

УДК 621.783.245.045.2.785.3-669.14.018.262.415

О.Н. Кукушкин

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЯМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Аннотация. Сформулирован и обоснован принцип временной декомпозиции процесса функционирования сложных технологических систем, который позволяет реализовать системный подход к задачам инновации и автоматизации оборудования

Ключевые слова: технологическая линия, сложный процесс, декомпозиция.

Постановка проблемы. Задачи совершенствования технологии, улучшения качества продукции, повышения производительности оборудования, решаемые на сложном объекте, например непрерывном прокатном стане, тесно переплетены, что требует системного (всестороннего) подхода к их решению.

Цели доклада. Рассмотрим общность структуры и функционирования технологических линий (ТЛ) наиболее сложного класса прокатного оборудования. ТЛ – это совокупность агрегатов и рабочих машин, производящих последовательно в пространстве и взаимосвязано во времени обработку материала от склада заготовок, полуфабрикатов до готовой продукции, причем внутри ТЛ склады отсутствуют. ТЛ состоит из участков (например, группа клеток), которые, в свою очередь, состоят из последовательно расположенных рабочих машин и агрегатов (агрегат – несколько машин, работающих в комплексе и имеющих общую станину). Участки разделены буферами (накопителями материала), преобразователями потока материала (например, ножницы, стыкосварочная машина) или разветвлениями. Кроме рабочих машин, в ТЛ входят устройства для нагрева, охлаждения, обработки поверхности и т. п. Всякая ТЛ имеет входные и выходные буферы, сопряженные с ними входные и выходные участки работают дискретно, циклически, средний технологический участок, как правило, работает в непрерывном режиме. Такая ТЛ называется непрерывной. Наиболее перспективны полностью непрерывные или бесконечные ТЛ.

© Кукушкин О.Н., 2010

Процесс функционирования ТЛ представляет k -мерную функцию (композицию и суперпозицию) составляющих процессов: процесса планового техобслуживания (ПТО (t)); процесса восстановления (ПВ (t)), определяемого эксплуатационной надежностью ТЛ; процесса циклической, нормальной работы ($Q(t)$), определяемого производительностью $q(t)$ в зависимости от сортамента и массы заготовки; процесса изменения качества продукции ($K(t)$).

Основная часть. Каждый составляющий процесс (подпроцесс) является функцией времени, детерминированной или случайной, дискретной или непрерывной в зависимости от определяющих их технических и организационных факторов. Каждый подпроцесс $f_i(t) = f_i(t, \varphi_{ij})$ отображает множество значений взаимодействующих факторов φ_{ij} на единую ось времени t . Это позволяет унифицировать в какой-то мере методы анализа подпроцессов $f_i(t)$. Каждый из них характеризуется определенными отрезками времени (периодами) или частотами. Так, ПТО (t) характеризуется межремонтными периодами, ПВ(t) – наработкой на отказ и средним временем восстановления. $Q(t)$ – длительностью цикла, машинным временем; быстрее составляющие сложного подпроцесса $K(t)$ определяются частотами вращения валков, собственными частотами механических систем привода и т. д.

Для исследования сложного процесса необходимо по возможности осуществить его временную декомпозицию. Для этого все составляющие $\Phi(t)$ отобразим однозначно на единую шкалу временных интервалов τ , каждая точка которой соответствует интервалу на оси t . На осях ординат (они различны для разных подпроцессов) отложим амплитудно-частотные характеристики или спектры – для детерминированных процессов распределения вероятностей или спектральные плотности – для случайных процессов. Все они имеют единый смысл – распределение вероятностей существования составляющих процесса $\Phi(t)$, характеризуемых определенными τ . Существенный диапазон временных интервалов для ТЛ весьма широк: от 10^{-2} до 10^7 , поэтому для обозримости абсциссу строим в логарифмическом масштабе. Назовем отображение $\Phi(t) \rightarrow \psi(\tau)$ декомпозицией процесса функционирования во времени в отличие от обычной декомпозиции структуры сложной системы.

Исследования реальных временных характеристик подпроцессов $f_i(t)$ многих ТЛ показали, что их отображения $f_i(\tau)$ всегда ограничены слева и потому лежат, в основном, в непересекающихся диапазонах τ , что дает основание для отдельного анализа составляющих $f_i(t)$. В теории случайных процессов установлено, что случайные процессы $f_i(t)$ независимы, если совместная плотность распределения $P(f_1, \dots, f_i, \dots, f_k) = \prod P(f_i)$.

Таким образом, модель функционирования ТЛ можно сконструировать в виде системы моделей производительности, надежности и точности продукции.

Реальную производительность Q ТЛ за достаточно большой период времени T можно определить, зная фактическое время работы за этот период (обычный подход) или коэффициент экстенсивного использования $K_э$ и цикловую производительность $q_{ц}$

$$Q = K_э q_{ц} T,$$

где $K_э = K_г K_о K_к$; $K_г$ – коэффициент готовности, отражает эксплуатационную надежность ТЛ; $K_к$ – коэффициент использования календарного времени, отражает подпроцесс ПТО; $K_о$ – коэффициент организационных простоев, со свойствами ТЛ связан мало.

В отличие от обычного подхода таким образом удается четко разделить влияние подпроцессов функционирования на Q .

Коэффициент готовности

$$K_г = 1 / 1 + \sum_{k=1}^n T_{вк} / T_{рк}$$

может быть определен через наработки на отказ $T_{рк}$ и среднее время восстановления $T_{вк}$ всех n элементов расчета надежности (агрегатов, участков ТЛ либо причин отказов). Этот набор стандартизованных показателей надежности является достаточным для оценки длительного пользования ТЛ и ее элементов. Для удобства обозначим $T_{вк} / T_{рк} = k_{пк}$ – коэффициент простоя k -того элемента.

Для количественного анализа $k_г$ при изменении k_n k -ого агрегата за счет его усовершенствования получили расчетную формулу $\Delta k_г = k_г^2 \Delta k_{пк}$, где $\Delta k_{пк}$ – приращение $k_{пк}$ при улучшении безотказности ($T_{рк}$) или ремонтпригодности ($T_{вк}$) -того элемента.

Цикловая производительность на i -том элементе сортамента

$$q_{ци} = 1/t_{ци} \int_{t_{ци}} q_i(t) dt = M_i / (t_{ци} k_p) = m_i / t_{ци}$$

(здесь $t_{ци}$ - длительность цикла, M_i - масса заготовки, m_i - масса готовой продукции, k_p - расходный коэффициент) является дискретной случайной величиной, изменяется от цикла к циклу, а для расчетов Q используется ее среднее значение q_i или (при широком сортаменте) средневзвешенное значение. Для ориентировочной оценки влияния изменения отдельных параметров φ_i на $q_{ци}$ достаточно воспользоваться обычным приемом теории чувствительности, записав полный дифференциал в конечных приращениях и пронормировать относительно множества базовых значений параметров $\{\varphi_{i0}\}$ и базовой $q_{ц0}$.

Для любой ТЛ достаточно однажды рассчитать коэффициенты влияния $k_i = dq_{ци} / d\varphi_i$ для некоторого множества базовых режимов, затем использовать их для быстрых ориентировочных расчетов. Сравнительный анализ величин k_i подсказывает эффективные пути совершенствования ТЛ.

В ТЛ прокатных цехов имеются буферы как в виде отдельных устройств (петлевые ямы, петлевые столы и т. п.), так и в виде технологических агрегатов, обладающих емкостью. Емкость E может измеряться в натуральных единицах (длина полосы, количество рулонов и др.). в приведенных единицах $E_{пр} = E / v$ (v - скорость материала на входе или выходе буфера), относительных единицах $e = E_{пр} / \tau$ (τ - цикловая пауза).

Буферы I типа ($e \ll 1$) служат для компенсации рассогласования скоростей материала в двух смежных агрегатах, работающих в одинаковых (непрерывных) режимах (например, петлевые столы между клетями). Эти буферы устраняют силовое взаимодействие между смежными агрегатами, вызывающее технологические обратные связи.

Буферы II типа ($e \sim 1$) служат для создания запаса материала между двумя участками ТЛ, работающими в различных режимах - непрерывном и циклическом (например, петлевая яма НТЛ), они влияют на $q_{ци}$ ТЛ.

Буферы III типа ($e \gg 1$) служат для компенсации влияния отказов оборудования предшествующих участков на надежность и производительность ТЛ в целом.

Буферы IV типа ($e \sim 10$) – это входные и выходные буферы ТЛ, которые служат для накопления заготовки или готовой продукции на время, обеспечивающее независимость работы ТЛ от работы кранового или другого транспортного оборудования, не входящего в ее состав.

Типичной ТЛ с буферами является непрерывная травильная линия (НТЛ). Она состоит из головного (Ц1) и хвостового (Ц2) участков, работающих циклически, и непрерывного участка травления (Н2) между ними; участки разделены буферами. Циклические участки вызывают остановки непрерывного участка, если их цикловые паузы велики либо емкости накопителей не используются полностью, поскольку при проектировании ТЛ емкости (конструктивные параметры) выбираются так, чтобы исключить остановки Н2 при нормальной работе. Для безостановочной работы Н2 желательно обеспечить максимальное заполнение буферов перед началом цикловой паузы. Это требует автоматического управления запасом полосы в накопителях а также резервов пропускной способности циклических участков по отношению к непрерывному.

Следует отметить, что буферы большой емкости ($e > 3$) могут не только полностью исключить остановки непрерывного участка из-за случайных отклонений цикловых пауз, но и в значительной мере „поглотить” внецикловые простои циклических участков, например, вызванные отказами оборудования, т. е. повысить надежность ТЛ. Для ТЛ, на которых автоматическое регулирование отсутствует, зависимость k_n от емкости буфера может быть определена путем статистического моделирования на ЭВМ работы ТЛ.

Алгоритм автоматического согласования скоростей участков (применительно к НТЛ) должен удовлетворять: условию ограничения запаса полосы в буфере $L_{\min} \leq l(t) \leq L$; условию отсутствия тренда запаса полосы от цикла к циклу $M[1(\mu_i)] = 0$, здесь μ_i – фиксированная фаза цикла, а также условию минимума изменений скорости полосы на непрерывном участке $\min_t \int |dv_n/dt| dt$, что

обеспечивает стабильность технологического процесса. Разработан алгоритм управления, соответствующий этим требованиям, и реализован в соответствующей системе автоматической настройки.

Высокочастотные составляющие процесса функционирования определяют точность прокатки. Математическая модель профилограммы представлена как суперпозиция трех компонентов, образующих нестационарный случайный процесс:

$$x(i, l) = x_{вч}(i, l) + x_{т}(i, l) + x_{н}(l),$$

где i – номер полосы (реализации); $0 \leq l \leq L_i$ – координата сечения вдоль полосы длиной L_i ; $x_{вч}$ – центрированный высокочастотный процесс; $x_{т}$ – тренд случайного процесса длительностью L_i ; $x_{н}$ – изменение настройки стана. Компоненты $x(i, l)$ определены в различных диапазонах временных интервалов, поэтому их можно анализировать отдельно.

Подпроцесс $x_{н}$ – весьма медленный случайный процесс, вызванный в основном изменением средней температуры заготовок и валков, а также износом калибров. Поэтому его можно представить как процесс с дискретным временем i , причем это управляемый случайный процесс, поскольку в него вмешивается персонал стана.

Подпроцесс $x_{вч}$ вызван колебательными процессами в механических системах клетей и их проводов. Источниками высокочастотных возмущений являются автоколебательные режимы в линиях привода и валковой системе, которые возникают на оборотных частотах и их гармониках, как правило, не выше второй.

Таким образом, на чистовом профиле получим сумму $2n$ гармонических колебаний с достаточно определенными частотами и произвольными фазами. Разработан и опробован метод спектрального анализа профилограмм на априорном множестве частот – прогнозных (расчетных частот возмущений ω_k) и контрольных (середины интервалов между прогнозными). Если спектр на прогнозной частоте имеет локальный максимум, то делается вывод о наличии возмущений этой частоты. Результаты такого специфического анализа спектра можно использовать для диагностики состояния оборудования клетей чистовой группы.

Амплитуда $x_{вч}$ ограничивает возможности повышения точности прокатки путем автоматизации, поскольку автоматика может уменьшить лишь более медленные составляющие $x_{т}$ и $x_{н}$. Предельная точность ограничена полем $\pm 3\sigma_B$. В спектре $x_{вч}$ в большинстве случаев преобладают обратные частоты чистовой клетки. Это

определяет повышению требования к сборке и настройке ее валковой системы и состоянию шпинделей.

Подпроцесс x_t определяется в основном переходными процессами в непрерывном стане, вызванными прерыванием процесса прокатки при прохождении конца и начала смежных полос через клетки. С этой паузой связана одиночная „волна возмущений” (ВВ) режима прокатки, которая распространяется вдоль линии стана со скоростью прокатки. Она является n -мерной вектор-функцией непрерывного времени t и дискретной координаты i (например, номер клетки). Размерность ее определяется размерностью системы уравнений клетки.

Компьютерное моделирование показало, что площади сечения начального и конечного участков представляют собой соответственно убывающую и возрастающую ступенчатую функции с $2n$ (количество клеток) ступенями. В реальных условиях ступени сглажены. Таким образом, ВВ от прерывания прокатки состоит из двух полуволн достаточно определенной формы, разделенных случайной паузой. Эта относительно высокая определенность ВВ позволяет применить для ее компенсации методы программного управления режимом прокатки, а именно натяжением полосы либо зазором между валками. Закон управления предпочтительно искать в классе кусочно-линейных функций, что обеспечивает оптимальные режимы работы электроприводов. Такой способ управления реализован во внедренной на ряде непрерывных проволочных станов системе программного управления скоростью чистовых клеток. Программное управление устраняет основную часть тренда поперечных размеров проката. Если требуется более высокая точность прокатки, как, например, для мелкого сорта, необходимо применять автоматическую стабилизацию режима прокатки, а именно основной его переменной — натяжения.

Выводы. Разработанные методы анализа процесса функционирования ТЛ были использованы в ряде разработок Института черной металлургии НАНУ, часть из которых упомянуты в докладе. Системный подход к анализу сложных технологических систем, основанный на сформулированном принципе временной декомпозиции, как показал опыт, эффективен для широкого класса сложных металлургических систем.