

УДК 669.02/.09

Артюх В. Г.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН ОТ ПОЛОМОК

Проблема защиты металлургических машин от поломок реально существует много десятков лет [1]. Поломки на этих машинах практически стали нормой, убытки от поломок по одному металлургическому комбинату составляют десятки миллионов гривен в год. Несмотря на то, что работы в этом направлении довольно интенсивно велись, начиная с 60-х и 70-х годов прошлого столетия, коренных сдвигов здесь не произошло [2]. Проблема защиты от поломок связана с чрезмерными нагрузками. Причины появления таких нагрузок надо искать в анализе качественной стороны нагружения металлургических машин [3].

Очевидно, что нагрузки необходимы, прежде всего, для выполнения технологических операций. Эти нагрузки можно назвать технологическими или полезными. Этим нагрузкам присущи следующие признаки:

1. Они довольно точно определяются теоретически (расчетным путем). Имеется достаточное количество методик расчета, и все они проверены на практике.
2. Эти нагрузки консервативны, т.е. изменить их можно только одновременно с изменением технологии. При стабильной технологии нагрузки остаются стабильными.
3. Иногда при неумышленных (несанкционированных) нарушениях технологических режимов, которые не могут быть полностью исключены, эти нагрузки могут возрастать вплоть до разрушающих значений.

Кроме технологических (полезных) нагрузок, в машине всегда присутствуют или периодически появляются нагружения нетехнологического характера, связанные с разгоном, торможением, столкновением отдельных деталей, деформациями, зазорами, нагревом, различными дефектами изготовления и дефектами, приобретенными при эксплуатации. Эти нагрузки можно вполне обоснованно назвать вредными или паразитными. Им присущи свои характерные признаки:

1. Оценка параметров этих нагрузок – величины, продолжительности, скорости изменения – как правило, весьма приближенна; методики их определения несовершенны; иногда этими нагрузками вовсе пренебрегают при расчетах, а иногда при их определении допускают грубые ошибки.
2. Эти нагрузки переменны во времени. Они чаще всего не пропорциональны полезным нагрузкам, могут сильно изменяться с увеличением износа и ростом зазоров, а также другими изменениями в узлах машин.
3. Паразитные нагрузки могут существенно превышать по величине полезные нагрузки и, тем самым, определять прочность машины в целом.
4. Перегрузки в металлургических машинах, связанные с повышением уровня паразитных нагрузок, встречаются довольно часто. Поэтому целенаправленное снижение уровня паразитных нагрузок всегда повышает надежность работы машины.

Из приведенных выше свойств и особенностей паразитных нагрузок видно, насколько важную роль играют они в связи с необходимостью защиты машин от перегрузов и поломок. Именно поэтому важно установить их происхождение, величины, характер протекания во времени, а также возможности если не полной их ликвидации, то хотя бы снижения их величин до приемлемого (допускаемого) уровня.

Целью данной работы является анализ возможных путей защиты машин от поломок и перегрузов, а также разработка теории ограничения генерируемых в машинах нагрузок (теория предохранителей).

Рассмотрим машину или ее отдельную часть как упругую систему. Появление нагрузок в этой машине (как полезных, так и паразитных) вызывается воздействиями извне со стороны окружающих систему тел. Эти воздействия порождают (генерируют) в упругой системе силы, которые для этой системы являются нагрузками, определяющими ее прочность и долговечность. Упругая система своими параметрами влияет на величины генерируемых нагрузок.

Каковы же наиболее часто встречающиеся воздействия на упругую систему? Основных видов воздействий не так уж и много, это:

1. Воздействие энергией при столкновении движущейся массы с упругой системой.
2. Воздействие деформацией.
3. Воздействие ускорением (инерцией).
4. Воздействие температурой.
5. Воздействие статической силой.

Последнее из воздействий, а именно, воздействие статической силой, встречается в машинах крайне редко. Воздействие температурой в определенном интервале приводит к воздействию деформацией, которое может приводить к появлению нагрузок, если нагревается (или охлаждается) элемент статически неопределимой упругой системы. В системах статически определимых температурное воздействие не приводит к появлению нагрузок. Остальные три вида воздействий – энергией, деформацией и инерцией – встречаются довольно часто. Львиная доля паразитных нагрузок является результатом этих воздействий. При этом упругая система не просто воспринимает нагрузки. Она своими параметрами и рабочими характеристиками участвует в генерировании этих нагрузок. Отсюда вытекает основной принцип снижения (амортизации) ненужных паразитных нагрузок. Это изменение параметров упругой системы таким образом, чтобы при неизменном внешнем воздействии она генерировала нагрузки более низкого уровня (безопасного с точки зрения прочности).

Что же это за параметры, которые столь радикально могут снижать генерируемые системой нагрузки, и до какого уровня можно терпеть паразитные нагрузки? Для ответа на этот вопрос нужно ввести понятие предельной нагрузки  $P^*$  (или допускаемой нагрузки для упругой системы), которая обеспечивает прочность и долговечность рассматриваемой машины. Остальные параметры машины должны быть такими, чтобы при имеющихся воздействиях генерируемые нагрузки не превосходили предельной нагрузки  $P^*$ . Нас интересуют те параметры, которые оказывают на уровень нагрузок наибольшее воздействие. Назовем их параметрами влияния. Они совпадают с параметрами воздействия.

Начнем с воздействия энергией. В этом случае параметром влияния будет предельная энергоемкость упругой системы  $U^*$ , т. е. запас упругой энергии системы, соответствующий ее предельной нагрузке  $P^*$ . Чем больше эта величина, тем надежнее осуществляется амортизация. Условие успешной амортизации имеет вид:

$$U \leq U^*, \quad (1)$$

где  $U$  – энергия соударения (воздействия на упругую систему);

$U^*$  – предельная энергоемкость упругой системы.

При воздействии деформацией параметром влияния будет предельная деформация упругой системы  $\lambda^*$ , т. е. такая деформация, которая соответствует предельной нагрузке  $P^*$ . Условием эффективной амортизации будет:

$$\lambda \leq \lambda^*, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – деформация внешнего воздействия на упругую систему.

При воздействии инерцией условие эффективной амортизации имеет вид:

$$P_{ин} \leq P^*, \quad (3)$$

где  $P_{ин}$  – возникающая при внешнем воздействии инерционная сила.

Воздействия могут быть и комбинированными, когда параметров воздействия несколько. Как же при этом нужно модернизировать металлургические машины, чтобы добиться выполнения условий (1), (2), (3)? И возможно ли это в принципе?

Самым радикальным способом будет существенное увеличение энергоемкости  $U^*$  в упругой системе. В настоящее время в силу ряда исторических и экономических причин, а также некоторых ошибок технического характера металлургические машины имеют излишний вес, большую жесткость и очень малую энергоемкость. Увеличить энергоемкость при ограниченной величиной  $P^*$  нагрузке можно только увеличением деформации  $\lambda^*$  (предельной деформации системы). Это значит, что выполнение условия (1) приведет к выполнению условий (2) и (3), т. е. энергоемкость машины  $U^*$  становится наряду с предельной нагрузкой  $P^*$  ее важнейшим параметром.

Каким же образом можно существенно повысить энергоемкость машины? Здесь есть два основных пути.

1. Повысить энергоемкость всех деталей машины, применив для них более прочные материалы (практически – более прочные стали). Детали из этих материалов при неизменном модуле упругости  $E$  допускают большие напряжения и большие деформации, а, значит, имеют и большую энергоемкость. Однако подобная модернизация машины по затратам сравнится с изготовлением новой машины.

2. Второй путь – ввести в машину одну, но особую деталь, которая будет установлена последовательно с другими деталями. Особенность этой детали должна заключаться в большой энергоемкости, сравнимой с исходной энергоемкостью машины (а лучше, значительно ее превосходящей). Такую деталь мы вправе назвать активной деталью.

Энергоемкость новой машины  $U'$  благодаря активной детали существенно увеличится:

$$U' = U + U_a, \quad (4)$$

где  $U$  – исходная энергоемкость машины;

$U_a$  – энергоемкость активной детали.

Рассмотрим формирование нагрузок в прокатном стане. Мы воздействуем на машину деформацией на входе и получаем величину генерируемой силы на выходе. Эта сила генерируется в упругой системе машины; она совершает работу и выполняет технологическую операцию – прокатку. Сила прокатки передается с рабочих валков на опорные, оттуда через подшипники и подушки на станины, а затем через крепления на плитовину и фундамент. При нормальном симметричном нагружении все силы уравниваются в пределах станин, а крепления этих станин не нагружены дополнительными силами, кроме сил затяжки. В этих условиях можно все силы считать технологическими в пределах перечисленной группы деталей (одной силовой линии). Но при прокатке задействованы и другие группы деталей. Так, например, известно [4], что в момент захвата раската рабочими валками создается не только вертикальная, но и горизонтальная сила, приложенная к рабочим валкам, их подушкам, станинам (в горизонтальном направлении) и креплениям станин. Среди этих сил, действующих на перечисленные детали, нет полезных. В направлении данной силовой линии действуют только паразитные нагрузки.

В рассматриваемом прокатном стане есть еще одна важная силовая линия, которая начинается от рабочего валка и содержит все детали главной линии от соединительных шпинделей до двигателя. По этой силовой линии передается крутящий момент, создаваемый технологической силой прокатки и паразитной горизонтальной силой. Первая из них действует в течение всего пропуска, вторая – только в период захвата. Таким образом, для третьей силовой линии нагружение является комбинированным – в начальный период захвата одновременно действуют и полезные, и паразитные нагрузки. В этих условиях нужно установить

четкие правила ограничения нагрузок и недопущения аварийных поломок. Соотношение полезных и паразитных нагрузок определяет на практике возможности защиты от поломок, поэтому данное соотношение должно лечь в основу классификации машин по типу подходов к вопросам защиты.

Введем понятие качества машины как отношение полезной нагрузки в данной силовой линии к общей нагрузке в этой же линии [5]. В приведенном выше примере первая силовая линия имела только полезную нагрузку, поэтому качество равно единице (это наибольшее его значение). Во второй силовой линии вся нагрузка – паразитная, а это означает, что  $K = 0$ . В третьей силовой линии есть и полезная, и паразитная нагрузки, причем опыт эксплуатации таких прокатных станков и осциллографирование нагрузок в их главных линиях показывают, что здесь паразитные нагрузки в 1,5...3 раза превосходят полезные. Тогда качество этой силовой линии составит  $K = 0,25...0,50$ .

Качественное различие отдельных силовых линий приводит к необходимости различного подхода к защите от поломок деталей этих линий.

В первой силовой линии нет ненужных паразитных нагрузок, и поэтому здесь нечего уменьшать, т.е. амортизация нагрузок здесь недопустима. Попытка применить в этой силовой линии амортизацию совершенно расстроит технологию прокатки. Защиту таких силовых линий необходимо осуществлять предохранителями-ограничителями (ПО).

Вторая (горизонтальная) силовая линия имеет нулевое качество, т. е. генерирует и испытывает только паразитные нагрузки. Эта линия нуждается в амортизации, так как уровень сил очень высок. Хотя продолжительность действия нагрузок в этой силовой линии невелика, однако количество нагружений в связи с их колебательным характером неблагоприятно с точки зрения циклической прочности. Всемерное снижение паразитных нагрузок в течение всего периода их действия повышает и статическую, и усталостную прочность деталей машин, защищает их от разрушения. Всего этого можно достичь на основе постоянно действующих амортизаторов, которые на основе их функциональной направленности можно назвать предохранителями-амортизаторами (ПА). Особенностью ПА является постоянство действия независимо от уровня нагружения и пропорциональность снижения паразитной нагрузки ее уровню. Снижение паразитной нагрузки зависит от параметров ПА (в первую очередь, от вида рабочей характеристики и, в основном, от энергоемкости). Амортизация подобных силовых линий машин не повысит их качества, равного нулю, но существенно увеличит запасы прочности деталей этой линии.

Третья силовая линия имеет качество  $0,25 \leq K \leq 0,5$ ; следовательно, она нагружена как технологическими, так и паразитными нагрузками. Возможности амортизации здесь имеют реальную перспективу. Для таких силовых линий амортизация паразитных нагрузок приводит к существенному снижению общих нагрузок, а, значит, повышает надежность и защищаемость указанных силовых линий. Чем ниже качество рассматриваемой силовой линии, тем выше должна быть вероятность применения одного из ПА, который действует на постоянной основе и может снижать не только максимальную нагрузку, но и все другие паразитные нагрузки, тем самым повышая усталостную прочность всех деталей силовой линии.

Перегруз в главной линии может возникнуть в период захвата – в этом случае основная нагрузка паразитная, и с ней надо бороться установкой ПА. Если перегруз связан с технологическими нагрузками (т. е. с увеличенным обжатием или с пониженной температурой), то в этом случае требуется применение ПО. Они могут устанавливаться в главной линии или клетки. На выбор места установки ПО влияют последовательность нагружения и стоимость защиты.

Что касается ПА, то имеется несколько типов подобных устройств. Их классификация может быть введена на основе различных типов воздействий. Если амортизируются нагрузки, порожденные воздействием энергией, то такой амортизатор можно назвать буфером или

буферным устройством. При амортизации нагрузок, вызванных воздействием деформаций, действующий амортизатор можно назвать компенсатором. Амортизатор, который гасит колебания за счет рассеяния энергии (внешним или внутренним трением), можно назвать демпфером. Все указанные виды амортизаторов могут выполнять функции ПО (при наличии высокого уровня паразитных нагрузок). То есть могут реально существовать предохранители-буферы, предохранители-компенсаторы и предохранители-демпферы.

Применению ПО должна предшествовать полная амортизация рассматриваемой силовой линии. Если качество удается поднять до  $K = 0,8 \dots 0,9$ , то дальнейшее совершенствование системы защиты может и должно происходить на основе разработки ПО.

Такие разработки включают в себя, прежде всего, вопросы выбора:

- места установки предохранителя;
- величины выключающей нагрузки;
- требуемой характеристики предохранителя.

После решения этих вопросов могут быть рассмотрены конструкция и правила эксплуатации предохранителей.

Для прокатных станов есть два основных места установки ПО – это либо рабочая клетка, либо главная линия стана. В рабочей клетке самым удобным местом для установки ПО является место между нажимным винтом и подушкой. Предохранитель, установленный в этом месте, передает полное усилие прокатки, в том числе и усилие, соответствующее случаю перегруза. В главной линии прокатного стана могут быть установлены предохранительная муфта или предохранительный шпиндель; место установки должно находиться между валками и основными маховыми массами привода [6]. При выборе места установки предохранителя должно учитываться качество рассматриваемых силовых линий, причем предпочтение нужно отдать той силовой линии, у которой качество выше. Кроме того, должно быть выбрано то место из нескольких возможных, в котором максимальная нагрузка возникает раньше, чем в других местах. В отдельных случаях ПО могут устанавливаться одновременно в нескольких местах.

Следующий вопрос заключается в выборе величины выключающей нагрузки. Ограничение нагрузки должно происходить таким образом, чтобы, с одной стороны, беспрепятственно выполнялась машиной заданная технология; с другой стороны, была бы обеспечена прочность деталей защищаемой силовой линии. В промежутке между технологической и максимально допустимой нагрузками и должна располагаться выключающая нагрузка. Проблема заключается в том, что выключающая нагрузка любого предохранителя не может быть постоянной [7]. В зависимости от типа ПО она может иметь разброс, связанный как с постоянством характеристик материала, так и с разбросом значений размеров. Кроме того, возможно изменение выключающей нагрузки, связанное с усталостными повреждениями элементов ПО. Подобные изменения могут в течение реального времени (например, в течение одной-двух недель) уменьшить значение выключающей нагрузки в 2...3 раза. Учет всех параметров, связанных с точностью срабатывания, позволяет отобрать те типы предохранителей, которые могут надежно работать в довольно узком диапазоне допустимых нагрузок.

Для выбора рабочей характеристики ПО нужно проанализировать происхождение нагрузок (в том числе, технологических). Например, для прокатного стана появление технологических нагрузок (силы прокатки и момента прокатки) связано с воздействием на упругую систему рабочей клетки деформацией. Поэтому именно деформация является для прокатного стана параметром влияния. Чтобы снизить нагрузку в прокатном стане, нужно увеличить деформацию клетки. Причем это нужно сделать только в случае достижения нагрузкой определенного опасного значения.

Таким образом, ПО прокатного стана представляет собой элемент переменной жесткости. Теоретически рабочая характеристика такого предохранителя должна иметь два участка различной жесткости [8]. Первый участок (при малых нагрузках) должен иметь

максимально возможную жесткость, чтобы не влиять на точность проката; второй участок (опять же чисто теоретически) должен иметь нулевую жесткость, т.е. второй участок рабочей характеристики в координатах «нагрузка-деформация» должен быть горизонтальным.

На практике так бывает не всегда. Если предохранитель работает один (скажем, муфта в главной линии прокатного стана), то горизонтальный участок возможен. Для ПО, работающих в паре, горизонтальный участок неприемлем, так как не позволяет выровнять нагрузку между нажимными винтами. В этом случае валок прокатного стана перекашивается, и раскат может сойти с рольганга, угрожая жизни людей. Поэтому ПО должен иметь ломаную характеристику – жесткую при нагрузках от 0 до  $P_1^*$  (нагрузки срабатывания ПО) и более мягкую в пределах от  $P_1^*$  до  $P_2^*$  (максимальной нагрузки на ПО), причем соотношение между

этим нагрузками должно быть принято в разумных пределах, например:  $\frac{P_1^*}{P_2^*} = 1,10 \dots 1,30$ .

Предохранители указанных выше типов разработаны для металлургических машин «ММК им. Ильича» лабораторией «Защита металлургических машин от поломок», созданной в 2006 г. сотрудниками кафедры «Сопротивление материалов» ПГТУ в структуре УГМ. Они прошли промышленное опробование и внедрены в различных цехах «ММК им. Ильича».

### ВЫВОДЫ

1. Особенности нагружения металлургических машин приводят к необходимости иметь два вида предохранителей: предохранители-амортизаторы и предохранители-ограничители.

2. Предохранители-амортизаторы должны применяться в тех силовых линиях, где высок уровень паразитных нагрузок.

3. Предохранители-ограничители предназначены для силовых линий с низким уровнем паразитных нагрузок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Большаков В. И. Исследования динамики, прочности и надежности металлургических машин / В. И. Большаков, В. К. Цапко // Захист металургійних машин від поломок. – Мариуполь, 2002. – Вып. 6. – С. 26–27.*
2. *Большаков В. И. Новые технические решения в металлургическом оборудовании / В. И. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 4. – С. 10–13.*
3. *Артюх В. Г. Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах : монография / В. Г. Артюх. – Мариуполь : ПГТУ, 2008. – 246 с.*
4. *Артюх В. Г. Горизонтальные силы при прокатке / В. Г. Артюх, Г. В. Артюх, В. О. Мазур // Вестник ПГТУ. – Мариуполь, 2009. – Вып. 19. – С. 128–132.*
5. *Артюх В. Г. Качество металлургической машины / В. Г. Артюх // Захист металургійних машин від поломок. – Мариуполь, 2009. – Вып. 11. – С. 23–28.*
6. *Хоменко В. И. Место установки защиты приводов прокатных валков / В. И. Хоменко // Известия вузов. Черн. металлургия. – 1966. – № 6. – С. 214–216.*
7. *Артюх В. Г. Точность предохранителей для металлургических машин : монография / В. Г. Артюх. – Мариуполь : ПГТУ, 2000. – 177 с.*
8. *Артюх В. Г. К вопросу выбора рабочей характеристики предохранительного устройства / В. Г. Артюх // Придніпровський науковий вісник: Машиностроение и технические науки. – 1997. – № 35 (46). – С. 22–24.*

Артюх В. Г. – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой ПГТУ.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: artukh\_v\_g@pstu.edu