

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

УДК 621.01:669.02/.09.002.5

А.Н. Савельев, С.С. Северьянов, А.В. Савельева

Сибирский государственный индустриальный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ МНЛЗ КАК СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Непрерывные технологические линии не могут рационально эксплуатироваться, если хотя бы один из входящих в них агрегатов имеет низкую несинхронизированную с остальными агрегатами эксплуатационную надежность. Над повышением таких показателей надежности, как безотказность, долговечность и ремонтопригодность элементов технологических линий эксплуатирующий их персонал работает непрерывно и целенаправленно весь период их существования. К концу срока эксплуатации технологические линии приобретают наиболее устойчивые в условиях тех возможностей, которые создает объективная реальность, эксплуатационные свойства. Важно знать, каких показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности добиваются службы завода к завершающей стадии существования линий как сложных технических систем. Интерес к тому, какими становятся показатели агрегатов к финальной стадии их существования, связан с тем, что каждая технологическая система, являясь после проектирования и изготовления продуктом деятельности одной ограниченной группы людей со своими собственными представлениями об устройстве таких систем, попадает в новые, выработанные в результате долгого эволюционного процесса, социально-природные условия. Ясно, что человек, продуцируя сложные технические системы, стремится как можно точнее учесть тенденции и ограничения этой среды. Однако проблема заключается в том, что человек недостаточно полно владеет основополагающими законами распределения и сочетания элементов в сложных технических системах, в силу чего далеко не все технические изделия получаются сразу работоспособными. Выявление характера распределения показателей надежности между агрегатами технологической линии в связи с этим представляет значительный не только практический, но и теоретический интерес.

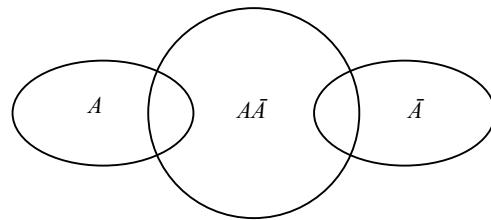


Рис. 1. Разложение одного из уровней сложной технической системы на группы входящих в систему элементов:

A – группа элементов с качественным показателем A ;
 \bar{A} – группа элементов с показателем качества не A ;
 \tilde{A} – группа элементов со средним показателем качества
 A – не A

Проанализируем характер распределения срока службы до отказа агрегатов технологической линий машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) фирмы "УЗТМ" после 26 лет ее эксплуатации в условиях ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЗСМК), оценим возможность использования для описания распределения показателей надежности агрегатов МНЛЗ модели сложных технических систем, разработанные в теории формирования сложных технических систем [1 – 7].

Как известно, анализ начинается с декомпозиции сложной системы. Согласно теории формирования сложных технических систем [1 – 5] процесс декомпозиции реализуется путем многократного разложения элементов того или иного уровня сложности системы по качественному параметру на три составляющие данный уровень группы. Для рассматриваемого уровня сложности первая и третья группа агрегатов содержат противоположные по качественному параметру элементы, а вторая группа включает агрегаты, которые обладают одновременно свойствами агрегатов первой и третьей групп (рис. 1). В результате такого разложения получаются три различные по качественному составу группы агрегатов. Каждая из этих групп элементов сама может являться сложной системой, она также может

быть разложена на три составляющие ее подгруппы. Подобных разложений может быть такое количество, которое приводит к уровню сложности, необходимому в каждой конкретной ситуации [2, 3].

Опираясь на такое представление о структуре одного из уровней сложной технической системы и выделяя качество, в результате которого тот или иной вид оборудования используется в данной технологической линии, выполним декомпозицию технологической линии МНЛЗ. Особенностью этой технологической линии является то, что ее агрегаты работают с металлом, который в процессе движения по МНЛЗ находится в различных физических фазах. В связи с этим тот или иной агрегат линии приспособлен выполнять свои функции в различных технологических условиях. Соответственно режимы и характеристики эксплуатации агрегатов различны, со своими особенностями в зависимости от того, к какой группе они относятся. Так, первая группа включает агрегаты, работающие с жидким металлом (рис. 2). Все входящие в эту группу агрегаты обладают качеством обеспечивать технологические операции в температурных условиях, соответствующих температуре жидкого металла, осуществлять необходимое перемещение жидкой среды и, в силу этого, не имеют возможности допускать внеплановых остановок. Третья группа агрегатов работает уже с твердым металлом, испытывает воздействие твердой среды и должна в связи с этим обладать соответствующим набором технических пара-

метров. Качественные показатели второй группы агрегатов, работающих с затвердевающим металлом, должна обладать рядом параметров, соответствующих как первой, так и третьей группе агрегатов. Исходя из вышесказанного, к первой группе агрегатов нужно отнести подъемно-поворотный стенд и промежуточный ковш (рис. 2). Вторая группа агрегатов будет состоять из агрегатов, формирующих твердую заготовку: кристаллизатор с механизмом его качания; секции вторичного охлаждения; установку четырехвалковых клетей; секцию поддерживающих роликов; установку клетей. Третья группа агрегатов включает: секцию тянуще-правильных клетей; рольганг до машины газовой резки (МГР) заготовки; машину газовой резки; рольганг после машины газовой резки; спаренный рольганг; ряд других агрегатов. Выполненная таким образом декомпозиция позволяет не только определить показатели надежности входящих в ту или иную группу агрегатов, но и сравнить эксплуатационные показатели входящих в группу агрегатов между собой, а также сравнить показатели эксплуатационной надежности каждой из групп.

Для определения количественных показателей надежности агрегатов МНЛЗ был собран статистический материал, характеризующий особенности их эксплуатации. Для этого при обработке цеховой документации об отказах технологической линии МНЛЗ сформирована выборка продолжительности службы агрегатов от отказа до отказа за 15 лет эксплуатации

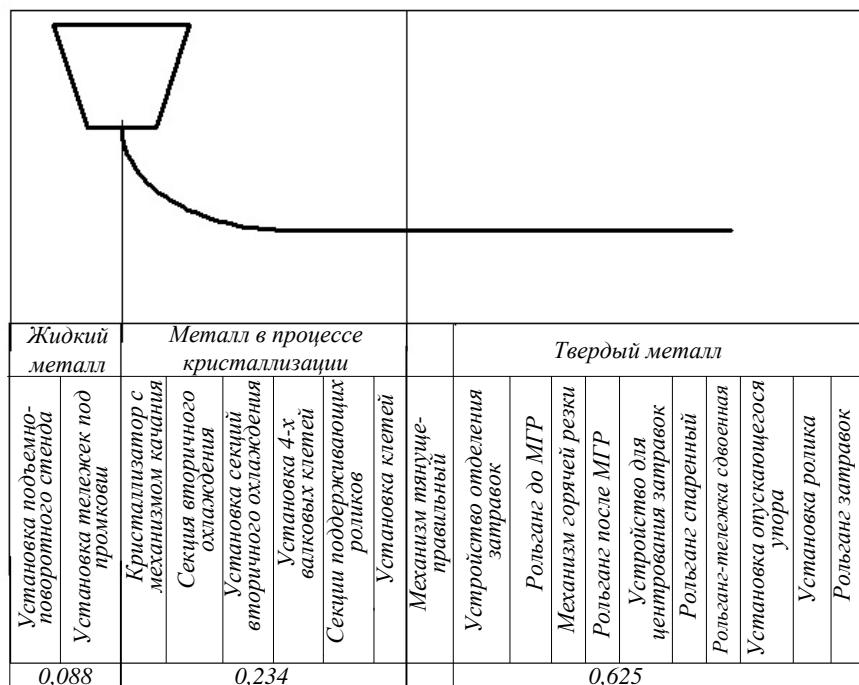


Рис. 2. Последовательность расположения агрегатов в технологической линии МНЛЗ

(2001 – 2015 гг.). При анализе статистического материала о сроках службы каждого из рассматриваемых агрегатов технологической линии получены распределения частоты встречаемости сроков службы, распределение плотности вероятности сроков службы каждого из агрегатов, кривая вероятности отказов агрегатов, математическое ожидание срока службы и дисперсия сроков службы агрегатов. Статистические данные и вероятностные модели по каждому из агрегатов технологической линии, входящие в ту или иную группу агрегатов сложной системы, приведены на рис. 3.

Все приведенные данные (рис. 3) касаются только отдельных агрегатов, а в технологической линии как сложной технической системе все агрегаты по условиям их эксплуатации объединены в группы. Для организации рациональной эксплуатации технологической линии важно знать характеристики надежности каждой из этих групп оборудования. Для того, чтобы можно было использовать полученные вероятностные данные оборудования для формирования режимов эксплуатации каждой из групп агрегатов технологических линий, необходимо обладать моделями характеристик надежности групп агрегатов, входящих в каждую из трех ниш этой технологической линии. Для этого, прежде всего, нужно определиться с качественным параметром этих групп. Известно, что каждый объект технической системы обладает большим количеством свойств. В рассматриваемом случае для технологической линии МНЛЗ способность группы работающих в идентичных условиях агрегатов длительное время выполнять свои функции без отказов является одним из доминирующих свойств, то есть качеством. Следовательно, качественным параметром x в этом случае является продолжительность (t) службы данной группы элементов. Плотность (p) вероятности реализации параметра x несет еще одну смысловую нагрузку: с одной стороны, эта величина является вероятностной характеристикой сроков службы группы агрегатов, а с другой – рассматривается как количественная характеристика качественного параметра x каждой группы агрегатов. Опираясь на основы формирования сложных технических систем, в работах [4, 7] показано, что в группе (нише) A (рис. 2) распределение агрегатов по качественному параметру $x = A$ подчиняется нормальному закону распределения вида

$$P(x) = \begin{cases} \frac{0,023}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/(2\sigma^2)} & \text{при } 0 \leq x \leq 0,088; \\ 0 & \text{при } x \geq 0,088, \end{cases}$$

где x – срок службы в относительных величинах; $m = 0,044$ – математическое ожидание качественной характеристики агрегатов, входящих в нишу A ; $\sigma = 0,015$ – дисперсия.

Плотность распределения качественного параметра оборудования, входящего во вторую нишу (или нишу $A\bar{A}$), отвечает закону Коши вида

$$p(x) = \begin{cases} \frac{k^2}{\pi(1+(x-d)c)^2} & \text{при } 0,088 \leq x \leq 0,322; \\ 0 & \text{при } x \geq 0,322, \end{cases}$$

где $d = 0,088$ – сдвиг по оси абсцисс; $c = 10,6048$ – сжатие кривой плотности вероятности по оси абсцисс; $k_2 = 0,73$.

Закон распределения качественного параметра элементов в третьей нише сложной системы представлен в работе [7] в виде распределения Н.М. Смирнова:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{a}{\sqrt{2\pi}}(x-s)qe^{f(x-s)q} & \text{при } 0,322 \leq x \leq 0,947; \\ 0 & \text{при } x \geq 0,947, \end{cases}$$

где $a = 0,190$ и $q = 4/914$ – коэффициенты, определяющие параметры функции по осям x и y ; $s = 0,322$.

Возможность использовать рассмотренную модель в качестве модели распределения параметров надежности группы агрегатов технологической линии МНЛЗ оценивали путем ее сравнения со статистическими данными сроков службы агрегатов соответствующих групп A , \bar{A} и $A\bar{A}$. Сравнение модели со статистическими данными оценивали по критерию Колмогорова [K]. На рисунке 4, *a* приведены результаты сравнения теоретических и статистических распределений сроков службы всех агрегатов технологической линии МНЛЗ: для первой ниши $K_A = 0,04764$, допустимое значение критерия $[K_A] = 0,29577$; для второй ниши $K_{A\bar{A}} = 0,04998$, $[K_{A\bar{A}}] = 0,39201$; для третьей ниши $K_{\bar{A}} = 0,01721$, $[K_{\bar{A}}] = 0,26588$. На рис. 4, *б* показана степень совпадения распределения плотности вероятности сроков службы агрегатов, вошедших в первую группу. Критерий совпадения модели со статистическими данными $K_A = 0,02331$, что меньше допустимого его значения $[K_A] = 0,13464$. Это дает возможность использовать данную модель применительно к описанию первой группы агрегатов МНЛЗ. На рис. 4, *в* приведено сравнение теоретического и статистического распределений сроков службы агрегатов, вошедших во вторую группу сложной технической системы в

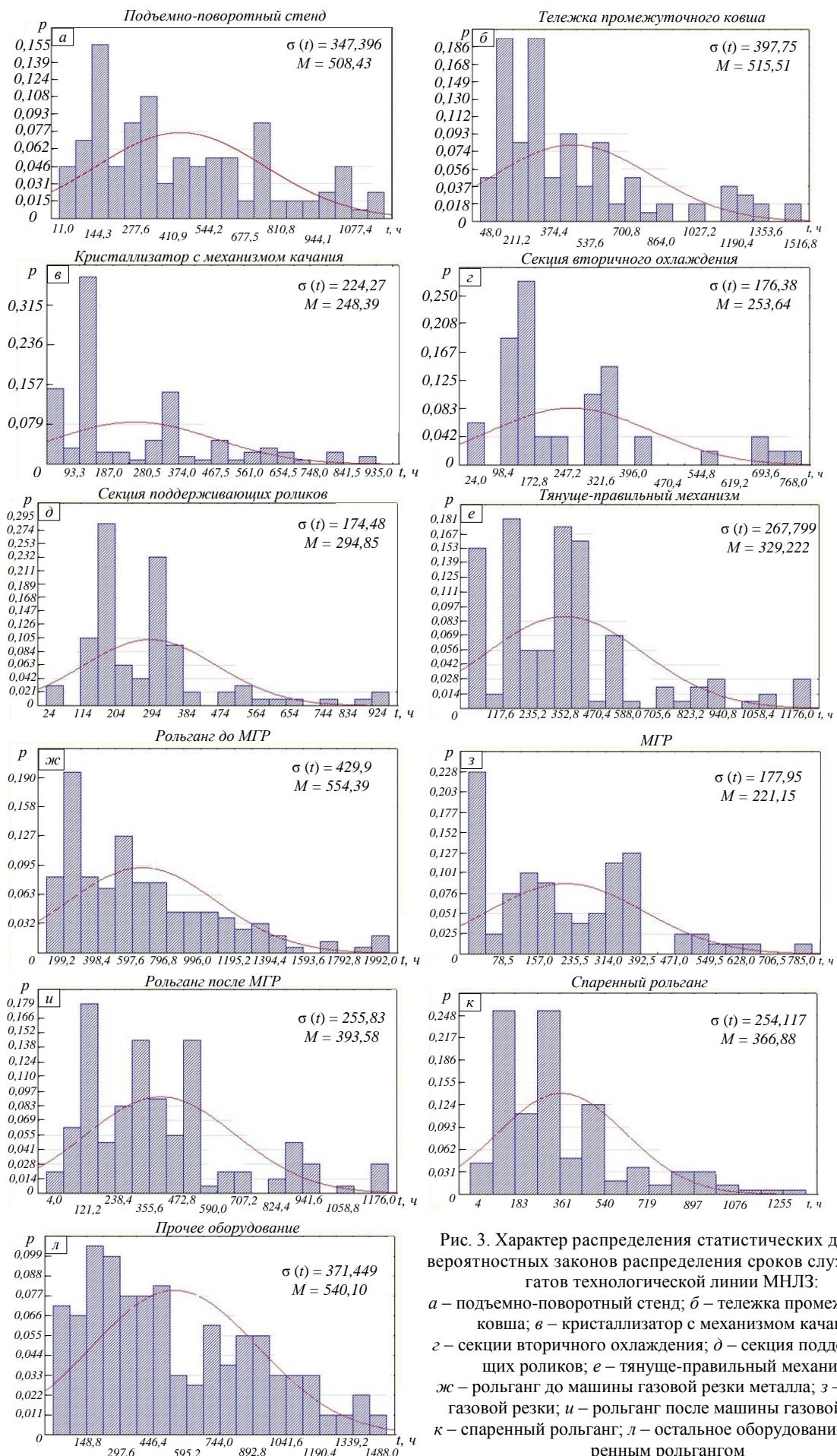


Рис. 3. Характер распределения статистических данных и вероятностных законов распределения сроков службы агрегатов технологической линии МНЛЗ:
 а – подъемно-поворотный стенд; б – тележка промежуточного ковша; в – кристаллизатор с механизмом качания; г – секция вторичного охлаждения; д – секция поддерживающих роликов; е – тянуще-правильный механизм; ж – рольганг до машины газовой резки металла; з – машина газовой резки; и – рольганг после машины газовой резки; к – спаренный рольганг; л – остальное оборудование за спаренным рольгангом

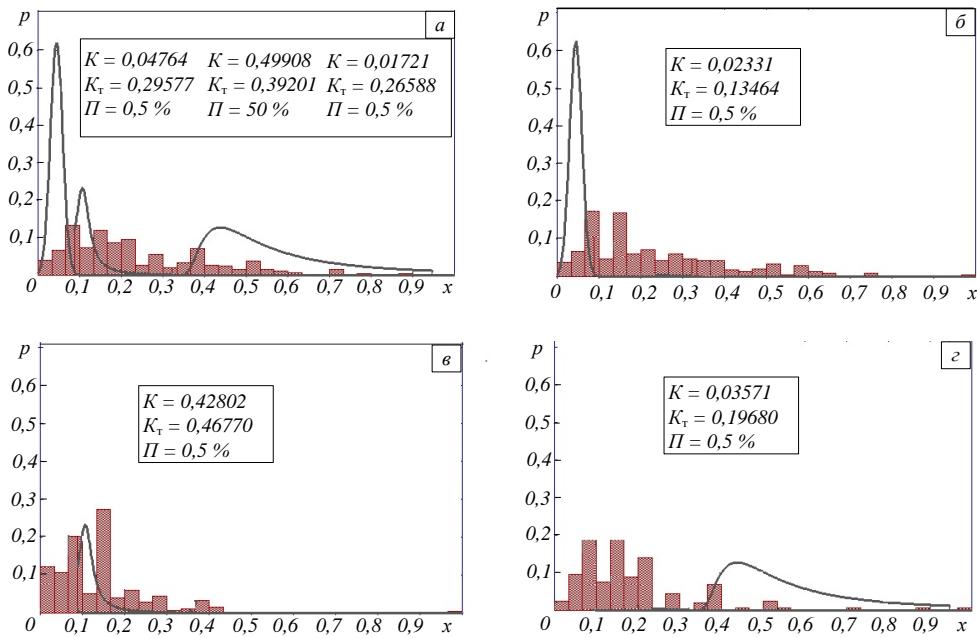


Рис. 4. Распределение продолжительности безотказной работы групп агрегатов технологической линии МНЛЗ:
 а – агрегатов всех трех групп технологической линии; б – агрегатов, работающих с жидким металлом; в – агрегатов, работающих с затвердевающим металлом; г – агрегатов, работающих с твердым металлом

виде технологической линии МНЛЗ: $K_{AA} = 0,42802$, что меньше допустимого его значения $[K_{AA}] = 0,46770$. На рис. 4, г показана совпадающаяность распределения плотности вероятности сроков службы агрегатов, вошедших в третью группу агрегатов технологической линии: $K_A = 0,03571$ меньше допустимого значения $[K_A] = 0,19680$. Это дает возможность использовать рассматриваемую модель распределения сроков службы агрегатов, работающих с твердым металлом, для описания условий работы данной части МНЛЗ.

Выводы. Из результатов оценки возможности использования модели распределения плотности вероятности сроков службы не только самих агрегатов, но и разных групп агрегатов технологической линии МНЛЗ следует, что у самих агрегатов наблюдается преимущественно нормальный закон распределения сроков службы до очередного момента выхода их из строя с вполне конкретным математическим ожиданием и дисперсией. Группа агрегатов, работающих с жидким металлом, хорошо описывается нормальным законом распределения сроков их службы с относительной величиной математического ожидания сроков службы всей группы $A = 0,44$. Группа агрегатов, работающих с затвердевающим металлом, может быть описана усеченным законом Коши с относительной величиной математического ожидания $A\bar{A} = 0,205$. Распределение продолжительности службы агрегатов, работающих с затвердевшим металлом, может быть представлено в виде закона распределения

ния плотности вероятности срока службы агрегатов от отказа до отказа Н.М. Смирнова. Использование полученных в настоящей работе результатов при создании новых МНЛЗ или при доводке уже существующих технологических линий позволит сократить сроки их доводки до стабильно функционирующего состояния, снизить степень необходимости модернизации уже действующих агрегатов и позволит улучшить условия реализации всех операций, связанных с планированием режимов обслуживания и ремонта этих технологических линий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Савельев А.Н. О методологических основах проектирования надежного технологического оборудования // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 6. С. 22 – 26.
- Савельев А.Н. Проектирование гомеостазных прокатных комплексов // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 78 – 82.
- Савельев А.Н. Структурные особенности устойчиво функционирующей сложной технической системы // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 12. С. 53 – 58.
- Савельев А.Н. Математическое описание внутренних процессов формирования сложных технических систем // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 52 – 56.
- Савельев А.Н. Особенности формирования работоспособных технологических

- систем // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 69 – 75.
6. Савельев А.Н., Тимошенков Ю.Г., Бич Т.А. Оценка показателей безотказности и ремонтопригодности агрегатов устойчиво работающей технологической линии МНЛЗ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2006. № 6. С. 57 – 60.
7. Савельев А.Н., Тимошенков Ю.Г., Бич Т.А. Идентификация модели распределения элементов в сложной технической системе // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 6. С. 64 – 67.

© 2016 г. А.Н. Савельев,
С.С. Северянов, А.В. Савельева
Поступила 01 июня 2016 г.

УДК 621.01:669.02/.09

А.Н. Савельев, С.В. Козлов, Д.О. Анисимов

Сибирский государственный индустриальный университет

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ГИДРОПРИВОДОВ ХОЛОДИЛЬНИКОВ МНЛЗ

Одним из наиболее распространенных агрегатов, используемых на завершающих участках технологических линий производственных процессов в черной металлургии, являются холодильники. На этих агрегатах горячий металл, постепенно перемещаясь вдоль них, остывает до температуры товарного состояния. Широкое распространение получили холодильники шагающего типа, в которых подвижные балки совершают циклическое поступательное движение в двух плоскостях: вертикальной и горизонтальной. В процессе длительной эволюции приводов этих холодильников инженерные поиски наиболее рационального решения привели к выводу, что наиболее эффективным является гидравлический привод. Однако, наряду с положительными качествами гидравлических приводов при их эксплуатации наблюдаются и отрицательные явления, сдерживающие их широкое применение. Наиболее существенным недостатком гидроприводов в этих агрегатах является наличие в их системе значимых по величине динамических процессов. Результаты анализа надежности работы элементов холодильников машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [1] показали, что гидроприводы холодильников достаточно часто (до ста раз в год) выходят из строя. Таким образом, оценка динамических процессов при эксплуатации холодильников МНЛЗ представляет с точки зрения надежности работы этого вида оборудования значительный интерес.

Известно, что динамические процессы в оборудовании по своей частотной характеристике делятся на высоко- и низкочастотные, определяемые частотой колебаний массивных масс технологического агрегата. В настоящей работе разработана модель и выполнена оценка ее применения для определения низкочастотных процессов в гидроприводе холодильников, использующихся в металлургической промышленности. В качестве холодильника-аналога рассмотрен холодильник шагающего типа, установленный в технологической линии МНЛЗ и состоящий из двух секций. Движение подвижных балок каждой из секций осуществляется четырьмя вертикальными и двумя горизонтальными цилиндрами, синхронно работающими от разных источников гидроэнергии. В цикле работы вертикального привода балок холодильника существует участок, когда балки подводятся к остывающему металлу, и участок, когда они поднимают металл. В момент касания подвижных балок металла нагрузка на привод этих балок резко возрастает, а в момент опускания охлаждаемого металла происходит обратный процесс (нагрузка резко падает). Таким образом, в цикле работы вертикального привода подвижных балок существует два момента, когда нагрузка ступенчато на них меняется.