости отсутствуют надёжные штатные системы. В связи с этим в работе рассматриваются исходные вопросы, решение которых связано с последующим получением необходимой информации о нагрузке путем статистического моделирования динамических нагрузок на базе идентифицированных и адаптированных математических моделей [2].

Работа и нагружение клеток прокатного стана, зависят от многих факторов: организации работы, технологии прокатки, ремонтных воздействий, состояния оборудования, квалификации обслуживающего персонала и др. Проявление отмеченных составляющих в общем случае не упорядочено. Вместе с тем в процессе эксплуатации прокатных станов следует выявить определенные закономерности изменения нагрузок, технологических и конструктивных возмущений и состояния оборудования. Это позволяет наиболее полно учесть взаимосвязь всех факторов, влияющих на

статические и динамические нагрузки прежде всего в линиях главного привода клетей.

Изложение основных материалов исследования. Рассмотрим типовую осциллограмму момента сил упругости при захвате полосы валками (рис. 1). По сути она представляет собой исходный единичный процесс нагружения. Он является базой для определения абсолютных нагрузок, а в совокупности с их последовательностью в процессе эксплуатации стана также для установления ряда закономерностей и взаимосвязей.

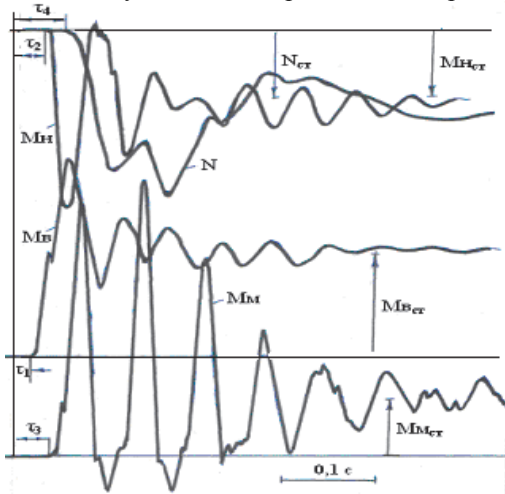


Рис.1. Переходный процесс на моторном валу (Мм), верхнем (Мв) и нижнем (Мн) шпинделе при захвате металла валками; N – мощность, потребляемая двигателем.

1. Переходные процессы на моторном и шпиндельном участках при захвате полосы валками в клетях с редукторным приводом существенно отличаются по амплитуде и скорости затухания колебаний. Отличается также вид переходного процесса. На моторном участке кривая момента после первого-второго пика падает до нуля, иногда с закруткой вала в обратную сторону. Подобное явление, однако, редко и при определённых условиях наблюдается также на нижнем шпинделе, который через шестерённую клеть и коренную муфту связан с тихоходным валом редуктора. Частота колебаний момента на шпинделях и промежуточном валу может различаться до 10 – 15%. Коэффициент динамичности на валу (2,5 – 4,5) всегда больше, чем на шпинделях (1,5 – 2,7).

2. Установлено, что вид переходного процесса на этих участках с увеличением времени работы стана изменяется от типового осциллятора (в начале работы стана после ремонта) к виду на рис. 1 перед ремонтом. Здесь существенно сказывается влияние зазоров. Чем больше работает линия привода, тем больше износ сочленений и угловые зазоры, тем больше амплитуда колебаний момента. Особенность проявления угловых зазоров состоит также в том, что второй пик колебаний момента на моторном участке превышает первый. Это связано с частотными свойствами

линии, зависящими от упруго-массовых (конструктивных) параметров, и с сочетанием величин зазоров на шпиндельном и моторном участках [3]. Чем ближе расположены две низшие собственные частоты линии привода, тем больше биение и амплитуда колебаний. В клетях с рациональными параметрами линии привода подобные явления не наблюдаются.

3. С течением времени работы стана изменяется техническое состояние оборудования и уровень динамических нагрузок. В детерминированной постановке (равномерное увеличение зазора и постоянство технологической нагрузки) изменение коэффициента динамичности, а соответственно и нагрузки максимальным моментом в течение длительной эксплуатации стана носит пилообразный характер: плавное увеличения и резкое уменьшение после ремонтных воздействий [4].

4. В ряде работ принято считать, что для определения максимальной динамической нагрузки $M_{д\max}$ достаточно знать коэффициент динамичности K_d и нагрузку $M_{ст}$ в установившемся режиме прокатки: $M_{д\max} = K_d M_{ст}$. Здесь следует сделать существенные уточнения. Во-первых, как видно из рис. 1, коэффициент динамичности на участках линии привода принимает разные значения. Во-вторых, имеются особенности изменения $M_{д\max}$ и K_d от $M_{ст}$: у них разнонаправленная зависимость - $M_{д\max}$ увеличивается, а K_d уменьшается с увеличением $M_{ст}$. Если не учитывать этот фактор, можно получить существенное завышение значений $M_{д\max}$. Отмеченная особенность функции $K_d(M_{ст})$ обусловлена нелинейностью типа «угловой зазор». Как видим, необходимо знание не только зависимости коэффициента динамичности от углового зазора, но и учитывать зависимость $K_d(M_{ст})$, если пользоваться значением K_d .

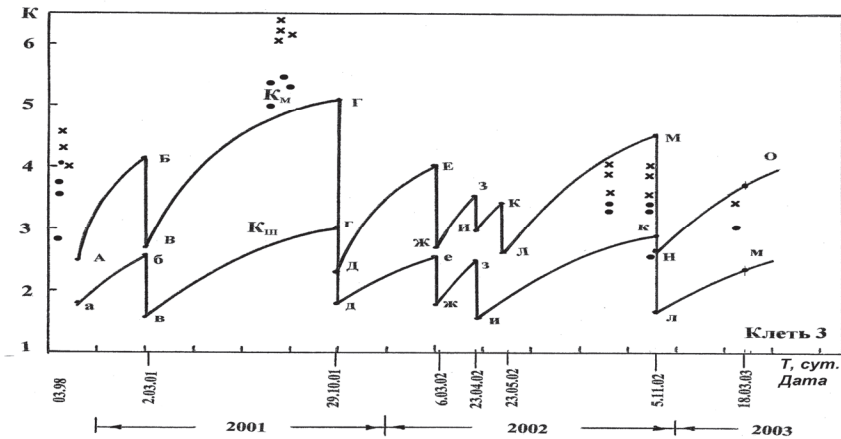


Рис.2. Вид пилообразного увеличения и уменьшения коэффициента динамичности на моторном (Км) и шпиндельном (Кш) участках (и соответственно максимального момента сил упругости) в течение длительно-

го промежутка времени работы клетки №3 стана 1680 при детерминированном подходе к моделированию.

5. При прокатке партии полос одного сорта размера разброс технологических параметров влияет на статические и динамические нагрузки. При наличии зазоров в линии привода их влияние на $M_{д, \max}$ и K_d может быть разнонаправленным или взаимно компенсирующим. Например, влияние увеличения температуры и толщины полосы на 2 – 3 % взаимно компенсируется, а уменьшение температуры и увеличение толщины полосы приводит к увеличению нагрузок $M_{ст}$ и $M_{д, \max}$ [5].

6. При непрерывной прокатке динамическое взаимодействие клетей и их главных линий может быть весьма существенным. Так на стане 1680 при захвате сляба валками клетки № 1 из-за резкого увеличения подпора в линии привода клетки ДУО формируется пиковое значение момента сил упругости, соизмеримое с его величиной при автономном захвате сляба валками этой клетки [6]. В непрерывных группах также отмечается взаимодействие клетей, однако существенно меньшее.

7. В общем случае на широкополосных станах после очередной перевалки в чистовых клетях валков прокатку начинают с широких полос и заканчивают узкими. Современные условия выполнения заказов на готовую продукцию приводят к неупорядоченной последовательности прокатки партий полос (плавок) **разного** сорта размера. Поэтому полнота модели нагружения должна быть обеспечена не только, по крайней мере, учётом прокатки партий полос основного сорта размера, но и их различной последовательностью.

Главные зависимости максимальных динамических нагрузок и коэффициента динамичности от основных факторов в детерминированной постановке исследованы достаточно полно. Рассмотрим результаты статистического моделирования переходного процесса по моменту. На вход системы дифференциальных уравнений в качестве случайных начальных возмущений, распределённых по нормальному закону, задавали два наиболее значимых: разброс температуры полосы в партии одного сорта размера и углового зазора в шпindelном сочленении [7]. Выполнили моделирование прокатки партий полос в течение сравнительно короткого промежутка времени (8 часов). Приняли, что среднеквадратичное значение температуры и зазора за это время не изменились. Для каждой полосы и партии получили картину последовательного нагружения по времени моментами M_d , $M_{ст}$, которое отражает фактическую, полученную путём измерений (рис. 3,б).

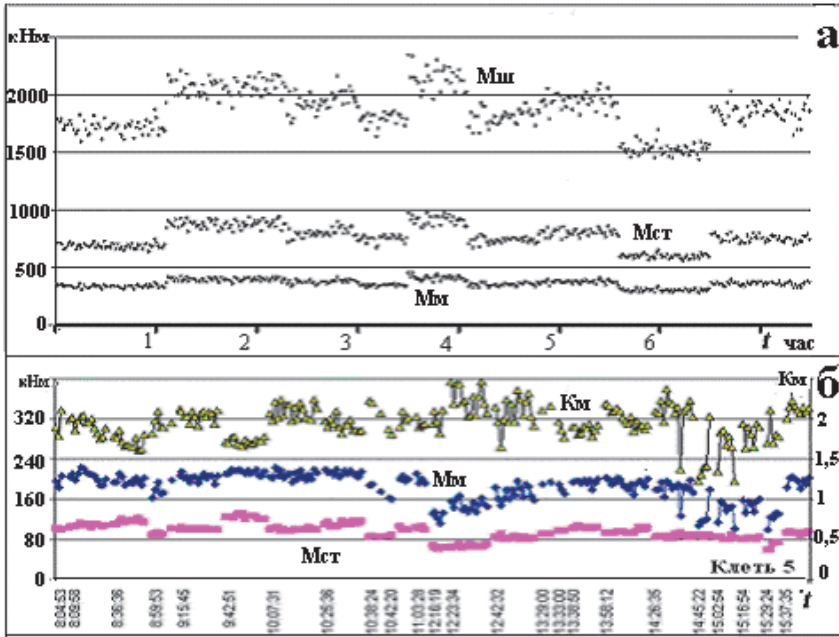


Рис.3. Последовательное нагружение линии привода клетки 5 стана 1680 при прокатке каждой полосы в партиях: а – расчёт, б – измерения. Мм и Мш – максимальный момент сил упругости на моторном и шпиндельном участках, Кд – коэффициент динамичности, Мст – момент на валу двигателя в установившемся режиме прокатки.

Статическая нагрузка существенно изменяется при переходе к прокатке партий полос другого сортира, что естественно. Это влияет также на $M_{д\max}$. Если разброс температуры полос (или других технологических параметров) внутри одной партии влияет прежде всего на Мст, то на разброс $M_{д\max}$ и Кд дополнительно оказывают влияние зазоры.

При моделировании переходного процесса прокатки разных партий полос во время длительной работы прокатной клетки (т.е. с учётом увеличения износа сочленений и угловых зазоров) характер изменения $M_{д\max}$, например, на моторном участке имеет вид (рис. 4а). В представленном поле точек $M_{д\max}$ можно найти усреднённую зависимость $M_d(t)$. На рис. 4б,в,г приведены средние значения максимального момента в партиях полос, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации. Значение последнего изменяется в сравнительно узких пределах. Это даёт основание определять зависимость $v_{M_d}(t)$ и использовать её для расчёта средней максимальной динамической нагрузки $M_{д\max}$ с учётом того, что Мст всегда можно рассчитать по заданным параметрам прокатки.

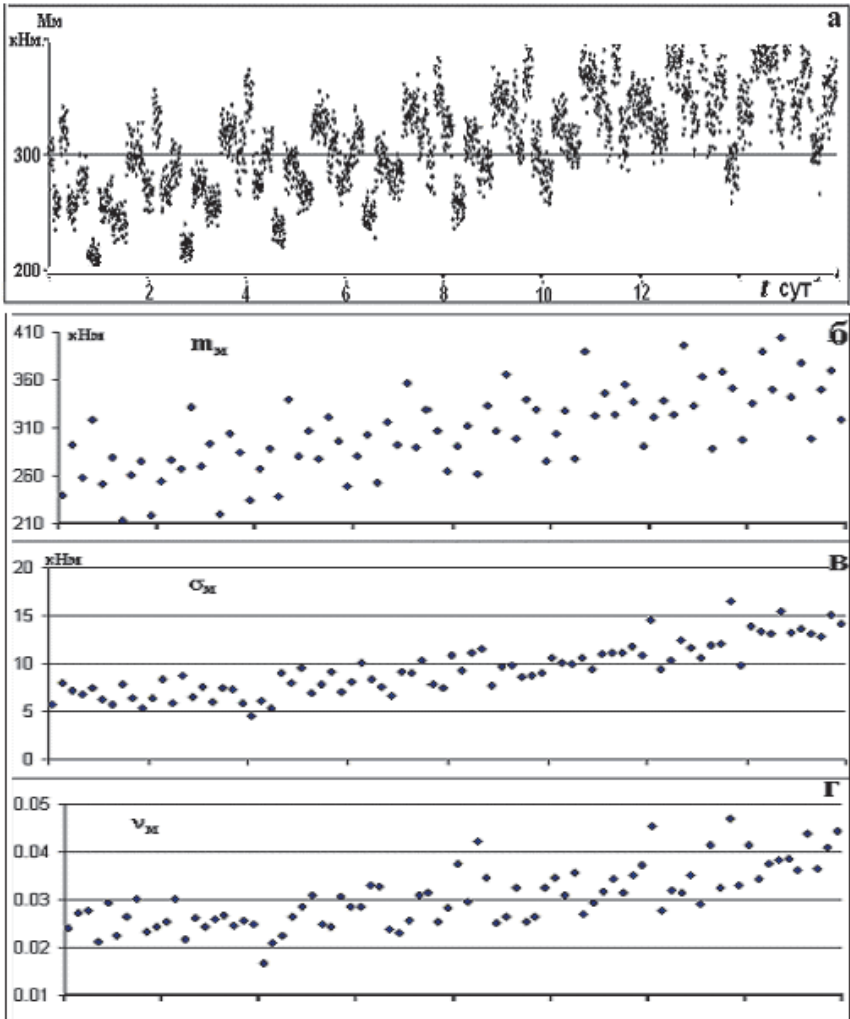


Рис.4. Распределение максимального момента сил упругости M_m на моторном участке в процессе прокатки каждой полосы в партии (а), среднего значения максимального момента по партиям m_m (б), среднего квадратичного отклонения момента σ_m (в) и коэффициента вариации ν_m максимального момента (г).

На рис. 5 дано представление результатов, подобных данным на рис. 4,а в виде корреляционных полей значений $M_{d_{max}}$ и $M_{ст}$ для фиксированных периодов работы стана, отличающимися угловыми зазорами. Период 1 соответствует случаю отсутствия возмущений со стороны технологии и

оборудования (беззаконная линия). Наблюдается объяснимая линейная зависимость $M_{d_{max}}(M_{ст})$, поскольку $M_{d_{max}} = K_d M_{ст}$, где K_d постоянная величина.

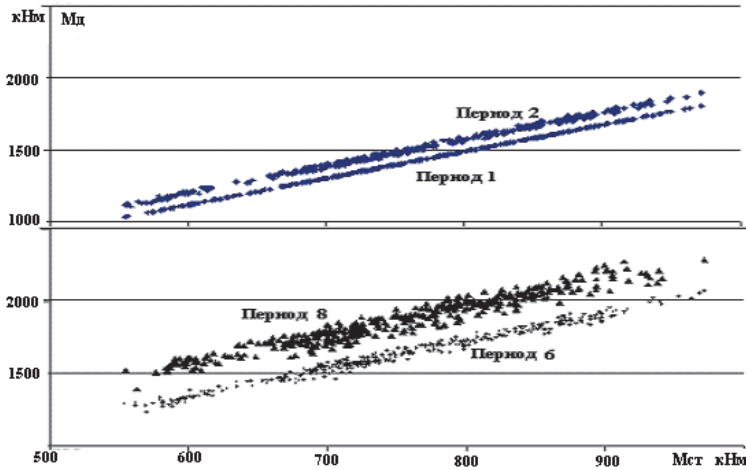


Рис.5. Представление процесса нагружения в виде корреляционных полей M_d , $M_{ст}$ для шпиндельного участка, полученные в результате статистического моделирования в разные периоды работы стана.

Во время следующих периодов увеличивали технологическое возмущение и угловой зазор в шпиндельном сочленении. В последнем, 8-м, периоде износ и зазоры соответствуют максимальным (перед ремонтом). Как видно, на усреднённую детерминированную зависимость $M_{d_{max}}(M_{ст})$ в каждом периоде накладывается случайная составляющая момента, обусловленная разбросом технологии и технического состояния.

Чем больше угловой зазор и разброс его значений, тем шире полоса $M_{d_{max}}(M_{ст})$. Одновременно увеличивается угол наклона прямой: между периодом 1 и 8 отличие составило 12%. Это может служить информативным признаком состояния технологии и оборудования. Отметим, что этим закономерностям подчиняются также второй и следующие пики затухающих колебаний момента.

Если промежуток времени между ремонтами (например, между заменами шпинделей) разделить на несколько (n) периодов и принять, что каждому i – му периоду соответствует определённое техническое состояние, обусловленное увеличивающимся угловым зазором, то для них можно получать расчётную (или путём измерений) зависимость $M_{d_{max,i}}(M_{ст})$ совместно с коэффициентом вариации $v_{d,i}$. Например, периоды 1 и 8 аппроксимированы линейной зависимостью: $M_d = M_{d_0} + K_d (M_{ст} - M_{ст_0})$, где $M_{d_0} = 1000$ и 1375 кНм, $K_d = 1,91$ и $2,13$ соответственно для $i = 1$ и 8

при $M_{d0} = 550$ кНм. Установленная зависимость $M_d(M_{ст})$ подтверждается результатами измерений (рис. 6).

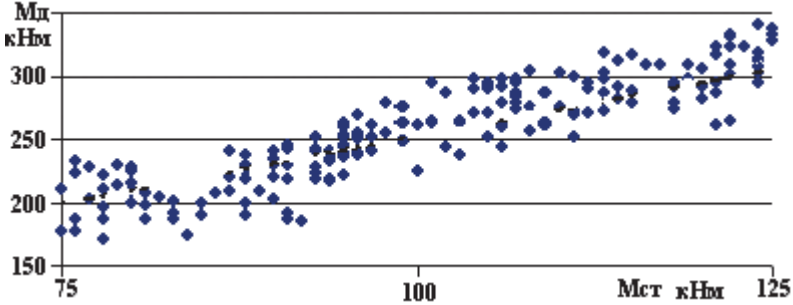


Рис.6. Корреляционное поле динамических и статических нагрузок, измеренных в клети 6 стана 1680 в течение 4-х часов.

Ранее на рис. 4 рассмотрен пример для моторного участка. Подобные статистические закономерности получены также для верхнего и нижнего шпинделей. Некоторые сложности состоят в учёте неупорядоченной задачи на прокатку партий полос разного сорта размера. Их анализ позволяет установить наиболее часто прокатываемые партии и сортамент и создать на этой основе алгоритм их стохастического задания. В данной работе моделировали десять партий полос разного сортамента (рис. 4) при случайной последовательности задания их в стан.

В представленной модели нагружения линии привода прокатной клети учтены: особенности переходных процессов на участках линии; временной фактор, связанный с изменением технического состояния оборудования, случайное воздействие технологических возмущений и угловых зазоров; случайная последовательность поступления заготовок полос на прокатку. Расчёт нагрузок и напряжений может быть выполнен вплоть до отдельных деталей линии привода. Для этого следует определиться с её эквивалентной расчётной схемой, которую можно принять с необходимой детализацией, т.к. при составлении её исходного варианта учитываются податливость и момент инерции всех элементов линии – от двигателя до валков.

Выводы. Конечным итогом статистического моделирования динамических процессов в период захвата полосы валками на основе описанной модели нагружения являются: - максимальная динамическая нагрузка при прокатке каждой полосы, вторая, третья и др. амплитуда этой нагрузки на любом участке линии привода; - статическая нагрузка; - статистические характеристики динамической и статической нагрузок: среднее значение, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации по партиям полос при разном техническом состоянии оборудования; - корреляционные поля динамической и статической нагрузок и их аппроксимации; -

длительность действия нагрузок разного уровня при прокатке каждой полосы. В результате могут быть получены все необходимые нагрузочные данные, их параметры и характеристики для построения спектров нагрузок в течение длительной работы стана, используемых для расчётов на прочность и долговечность узлов и деталей оборудования.

1. *Кожевников С.Н.* Динамические нагрузки главных линий прокатных станов и учет этих нагрузок при расчетах на прочность и выносливость / Кожевников С.Н., Большаков В.И. // Труды ВНИИМЕТМАШ, №23, 1968. –С.28-46.
2. *Веренев В.В.* Модели динамических процессов в прокатных станах. / Веренев В.В., Большаков В.И., Юнаков А.М. // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. научн. трудов, К: Наукова думка, 2009. – Вып. 19. – с. 346 – 358.
3. *Большаков В.И.* Особенности идентификации динамической модели главного привода листопрокатного стана / Большаков В.И., Веренев В.В. // Защита металлургических машин от поломок. Мариуполь: ПГТУ. – 1998, Выпуск 3. с. 30 – 34.
4. *Веренев В.В.* Связь ударных нагрузок с техническим состоянием прокатной клетки. / Веренев В.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. научн. трудов, К: Наукова думка, 2006. – Вып. 6. – с. 366 – 371.
5. *Веренев В.В.* Влияние технологических параметров на динамические нагрузки в прокатной клетке. / Веренев В.В. / Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии в машиностроении. Краматорск: ДГМА. –2003.– С. 141 – 145.
6. *Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680* / Веренев В.В., Большаков В.И., Путноки А.Ю., Маншилин А.Г., Мацко С.В. // Монография. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 184 с.
7. *Веренев В.В.* Повышение информативности измеренных параметров на прокатных станах. / Веренев В.В., Подобедов Н.И., Коренной В.В., Даличук А.П. // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. Сб. научн. трудов, К: Наукова думка, 2010. – Вып. 22. – с. 305 – 314.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук С.А.Воробьем

В.І.Большаков, В.В.Веренев, С.В.Белодеденко, Н.І.Подобедов

Методичні основи оцінки навантажень лінії приводу клітей широкоштабового стану

Запропоновано методіку оцінки навантаження лінії приводу кліті з урахуванням випадкових збурень і тимчасового фактора, від якого залежать знос і кутові зазори в обладнанні. Показана можливість отримання навантажувальних даних, необхідних для розрахунків на міцність і довговічність вузлів і деталей устаткування. Наведено параметри та характеристики для побудови спектрів навантажень протягом тривалої роботи стану. Розглянуто приклад статистичного моделювання динамічних і статичних навантажень з урахуванням неупорядкованого завдання при прокатці партій смуг різного розміру.