

О.Н. Кукушкин

**МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ  
РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ**

Технологическая линия (ТЛ) – система рабочих машин и других технологических агрегатов, производящих последовательно в пространстве и взаимосвязано во времени переработку материала из заготовки в готовую продукцию. ТЛ ограничивается складами, т.е. внутри ТЛ склады отсутствуют. Наиболее типичные ТЛ – непрерывные прокатные станы либо сборочные конвейеры автозаводов. ТЛ состоят из участков, разделенных преобразователями потока материала (например, летучими ножницами или буферами небольшой емкости) либо разветвлениями. Например, в черновой группе прокатных клеток параллельно могут прокатывать 2 полосы, а затем каждая из полос прокатывается в отдельных группах чистовых клеток, установленных параллельно.

Одна из важнейших сторон процесса функционирования - процесс восстановлений, образованный чередованием периодов безотказной работы и простоев после отказов машин.

Следуя методологии теории надежности, ТЛ мы представляем как систему элементов расчета надежности, определенным образом соединенных, как правило, последовательно. В качестве элементов можно принимать более или менее крупные комплексы: участки, агрегаты, механизмы, детали. При таком иерархическом построении схемы расчета надежности комплексы промежуточной сложности могут рассматриваться как подсистемы. ТЛ являются восстанавливаемыми системами, как правило, нерезервированными.

Процесс функционирования ТЛ – это альтернирующий процесс восстановления или процесс восстановления с конечным временем восстановления. Этот процесс образован суперпозицией двух потоков случайных событий: потока отказов, заданного последовательностью случайных величин наработок между отказами  $T_{pi}$ , и потока восстановлений (ремонтов), заданного последовательностью случайных ве-

личин времени восстановления  $T_{ei}$  \ после отказов. Поскольку ТЛ являются системами длительного использования, то эти потоки случайных событий являются стационарными и вполне характеризуются математическими ожиданиями случайных величин  $T_{pi}$  и  $T_{ei}$ . Анализ большого объема реального статистического материала показал, что распределение наработок на отказ подчиняется экспоненциальным законам, а времени восстановления – законам Вейбулла-Гнеденко.

Статистическими характеристиками стационарного процесса восстановления с конечным временем восстановления на больших отрезках времени являются

$$\text{наработка на отказ } T_p = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{T_{pk}}} \quad (1)$$

$$\text{среднее время восстановления } T_{\sigma} = T_p \quad (2)$$

$$\text{коэффициент готовности } k_r = \frac{T_p}{T_p + T_b} = \frac{1}{1 + \sum \frac{T_{bk}}{T_{pk}}} \quad (3)$$

Здесь  $T_{pk}$  - наработка на отказ (среднее время безотказной работы каждого  $k$ -го элемента системы, а  $T_{bk}$  - его среднее время восстановления.

Такой набор показателей полностью описывает процесс работы ТЛ с позицией ее надежности.

Конкретизируем некоторые основные определения и показатели стандарта применительно к специфике ТЛ прокатных цехов.

Надежность - свойство ТЛ выполнять заданные функции - производство продукции заданного качества и сортамента в заданном количестве при заданных условиях эксплуатации, в том числе при нормативном техническом обслуживании.

Безотказность - свойство ТЛ непрерывно производить продукцию заданного качества с заданной производительностью в течение некоторого времени ("некоторой наработки" - предпочтительнее). Работоспособное состояние ТЛ - такое состояние, когда она может производить продукцию заданного качества.

Здесь следует подчеркнуть, что при таком определении во множество работоспособных состояний мы включаем и частично работоспособные, связанные с частичными отказами. Уточним, что

полностью (вполне) работоспособная ТЛ может производить продукцию

1 - заданного качества,

2 - всего сортамента (в пределах своей технической характеристики)  $t$

3 - с производительностью, соответствующей технической характеристике .

Частично работоспособная ТЛ может не удовлетворять требованиям 2 и (или) 3, но требование 1 обязательно, поскольку производить некачественную продукцию не только бессмысленно, но и вредно.

Тогда к отказам мы будем относить события, заключающиеся в нарушении работоспособности ТЛ, как полной, так и частичной. Так, например, отказ одной из двух чистовых групп непрерывного мелкосортного стана (рис. 1а) является частичным отказом, т. к. производительность стана уменьшается вдвое, т. е. нарушается условие 3.

Наиболее важным комплексным показателем надежности ТЛ является коэффициент готовности, который является вероятностью того, что в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов простоя, она окажется работоспособной, и определяется он из процесса восстановления . Последняя запись формулы (3) особо важна, поскольку в ней отражается влияние каждого  $k$ -го элемента системы (или вида отказа) на надежность системы в целом . Для удобства обозначим  $T_{vk} / T_{pk} = kPk$  и назовем его удельным простоем  $k$ -го элемента, поскольку он пропорционален относительному времени устранения отказов этого элемента в общем рабочем времени.

Для любого элемента ТЛ достаточно знать два последних показателя и для удобства сравнительного анализа надежности элементов ТЛ вычислить их частное - удельный простой.

Для количественного анализа изменения коэффициента готовности всей линии  $k_g$  при изменении надежности  $k$ -го элемента за счет его усовершенствования, приводящего к повышению безотказности или улучшению ремонтпригодности, найдем полный дифференциал функции (3)

$$dk_r = -\sum_k \frac{1}{\left(1 + \sum_k k_{nk}\right)^2} dk_{nk}$$

Переходя к приращениям и полагая, что изменится  $k_{Пк}$  только одного  $k$ -го агрегата, получим расчетную формулу

$$\Delta k_r = -(k_r)2\Delta k_{Пк}. \quad (4)$$

При уменьшении  $k_{Пк}$  на  $\Delta k_{Пк}$  коэффициент готовности повысится на

$$\Delta k_r / k_r \% = k_r \Delta k_r k 100\% \quad (5)$$

Формулой (5) удобно пользоваться при определении экономической эффективности от модернизации оборудования.

Характеристики надежности для однопоточных ТЛ определяются обычными методами, особенно хорошо разработанными для радиоэлектронной аппаратуры

Для разветвленных ТЛ, в которых имеют место частичные отказы, эта задача готового решения не имеет.

Определим коэффициент готовности таких ТЛ на примере двухниточных непрерывных мелкосортных станков (Рис.1а). Структуру стана нетрудно преобразовать к упрощенной структуре Рис. 1б, где элемент  $q$  представляет собой последовательное соединение участков 1 и 2, а элемент  $r$  - последовательное соединение участков 3 и 4.

Решить эту задачу с помощью известных формул теории надежности невозможно, т.к. они разработаны для полной группы из двух событий { работа, отказ }, а в нашем случае полную группу составляет 3 события: { работа (А), частичный отказ (ЧО), полный отказ (0)}. Частичным отказом является отказ одной из двух ниток стана - левой или правой.

Для решения задачи применим формулу полной вероятности:

$$k_r = P(A/P)P_p + P(A/ЧО)P_{ЧО} + P(A/0)P_0. \quad (6)$$

Здесь  $k_r$  следует понимать как вероятность выполнения планового задания (событие А) станом;  $P(A/P)$ ,  $P(A/ЧО)$  и  $P(A/0)$  являются условными вероятностями события А при появлении событий из полной группы {P, ЧО, 0}.

$P_p$ ,  $P_{ЧО}$ ,  $P_0$  - вероятности появления этих событий.

Очевидно, что  $P(A/P)=1$ ,  $P(A/ЧО)=0,5$ ,  $P(A/0)=0$ .

Обозначив через  $q_q$ ,  $q_r$ ,  $q_{r'}$  вероятности отказов соответствующих элементов, получим

$$P_p = (1 - q_q)(1 - q_r)(1 - q_{r'}) \quad (7)$$

$$P_{\text{чО}} = (1 - q_q)(q_r + q_{r'} - q_r q_{r'}) \quad (8)$$

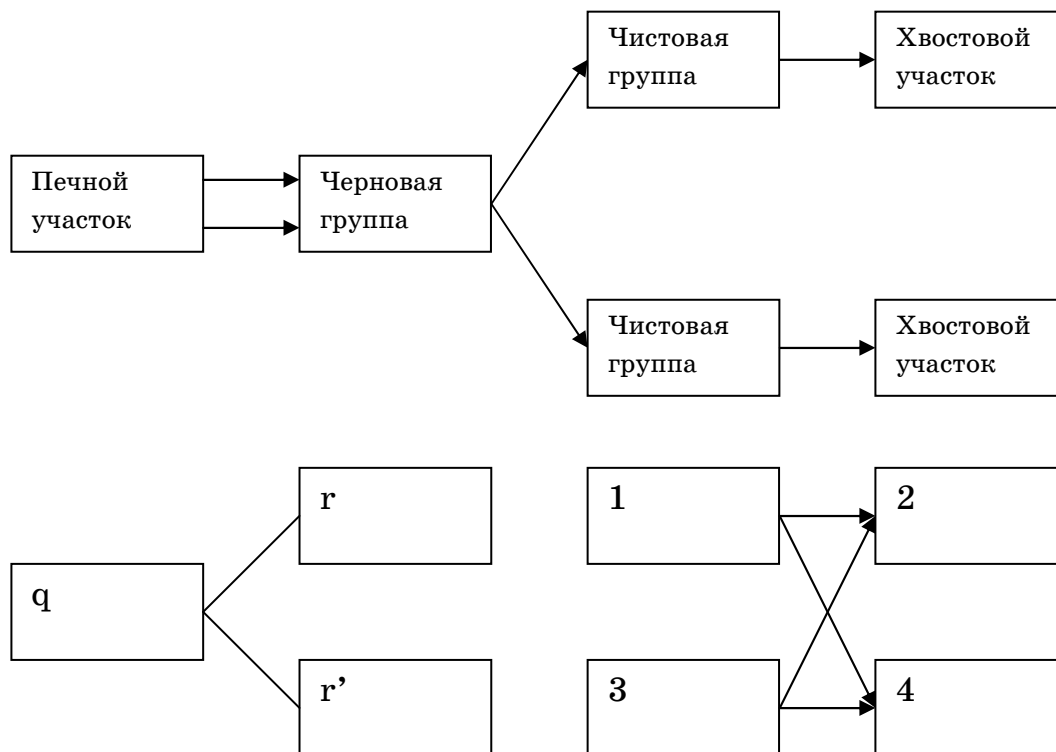


Рисунок 1 - Расчетные схемы непрерывного двухниточного стана

Вероятность отказа  $k$ -го элемента

$$q_k = \frac{T_{Bk}}{T'_{Pk}} = \frac{T_{Bk}}{T_{Pk}/k_r} = k_{\text{ПК}} k_r \quad (9)$$

где  $T'_{Pk}$  - среднее время между отказами  $k$ -го участка.

Учитывая идентичность параллельных участков  $q_r \equiv q_{r'}$ . подставим условные вероятности, (7)-(9) в (6) и пренебрегая слагаемыми с произведениями  $q_k$  ввиду их малости, получим

$$k_r = \frac{1}{1 + k_q + k_r}$$

что аналогично формуле (4.3).

Таким образом, структуру рис. 1б можно заменить последовательным соединением участков  $q$  и  $r$ . Отсюда следует важный вывод о том, что разветвления технологической линии непрерывного стана не изменяют его надежности и их нельзя рассматривать как резервирование. Независимо от структуры, коэффициент готовности и.

непрерывного стана следует определять по формуле (4.3). Этот вывод распространяется и на более разветвленные ТЛ, например, на четырехниточные непрерывные проволочные станы (рис. 1.6).

В разветвленных ТЛ, например, в двухниточных мелкосортных станах (рис. 1.5,б,в) повысить надежность можно путем изменения структуры стана в случае одновременного отказа различных участков обеих ниток. На стане типа В для этой цели установлены переключательные стрелки после черновой и чистовых групп.

Структуру двухниточного прокатного стана со стрелками можно привести к структуре рис. 4.4,в, где элементы 1 и 3 обозначают последовательное соединение, в смысле надежности, агрегатов левой и правой ниток до стрелки, а элементы 2 и 4 - после стрелки.

Определим количественно увеличение надежности стана со стрелкой  $\hat{131U}$ , принимая допущение, что переключение стрелки происходит мгновенно и надежно. Тогда в состояние стана {частичный отказ} переводятся состояния с одновременно отказавшими разноименными участками, вероятность которых

$$\Delta p = q_1 q_4 + q_3 q_2 = 2q_1 q_2$$

в силу идентичности параллельных участков.

Таким образом, кг стана изменится на величину второго порядка малости, которая с учетом (4.14) равна

$$\Delta k_r = 0,5\Delta p = k_r^2 k_{\text{III}} k_{\text{II2}} \quad (10)$$

Приращение коэффициента готовности стана типа В для случая стрелки за черновой группой, вычисленное для реальных параметров надежности, приведенных в подразделе 4.4, по формуле (4.15), равно  $\Delta k_r = 0,002$ . Приращение коэффициента готовности при использовании стрелок за чистовыми группами равно  $\Delta k_r = 0,003$ .

Поскольку приращение  $\Delta k_r$  и  $\Delta U_r$  значительно меньше коэффициента готовности стана без стрелок  $U_r = 0,842$ , их можно считать независимыми. Тогда суммарный эффект от применения двух стрелок равен  $\Delta k_r = \Delta k_r + \Delta U_r = 0,005$ .

Результаты аналитических расчетов эффективности применения стрелок были проверены путем статистического моделирования.

**Вывод.** Полученные аналитические зависимости и расчетные формулы удобны для расчетов надежности и экономичности инновационных решений для широкого класса технологических линий.