

В.В.Веренев, Н.И.Подобедов, В.В.Коренной, А.П.Даличук

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОКАТНЫХ СТАНАХ

Показано, что путём представления результатов измерений в различных видах (гистограммы, таблицы, графики, массивы точек) можно существенно повысить информативность знаний о технологии прокатки и оборудовании. Приведены результаты статистического моделирования динамических процессов при захвате полосы валками, которые подтвердили правомерность использования коэффициента вариации статического и динамического моментов и коэффициента динамичности в линии привода прокатной клетки для оценки состояния технологии прокатки и оборудования клеток.

прокатка, переходные процессы, динамические нагрузки, случайные факторы, статистическое моделирование

Состояние вопроса и постановка задачи. Анализ параметров, измеряемых на прокатных станах с помощью штатных или специальных приборов, показывает, что во многих случаях им не уделяется должного внимания с целью получения как можно большей информации о технологии и оборудовании. Например, на станах ведется постоянное измерение момента главного привода клеток. Его значение подвергается анализу в случаях явного нарушения технологии, сложных ситуаций или отказов оборудования. При нормальной работе стана момент не анализируется, в то время как некоторые виды его представления и характеристики могли бы стать критериями для сравнения при худших условиях работы.

Методика исследования. В связи с этим предложен ряд способов повышения информативности измеряемых параметров.

1. Вычисляется распределение момента двигателя $M_{ст}$ или момента сил упругости $M_{упр}$ вдоль полосы и строятся гистограммы по клетям. На рис.1 осуществили наложение гистограмм для 6 полос одного сортаразмера, прокатанных последовательно в каждой клетке непрерывной группы стана 1680. Рассмотрим, какую в этом случае можно получить дополнительную информацию.

Распределение момента в клетях 5...9 соответствует нормальному закону. Для каждой i -той полосы по клетям одновременно вычисляются среднее значение момента m_i , среднее квадратическое отклонение σ_i и коэффициент вариации v_i , т.е. каждая полоса сопровождается тремя числовыми характеристиками. Для полос данной плавки, прокатанных последовательно в клетях, также определяются средние значения m , σ и v . В итоге каждая плавка, состоящая из n полос, также имеет три числовые характеристики.

Сравнивая эти характеристики между полосами в плавке или между плавками одного сорта размера определяют какие полосы (или плавки) прокатаны с отклонениями (изменениями) технологии. Например, из рис.1 видно, что в клетях 6 две полосы прокатаны с другим средним значением момента, в клетях 7 и 8 по одной полосе. Осуществляя дополнительно построение подобных распределений для температуры раската, частоты вращения двигателя или обжатия в клетях можно установить причину этих отклонений.

Сравнивая подобные распределения между сортаментами или их табличные данные для $M_{ст\text{ ср}}$ и $M_{ст\text{ макс}}$ определяют сортамент, при прокатке которого нагрузки в клетях достигают наибольших значений.

На распределениях для клетей 5 и 6 выделяются правые «хвосты». Они обусловлены амплитудами переходного процесса при захвате полосы валками и увеличением нагрузки на концевых участках полосы. В подобных распределениях для момента сил упругости, где переходный процесс по амплитуде больше, чем момент двигателя, правые «хвосты» в 1,5...2 раза протяженнее. Их протяженность увеличивается при увеличении зазоров, что можно использовать для качественной оценки их влияния на нагрузку.

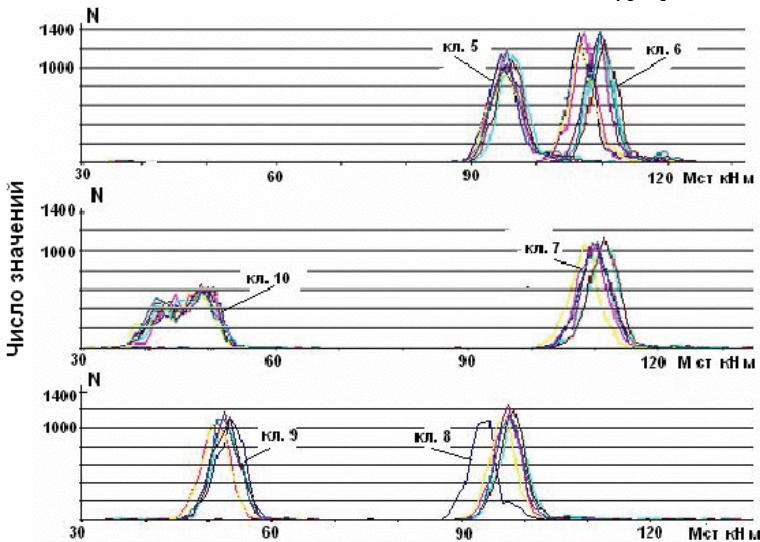


Рис.1. Наложение шести распределений момента двигателя вдоль полос, прокатанных последовательно в клетях 5 – 10

Специфическое распределение момента в клетке 10 объясняется тем, что после захвата полосы моталкой и формирования натяжения часть полосы прокатывается с меньшим моментом. Когда натяжение со стороны моталки отсутствует, распределение становится нормальным. Таким образом, вид

распределения момента является дополнительным информативным признаком.

2. Совместное графическое представление динамики изменения среднего статического $M_{ст}$, максимального динамического $M_{д}$ момента и коэффициента динамичности $K_{д}$ в процессе последовательной прокатки полос ряда плавок (известного сортамента) в течение определенного времени (рис.2). В этом случае для каждой клетки определяется партия полос или плавка (сортамент), а в партии полосы, которым соответствует максимальный статический $M_{ст}$ и максимальный динамический $M_{д}$ момент.

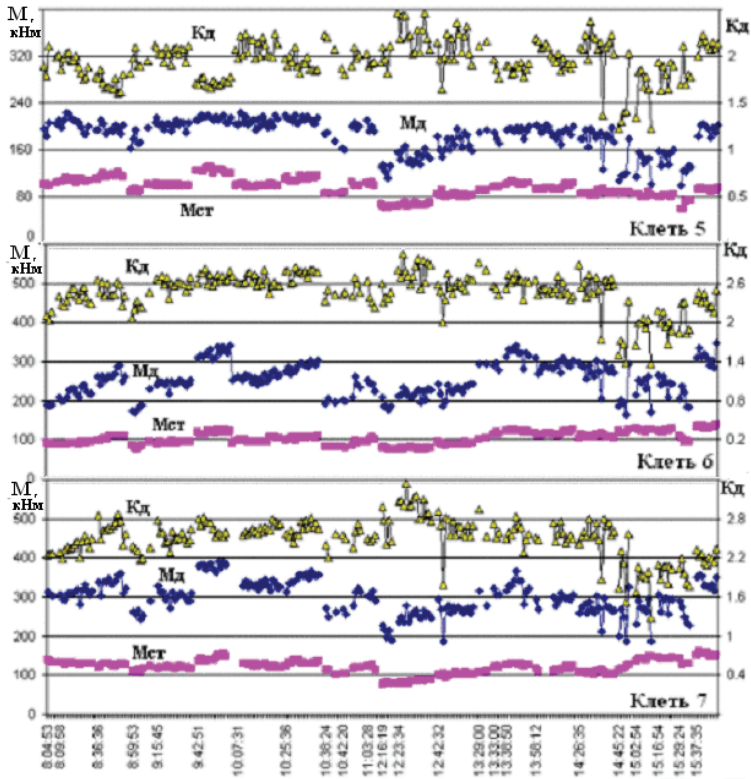


Рис.2. Графическое представление для каждой полосы обработанных результатов измерений момента сил упругости в клетях 5, 6, 7 в течение длительного промежутка времени.

Определяется в каких клетях происходит увеличение динамического момента. Например, в клетях 5 с 09:15 до 10:38 ч. при прокатке полос разного сортамента Мд изменяется незначительно при заметном изменении Мст в этот период, а клетях 6 и 7 Мд по плавкам резко изменяется. При этом заметно, что в отмеченном промежутке времени в клетях 6 и 7 с увеличением Мст увеличивается Мд. Поскольку Мд зависит не только от Мст но и от зазоров в линии привода, можно качественно отметить, что в этом отношении техническое состояние главных линий клетей 6 и 7 худшее, чем клетя 5. Это определяется также путем сравнения коэффициента динамичности по клетям (в клетях 6 и 7 он больше, чем в клетя 5). По ряду плавков (сортогабариту) можно отметить известную зависимость: чем меньше Мст, тем больше коэффициент динамичности Кд (например, в промежутке 12:15–12:42) и наоборот. Это подтверждает наличие зазоров в линиях привода клетей.

3. Параллельно способу 2 представление тех же данных в виде массивов точек Кд, Мст; Мд, Мст и Кд, Мд последовательно для ряда клетей (на рис.3 приведен только массив Мд, Мст).

Путем сравнительного анализа массивов получают, по крайней мере, качественное представление о разбросе Мд, Мст и их максимальном значении. Например, в клетях 5 в отличие от клетей 6 и 7 массив точек Мд, Мст представляет собой полосу определенной ширины. Имеется явная детерминированная зависимость Мд(Мст), вокруг которой происходит случайный разброс. Он меньше чем в клетях 6 и 7. Объяснение состоит в том, что в клетях 5 установлены новые шпиндели (наработка Тшп = 0) с минимальным зазором. В клетях 6 и 7 время наработок шпинделей составило 120 и 99 суток, т.е. здесь из-за износа имелись зазоры, что привело к большим значениям коэффициента динамичности и разбросу Мд.

Систематическое оформление массивов фактически представляет собой наглядный мониторинг нагрузок и общего технического состояния оборудования главных линий клетей. Определяется наиболее тяжелый сортмент, которому соответствуют максимальные статические и динамические нагрузки.

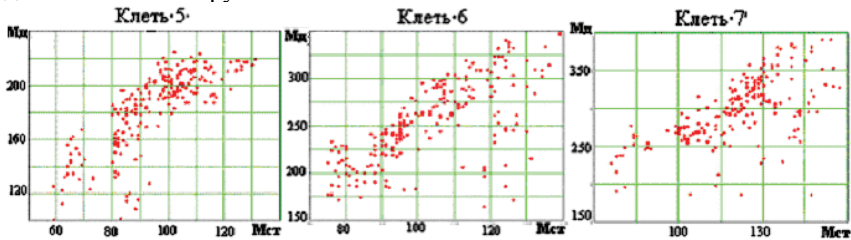


Рис.3. Представление по клетям 5, 6 и 7 стана 1680 массивов максимального пикового момента сил упругости Мд на промежуточном валу и среднего статического момента Мст (кН м).

4. Табличное представление обработанных измерений, где для каждой плавки (полос одного сортаразмера) приводятся средние, максимальные, среднеквадратические значения $M_{ст}$, $M_{д}$ (кНм), и $K_{д}$ и коэффициенты вариации $v_{ст}$, $v_{д}$, $v_{кд}$ (табл.1).

Таблица 1. Табличное представление статистически обработанных измерений момента сил упругости (кН м).

28 шт.	08ПС			3,00 x 1250			Транзит-1		
	Клеть №5			Клеть №6			Клеть №7		
	Мд	Мст	Кд	Мд	Мст	Кд	Мд	Мст	Кд
среднее	162	78	2,1	272	96	2,9	283	122	2,3
максимальное	183	84	2,3	289	99	3,1	306	127	2,5
с. к. о.	8	2,7	0,1	10,3	2	0,137	8,7	1,6	0,068
коэфф. вар.	0,049	0,034	0,048	0,038	0,02	0,048	0,031	0,013	0,029

Результаты исследования. В статье [Анализ статистических характеристик нагруженности главных линий широкополосного стана /В.В.Вернев, О.В. Симененко, С.В. Мацко и др. // Сталь. – 2008. – №10. – С.44–46] на основании статистической обработки результатов измерений показано, что путем совместного анализа коэффициентов вариации можно делать определенные выводы о качестве технологии и состоянии оборудования. С целью проверки этого метода выполнили статистическое моделирование переходных процессов при захвате полосы. В качестве технологического возмущения приняли разброс температуры $\Delta T^{\circ}\text{C}$ полос в плавке. Возмущением со стороны оборудования (техническое состояние) служил зазор δ в шпиндельном сочленении с разбросом $\Delta\delta$. Нормальный закон задания обоих возмущений реализован с помощью соответствующего датчика случайных чисел. В итоге в систему дифференциальных уравнений, описывающих крутильные колебания в линии привода, задавали различные сочетания значений возмущений. Расчеты выполнили для выборок 50 и 100 точек, для которых получены близкие результаты. Результатом расчета для каждого сочетания возмущений являлись массив случайных точек $K_{д}$, $M_{ст}$; $M_{д}$, $M_{ст}$; $K_{д}$, $M_{д}$ и коэффициенты вариации $v_{ст}$, $v_{д}$, $v_{кд}$ для этих массивов.

Суть исследования состояла в том, чтобы проследить как изменяется поведение массивов точек $K_{д}$, $M_{ст}$; $M_{д}$, $M_{ст}$; $K_{д}$, $M_{д}$ и значения коэффициентов $v_{ст}$, $v_{д}$, $v_{кд}$ в процессе последовательного наращивания вариантов возмущений к двум исходным вариантам. В первом исходном варианте (А) учитывали разброс температуры полос в пределах $\pm 5...25^{\circ}\text{C}$ при отсутствии зазоров (т.е. при «хорошем» техническом состоянии) (рис.4). Во втором варианте (Б) учитывали разброс углового зазора в

шпиндельном сочленении при постоянстве параметров прокатки («хорошая» технология) (рис.5). Несмотря на случайный характер возмущений, в обоих вариантах получили детерминированные зависимости, что естественно. Преимущество статистического моделирования заключается в том, что на выходе получают законы распределения Мст, Мд и Кд (в обоих вариантах они нормальные), по которым можно определить максимальное значение величин и их вероятность. Параллельно строили массивы T^0C , δ , которые фактически остаются неизвестными. Как видно из рис.4 и рис.5 поведение зависимостей в обоих вариантах различное.

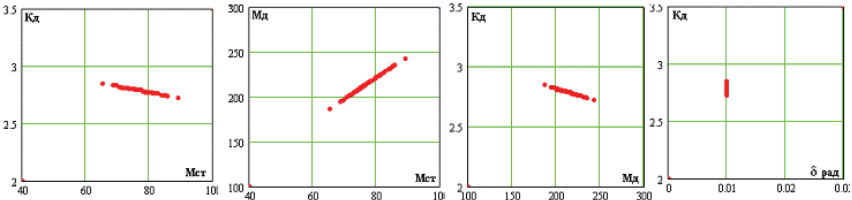


Рис.4. Массивы значений Мст, Мд (кНм), Кд, δ , вариант А при разбросе температуры $\pm 15^0C$.

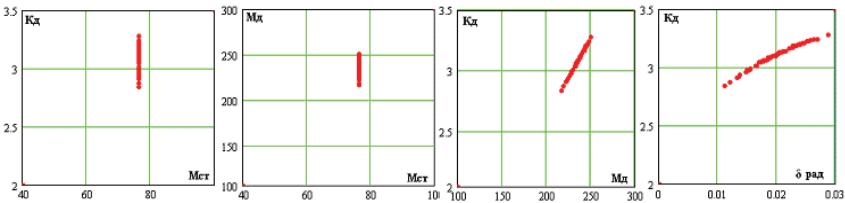


Рис.5. Массивы значений Мст, Мд (кНм), Кд, δ , вариант Б при разбросе зазора $\pm 0,01$ рад.

Далее при постоянном технологическом возмущении постепенно «ухудшали» техническое состояние, т.е. увеличивали разброс зазора, и определяли поведение массивов точек. В зависимости от сочетания возмущений массивы точек формируется вдоль явно выраженной детерминированной зависимости (рис.6) или составляют «облако» точек, в котором детерминированная составляющая выражается не столь явно (рис.7). Отличие состоит и в коэффициентах вариации: если в обоих случаях $v_{ст} \approx v_{д}$, то $v_{кд}$ существенно отличаются (0,0107 и 0,0452). Это значит, что вклад зазора в динамическую составляющую меньше, чем технологического возмущения (рис.6).

В двух других вариантах сочетаний возмущений при постоянном разбросе зазора и разным разбросе температуры, чем меньше разброс ΔT (рис.8), тем чётче выделяются детерминированные зависимости. В этих

вариантах $v_d \approx v_{кл}$, а $v_{ст} = 0,0192 < v_{ст} = 0,0384$ (рис.9), т.е. по сочетанию коэффициентов можно отметить, что в первом случае технология «лучше», чем техническое состояние.

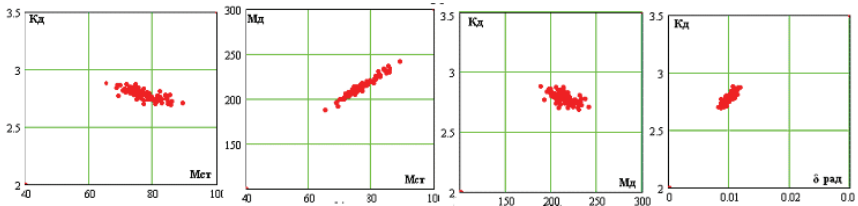


Рис.6. Массивы значений $M_{ст}$, $M_{д}$ (кНм), $K_{д}$, δ , при увеличении разброса зазора $\pm 0,0025$ рад и постоянном разбросе температуры $\pm 15^{\circ}C$.

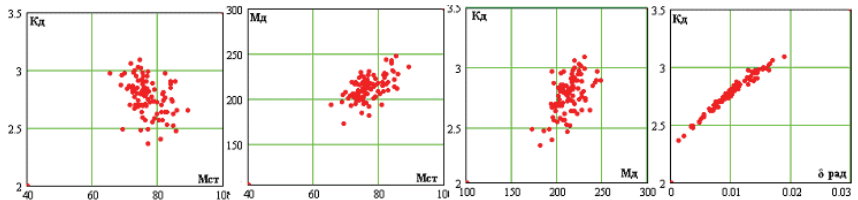


Рис.7. Массивы значений $M_{ст}$, $M_{д}$ (кНм), $K_{д}$, δ , при увеличении разброса зазора $\pm 0,01$ рад и постоянном разбросе температуры $\pm 15^{\circ}C$.

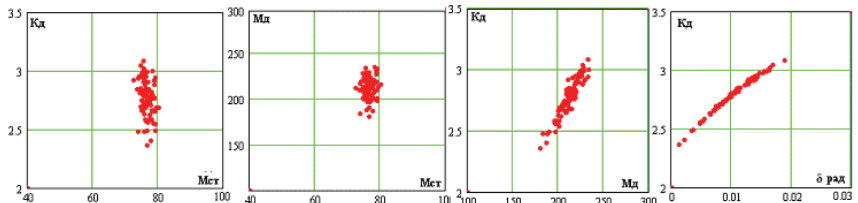


Рис.8. Массивы значений $M_{ст}$, $M_{д}$ (кНм), $K_{д}$, δ , при увеличении разброса температуры $\pm 15^{\circ}C$ и постоянном разбросе зазора $\pm 0,01$ рад.

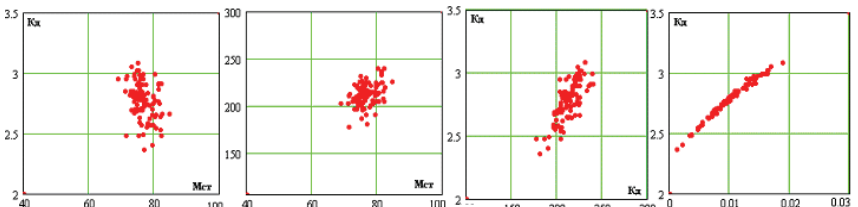


Рис.9. Массивы значений $M_{ст}$, $M_{д}$ (кНм), $K_{д}$, δ , при увеличении разброса температуры $\pm 10^{\circ}C$ и постоянном разбросе зазора $\pm 0,01$ рад.

Отметим еще один важный момент, состоящий в повороте осей «облаков» точек Кд(Мд) в разных направлениях относительно начальных на рис.1 и рис.2 и Мд(Мст).

Рассмотрим результаты статистического моделирования, часть вариантов которого приведена в табл.2. Прежде всего, отметим, что примерное равенство коэффициентов $v_{ст} \approx v_{д}$ независимо от соотношения $v_{д}$ и $v_{кд}$ указывает на то, что разброс технологии является ведущим (увеличение статической нагрузки «влечет» за собой увеличение динамической нагрузки) в формировании динамической нагрузки и её разброса. В детерминированной задаче между Мст и Мд имеется линейная зависимость, которая в виде постоянной составляющей выделяется в большинстве массивов случайных точек Мд, Мст.

Таблица 2. Результаты статистического моделирования при задании некоторых вариантов сочетаний возмущений.

	$v_{\Delta T}$	v_{δ}	$v_{ст}$	$v_{д}$	$v_{кд}$	Кд	ТС	S
1.	0	0	0	0	0	2,1	+	+
2.	0,0106	0	0,0384	0,0384	0	2,1	-	+
3.	0,0263	0	0,0968	0,0968	0	2,1	--	+
4.	0,0283	0	0,0968	0,0853	0,0113	2,5	--	--+
5.	0	0,175	0	0,0213	0,0213	2,5	+	-
6.	0,0105	0,175	0,0384	0,0356	0,0227	2,45	-	-
7.	0,0263	0,175	0,0968	0,083	0,0263	2,45	--	-
8.	0,0105	0,3526	0,0384	0,0486	0,0445	2,45	-	-
9.	0,0053	0,3526	0,0192	0,0428	0,0439	2,45	--+	-
10.	0,0158	0,3526	0,0577	0,0589	0,0452	2,45	-	-
11.	0,0158	0,0582	0,0577	0,0498	0,0107	2,46	-	--
12.	0,0158	0	0,0577	0,0509	0,0067	2,46	--	+
13.	0	0,0582	0	0,0068	0,0068	2,46	+	-
14.	0	0,1752	0	0,0213	0,0213	2,46	+	--
15.	0	0,3526	0	0,0434	0,0434	2,45	+	--
16.	0	0,5181	0	0,0645	0,0645	2,44	+	--
17.	0	0,1752	0	0,0295	0,0295	2,71	+	--
18.	0,0105	0,1752	0,0384	0,0383	0,0315	2,71	-	-
19.	0,0263	0,1752	0,0968	0,0794	0,0364	2,71	--	-

На основании данных таблицы и анализа коэффициентов вариации построен алгоритм распознавания состояния технологии (S) и оборудования (ТС), основные моменты которого следующие.

1. Примерное равенство коэффициентов $v_{ст} \approx v_{д} \approx v_{кд}$ означает «плохую» технологию и «плохое» техническое состояние оборудования. Оба возмущения приносят примерно равный вклад в динамическую составляющую нагрузки. Насколько «плохие» технология и состояние линии привода можно оценить количественно путем сравнения коэффициентов с их значениями, полученными во время предыдущих

серий измерений, например, при стабильном процессе прокатки и после ремонта оборудования (установки шпинделей с новыми вкладышами).

2. При $v_{ст} \approx v_d$ и $v_d > v_{кд}$, динамика в большей степени зависит от технологии, чем от ТС (разброс технологии вносит больший вклад в динамическую составляющую, чем зазор). Техническое состояние линии относительно «лучше», чем технологии (п.11 табл.2). Как крайний случай этого варианта является сочетание $v_d \gg v_{кд} \approx 0$ – «плохая» технология и «хорошее» ТС (п.12 табл.2).

3. При $v_{ст} < v_d$ и $v_d \approx v_{кд}$ техническое состояние «хуже», чем технология, т.е. ТС вносит больший вклад в динамическую нагрузку, чем технология (п.9 табл.2). Крайний случай этого варианта $v_{ст} \approx 0$ или $v_{ст} \ll v_d$, $v_d \approx v_{кд}$ – «хорошая» технология и «плохое» ТС (п.п.14 и 15 табл.2).

4. $v_{ст} \approx 0$, $v_d \approx 0$ и $v_{кд} \approx 0$ – «хорошая» технология и «хорошее» техническое состояние (п.1 табл.2).

Здесь приближенные равенства $v_{ст} \approx v_d$ и $v_d \approx v_{кд}$ приняты до 15...20 % отличия.

Полученные путем статистического моделирования 4 варианта сочетания значений коэффициентов вариации совпадают с 4 вариантами, рассмотренными в [Анализ статистических характеристик нагруженности главных линий широкополосного стана [В.В. Веренев, О.В. Симененко, С.В. Мацко и др.] // Сталь. – 2008. – №10. – С. 44 – 46.] во время анализа фактических значений v , определенных по результатам измерений.

Отметим, что в таблице не образовались следующие сочетания коэффициентов («м» и «б» означают «малое» и «большое»):

5. $v_{ст б}$, $v_{д м}$, $v_{кд м}$ и 6. $v_{ст б}$, $v_{д м}$, $v_{кд б}$

– при «большом» разбросе технологии, т.е. при $v_{ст б}$ не может быть «малого» разброса динамики, т.е. с увеличением $M_{ст}$ и M_d их разброс увеличивается.

7. $v_{ст м}$, $v_{д б}$, $v_{кд м}$ и 8. $v_{ст м}$, $v_{д м}$, $v_{кд б}$.

– при «малом» разбросе технологии и «малом» значении $v_{кд м}$ не может быть «большого» разброса динамики, т.е. $v_{д б}$, а при «малых» $v_{ст м}$ и $v_{д м}$ не может быть больших значений $v_{кд б}$.

При анализе сочетаний значений коэффициентов вариации $v_{ст}$, v_d , $v_{кд}$ следует учитывать характер и форму массивов случайных точек K_d , $M_{ст}$; M_d , $M_{ст}$; K_d , M_d . Это позволяет получить дополнительное подтверждение правильности сделанных заключений. Например, условие 2 для пунктов 10 и 11 табл.2 подтверждается поведением массивов соответственно на рис.6 и рис.7. Диапазон значений коэффициентов вариации, полученных при моделировании, совпадает с диапазоном, определенным на основании обработки данных измерений [Анализ статистических характеристик нагруженности главных линий широкополосного стана /В.В.Веренев, О.В.Симененко, С.В.Мацко и др. // Сталь. – 2008. – №10. – С.44–46.].

Отметим один важный результат, установленный на основании моделирования. Несмотря на случайный характер получения точек массивов при статистическом моделировании, путем наращивания возмущений к исходным вариантам А и Б установлено, что поведение массивов точек, (наличие детерминированной составляющей среди разброса точек, изменение направления осей и ширины «облаков» точек), значения коэффициентов вариации и их сочетания подчиняются определенным закономерностям, связанным с исходными возмущениями. В этом отношении массивы точек и коэффициенты вариации следует рассматривать как существенные диагностические признаки.

Добиваясь совпадения фактических и расчетных значений коэффициентов вариации и вида массивов точек можно давать не только качественную («хорошо», «плохо», «ухудшается» или «улучшается»), но и количественную совместную оценку состояния технологии и оборудования.

Выводы. Таким образом, предложенные способы представления результатов измерений позволяют повысить информативность измеряемых параметров, выявить дополнительные признаки и использовать их в диагностических целях. Путем сравнительного анализа значений пар коэффициентов $v_{ст}$, v_d и $v_{д}$, $v_{кл}$ можно определять состояние оборудования и технологии. Эффективность этого метода существенно повышается, если подобный анализ выполнять последовательно в клетях непрерывного стана.

*Статья рекомендована к печати
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

В.В.Вереньов, М.І.Подобєдов, В.В.Коренной, А.П.Далічук

Підвищення інформативності вимірюваних параметрів на прокатних станах

Показано, що шляхом представлення результатів вимірювань у різних видах (гістограми, таблиці, графіки, масиви точок) можливо істотно підвищити інформативність знань про технологію та обладнання прокатки. Наведені результати статистичного моделювання динамічних процесів при захваті штаби валками, що підтвердили правомірність використання коефіцієнта варіації статичного і динамічного моментів та коефіцієнта динамічності у лінії приводу прокатної кліті для оцінки стану технології прокатки та обладнання клітей.