

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Бондарук А.М., Гимаев А.Р., Гоц С.С., Ямалетдинова К.Ш.

Башкирский государственный университет

e-mail: Zvezda404@yandex.ru

Одним из путей стимулирования повышения надежности на этапе проектирования и производства технологического оборудования является включение в стоимость оборудования затрат на его гарантийное обслуживание и ремонт на возможно длительный срок эксплуатации, с учетом конкретных условий, в которых будет работать технологическое оборудование. Организационно-экономические методы на этапе эксплуатации и технического обслуживания технологического оборудования заключаются в разработке эксплуатационного обеспечения, правильной установке и подключению оборудования, обучению персонала навыкам работы с новым оборудованием, количественной оценке оптимальных сроков и объемов проведения регламентных работ.

Ключевые слова: технологическое оборудование, организационно-экономические методы, высокая эффективность промышленного производства, надежность оборудования

Высокая надежность технологического оборудования является одним из основных факторов обеспечения высокой эффективности промышленного производства. Любой отказ в работе технологического оборудования приводит к возникновению потерь, связанных как со стоимостью недополученной продукции, так и с дополнительными затратами на восстановление оборудования и устранение всех последствий его остановки. В связи с этим легко проследить связь между надежностью технологического оборудования и экономическими аспектами его использования [1].

Можно выделить следующие направления повышения надежности технологического оборудования:

1. Организационно-экономические методы повышения надежности на этапе проектирования и производства технологического оборудования;
2. Структурно-функциональные методы организации и технического обеспечения технологических процессов;
3. Конструктивные методы повышения технического уровня оборудования;
4. Организационно-экономические методы на этапе эксплуатации и технического обслуживания технологического оборудования [2].

Организационно-экономические методы повышения надежности. Одним из путей стимулирования повышения надежности на этапе проектирования и производства технологического оборудования является включение в стоимость оборудования затрат на его гарантийное обслуживание и ремонт на возможно длительный срок эксплуатации. В этом случае разработчики и проектировщики заинтересованы в получении точных оценок потенциальной надежности и долговечности оборудования, а производители оборудования заинтересованы в повышении качества выпускаемой продукции. Важным фактором повышения надежности оборудования является учет при проектировании конкретных условий, в которых будет работать технологическое оборудование. Обычно учитываются следующие эксплуатационные факторы, влияющие на надежность оборудования:

1. Рабочие условия. Необходимо учитывать наличие агрессивной химической среды, сильные вибрации, ударные воздействия, наличие радиации, электромагнитные воздействия, стандарты и качество электропитания, водоснабжения, канализации, вентиляции, химических реагентов и т.п. Особенно актуально в условиях России при покупке импортного оборудования учитывать российские стандарты электропитания и электромагнитной совместимости

2. Климатические условия (температура, влажность, загрязненность воздуха химическими веществами и т.п.). При покупке импортного оборудования необходимо учитывать суровые местные климатические условия. В частности, известно, что в северных нефтегазодобывающих регионах нашей страны оказывается непригодным для эксплуатации на открытом воздухе импортное оборудование систем автоматического регулирования и управления.

3. Биологические факторы (насекомые, грызуны, плесень, грибки и т.п.). Важно иметь в виду, что часть биологических факторов, отсутствующих на данный момент в нашей стране, могут быть привезены в нашу страну вместе с импортным оборудованием (колорадский жук, тараканы из США и т.п.) [3].

Структурно-функциональные методы повышения надежности включают в себя использование таких схем построения технологических процессов, при которых отказ в работе отдельных элементов не нарушает функционирование технологического процесса. Это достигается за счет избыточности аппаратных, программных и информационных средств, использования аппаратных и программ-

ных средств оперативного обнаружения неисправностей и компенсации последствий отказов отдельных элементов. Согласно ГОСТ 13377-75 [12] существует три вида резервирования: структурное, информационное, временное.

Конструктивные методы повышения технического уровня оборудования включают в себя оптимальный подбор элементов, выбор оптимальных режимов работы элементов, облегчение диагностики обнаружения неисправностей, сокращение времени и повышение удобства их устранения.

Организационно-экономические методы на этапе эксплуатации и технического обслуживания технологического оборудования заключаются в разработке эксплуатационного обеспечения, правильной установке и подключению оборудования, обучению персонала навыкам работы с новым оборудованием, количественной оценке оптимальных сроков и объемов проведения регламентных работ. На все поставляемое технологическое оборудование должна быть подготовлена сопроводительная документация по техническому обслуживанию, правилам эксплуатации, правилам проведения настройки, регулировки и поверки как всего оборудования в целом, так и отдельных составляющих [4].

Для количественной оценки возможных потерь из-за отказа в работе технологического оборудования вводят показатель средних потерь \bar{w} в единицу времени. Пусть технологическая система имеет одно основное 0 -е работоспособное состояние и n неработоспособных состояний (см. рис. 1). Вероятность нахождения технологической системы в работоспособном состоянии

$$h_0 = q_0 = K_{ГС} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов, приводящих к i -му неработоспособному состоянию;

μ_i – интенсивность восстановления из i -го неработоспособного состояния;

Вероятность нахождения в каждом из n неработоспособных состояний может быть определена по следующей формуле

$$h_i = q_i = h_0 \cdot \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (2)$$

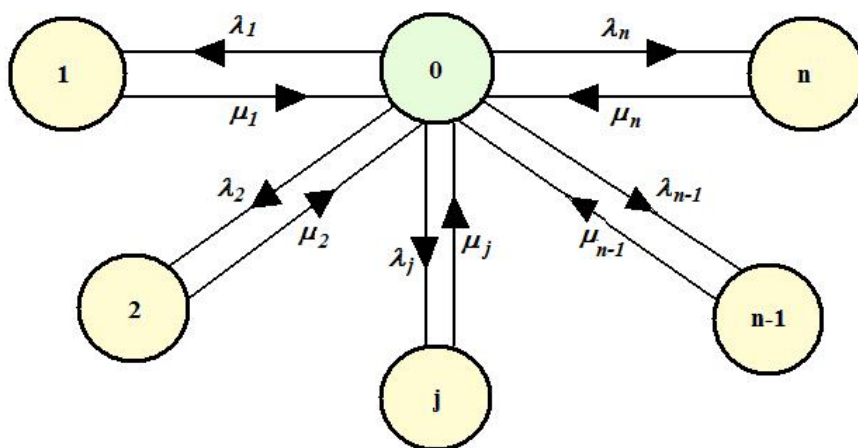


Рисунок 1. Графы перехода в различные состояния технологической установки в результате ее отказов и восстановлений [5]

Пусть $\bar{\vartheta}_0$ – средний выходной эффект в единицу времени идеальной абсолютно надежной безотказной в работе технологической системы, а $\bar{\vartheta}_i$ – средние потери выходного эффекта в единицу времени при нахождении технологической системы в i -м неработоспособном состоянии, h_i – вероятность нахождения системы в i -м состоянии.

В этом случае показатель средних потерь можно определить как математическое ожидание от средних потерь выходного эффекта

$$\bar{w} = \bar{\vartheta}_0 - \sum_{i=0}^n \bar{\vartheta}_i \cdot h_i. \quad (3)$$

Иногда вместо абсолютных вводят относительные потери из-за отказа в работе технологического оборудования

$$\frac{\bar{w}}{\bar{\vartheta}_0} = 1 - \sum_{i=0}^n \frac{\bar{\vartheta}_i}{\bar{\vartheta}_0} \cdot h_i. \quad (4)$$

В предположении об экспоненциальном законе отказов и восстановлений для аналитического расчета вероятностных характеристик отказов оборудования может быть использован метод решения системы связанных дифференциальных уравнений. Для каждого перехода из 0 -го работоспособного состояния в одно из n неработоспособных состояний может быть записано дифференциальное уравнение Колмогорова для вероятности.

В результате получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dq_1(t)}{dt} = \lambda_1 \cdot q_0(t) - \mu_1 \cdot q_1(t) \\ \frac{dq_2(t)}{dt} = \lambda_2 \cdot q_0(t) - \mu_2 \cdot q_2(t) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dq_n(t)}{dt} = \lambda_n \cdot q_0(t) - \mu_n \cdot q_n(t) \end{cases} \quad (5)$$

В научно-технической литературе [2] уравнения (5) получили название уравнений рождения и гибели. Рождение связано с процессами восстановления работоспособности технологической системы, а гибель связана с процессами отказа оборудования [6].

Для решения системы уравнений дополнительно к (5) запишем уравнение нормировки для суммы вероятностей нахождения системы во всех возможных состояниях:

$$\sum_{i=0}^n q_i(t) = 1 \quad (6)$$

В установившемся стационарном режиме работы уравнения (5) могут быть переписаны следующим образом

$$\begin{cases} \lambda_1 \cdot q_0(t) - \mu_1 \cdot q_1(t) = 0 \\ \lambda_2 \cdot q_0(t) - \mu_2 \cdot q_2(t) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \lambda_n \cdot q_0(t) - \mu_n \cdot q_n(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Решая (6) и (7), получаем

$$\begin{aligned} q_0 \times \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} &= \sum_{j=1}^n q_j = 1 - q_0 ; \\ q_0(t) &= \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \end{aligned} \quad (8)$$

Введем в рассмотрение коэффициент готовности K_G , характеризующий среднюю вероятность $q_0(t)$ того, что технологическое оборудование находится в работоспособном состоянии. Коэффициент готовности K_G численно равен отношению среднего времени нахождения в рабочем состоянии к сумме среднего времени

нахождения в рабочем состоянии и эквивалентного среднего времени восстановления

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + \alpha \cdot T_B} \quad (9)$$

где T_0 – среднее время наработки на отказ, T_B – среднее время восстановления после поломки, α – коэффициент соответствия времени восстановления и времени наработки на отказ. В дальнейшем будем предполагать, что после возникновения каждого отказа оборудование немедленно начинают ремонтировать, а после успешного завершения каждого ремонта оборудование немедленно вводится в эксплуатацию. В этом случае коэффициент $\alpha = 1$.

Пользуясь полученным выражением (8), имеем для коэффициента готовности

$$K_{\Gamma} = q_0(t) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (10)$$

Свяжем каждое изображенное на рис. 1 состояние с l -го по n -ое с неисправностью только одного элемента технологической линии. Найдем с помощью (10) при $n=1$ коэффициент готовности одного j -го элемента

$$K_{\Gamma j} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_j}{\mu_j}} = \frac{\mu_j}{\mu_j + \lambda_j} \quad (11)$$

$$\frac{\lambda_j}{\mu_j} = \frac{1}{K_{\Gamma j}} - 1 \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10), имеем

$$K_{\Gamma} = q_0(t) = \frac{1}{1 - n + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\Gamma i}}} \quad (13)$$

Рассмотрим следующий численный пример. Пусть технологическая линия состоит из трех последовательно соединенных элементов, для которых заданы коэффициенты готовности: $K_{\Gamma 1} = 0,6$; $K_{\Gamma 2} = 0,7$; $K_{\Gamma 3} = 0,8$. Подставляем эти значения в (13), имеем для коэффициента готовности технологической линии [6]:

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{1 - 3 + \frac{1}{0,6} + \frac{1}{0,7} + \frac{1}{0,8}} = 0,426 \quad (14)$$

Наряду с коэффициентом готовности в технических приложениях часто применяется коэффициент технического использования $K_{ТИ}$, который численно равен отношению суммарного времени наработки оборудования к общей величине суммарного времени наработки, суммарного времени ремонта и суммарного времени обслуживания:

$$K_{ТИ} = \frac{T_{Сумм}}{T_{Сумм} + \alpha \cdot T_{Рем} + \alpha \cdot T_{Обсл}} \quad (15)$$

где $T_{Сумм}$ – суммарное время наработки оборудования, $T_{Рем}$ – суммарное время ремонта оборудования, $T_{Обсл}$ – суммарное время обслуживания оборудования, α – коэффициент соответствия между временем работы, ремонта и обслуживания. Коэффициент технического использования определяется отношением математического ожидания времени нахождения оборудования в работоспособном состоянии к сумме математических ожиданий времени нахождения оборудования в работоспособном состоянии, времени ремонта и времени технического обслуживания [7].

На величину коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ оказывает непосредственное влияние стратегия выбора сроков технического обслуживания и ремонта. Возможны три различных варианта подхода к выбору сроков проведения технического обслуживания и ремонта:

1. Календарный принцип (например, раз в год), при котором не учитывается фактическое техническое состояние и общая продолжительность фактической работы оборудования. Этот подход удобен с точки зрения планирования фактической занятости обслуживающего персонала.

2. По выработке межремонтного ресурса оборудования. Этот подход целесообразен при повышенных требованиях к надежности и безопасности оборудования, например, в авиации.

3. По фактическому техническому состоянию исправности или работоспособности оборудования. Этот подход экономически наиболее целесообразен с точки зрения затрат на эксплуатацию оборудования [8].

В теоретических расчетах надежности чаще всего придерживаются третьего по счету подхода к выбору сроков ремонта по фактическому техническому состоянию и работоспособности оборудования. Руководствуясь этим принципом,

рассчитаем время наработки до отказа обслуживаемых технологических линий с $m-1$ - кратным горячим резервированием и восстановлением. Будем полагать, что осуществляется немедленное восстановление каждой отказавшей цепи и немедленный ввод в эксплуатацию каждой отремонтированной линии. Формула среднего времени наработки до отказа для оборудования с восстановлением [5]:

$$T_{\text{общ}}^{\text{нагр}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right)^i}{(i+1)} = T_0 \cdot \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right)^{i+1}}{(i+1)}, \quad (16)$$

где μ – интенсивность восстановления, λ – интенсивность отказов оборудования, T_0 – наработка до отказа без резервирования и восстановления. Из соотношения (16) видно, что для обслуживаемой системы с нагруженным «горячим» $(m-1)$ -кратным резервированием и восстановлением с ростом отношения интенсивности восстановления к интенсивности отказов μ/λ время наработки до отказа асимптотически стремится к степенному закону возрастания с показателем степени $m-1$.

Введем в рассмотрение коэффициент, характеризующий кратность увеличения времени наработки до отказа за счет восстановления

$$B(m, \mu, \lambda) = T_{\text{общ}}^{\text{нагр}} / T_0 = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\left(1 + \frac{\mu}{\lambda}\right)^{i+1}}{(i+1)}. \quad (17)$$

На рис. 2 изображены рассчитанные на ЭВМ графики увеличения времени наработки до отказа $B(m, \lambda, \mu)$ для резервированной обслуживаемой системы с восстановлением по отношению ко времени наработки до отказа для невосстанавливаемого оборудования без резервирования. Из рис. 2 видно, что коэффициент $B(m, \lambda, \mu)$, а вместе с ним и надежность возрастают как с ростом отношения интенсивности восстановления к интенсивности отказов μ/λ , так и с ростом общего числа работающих основных и резервных технологических линий m .

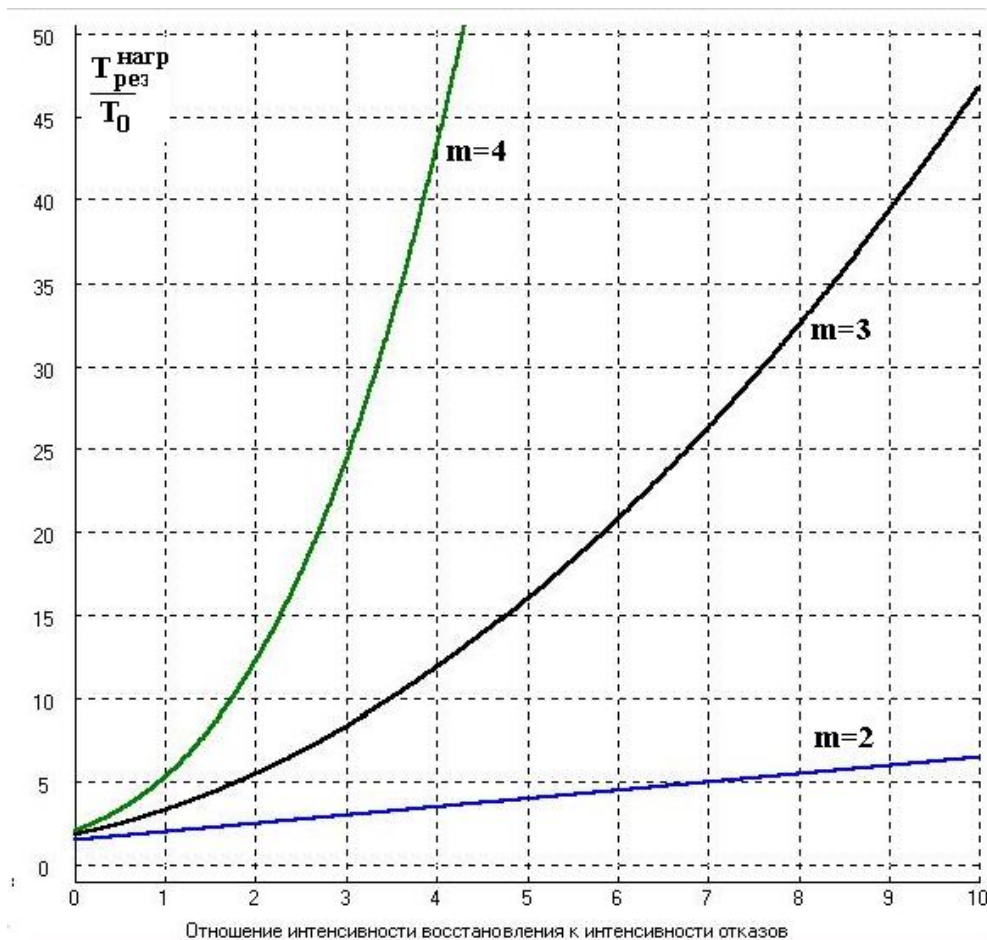


Рисунок 2. Изменение времени наработки до отказа обслуживаемого технологического оборудования с восстановлением и горячим $(m-1)$ -кратным резервированием в зависимости от отношения интенсивности восстановления к интенсивности отказов. (для трех различных значений кратности резервирования)

С чисто экономической точки зрения значительное увеличение отношения μ/λ интенсивности восстановления к интенсивности отказов нецелесообразно, поскольку это мероприятие требует существенного увеличения численности обслуживающего персонала и численности работников в ремонтных бригадах. При этом необходимо отметить, что в силу случайного характера отказов оборудования работники ремонтных бригад будут загружены работой неравномерно и не полностью, что, несомненно, отразится на суммарных производственных затратах и общей эффективности производства.

Литература

1. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К.Беляев, В.А.Богатырев, В.В.Болотин и др.; Под ред. И.А.Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с
2. Надежность и эффективность в технике. справочник в 10 т. Ред. совет В.С. Авдуевский (пред.) и др. Т. 1. Методология. Организация. Терминология. Под. ред. А.И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
3. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Ред. совет В.С. Авдуевский (пред.) и др. Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / Под. ред. Б.В.Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
4. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1975. 472 с.
5. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие. – Под ред. Колемаева В.А. – М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
6. Статистический словарь. / Гл. ред. М.А. Королев. – М.: Финансы и статистика, 1989. 683 с.
7. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. – М.: Наука, 1982. 296 с.
8. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 376 с.