

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В КАНАТАХ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЧЕСКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Предохранительное торможение шахтной подъемной установки (ШПУ) является одним из самых сложных динамических режимов в работе шахтного подъема. От параметров настройки и режима работы тормоза зависят динамические нагрузки во всей механической части подъемной машины, футеровке барабана, головных и уравнивающих канатах. Управление предохранительным тормозом без учета взаимодействия масс движущихся частей подъемной установки с упругими свойствами канатов может приводить к неконтролируемому скольжению канатов по шкиву трения или набеганию сосуда на канат. Кроме того, амплитуды и частоты вертикальных колебаний подъемного сосуда в момент торможения оказывают значительное влияние на величину контактных динамических нагрузок в системе "сосуд-армировка", которые могут в несколько раз превышать нагрузки при рабочем движении сосуда по данному участку шахтного ствола [1]. Эти причины вызывают необходимость создания эффективных автоматических систем управления предохранительным тормозом ШПУ, обеспечивающих минимизацию динамических перегрузок в механической части и повышение безопасности ШПУ.

Для решения указанной задачи в 80-х – 90-х годах при участии проектно-конструкторских институтов ПО Донецкгормаш и НПО "Красный металлист" был разработан и испытан комплекс автоматически регулируемого предохранительного торможения (АРПТ). Система предназначена для применения на всех типах наклонных барабанных и вертикальных многоканатных подъемов с радиальными и дисковыми тормозами. С точки зрения классификации систем автоматического управления она являлась нелинейной, тормозной привод одностороннего действия управлялся клапанами которые, выпуская рабочее тело из тормозных цилиндров, формировали увеличение тормозного момента, соответствующего заданному замедлению.

В процессе испытаний АРПТ на одноконцевой ШПУ 1-3-2У шахты "Бутовка-Донецкая" ПО Донецкуголь производились исследования системы в разных режимах ее работы.

Техническим заданием контроль замедления ШПУ было рекомендовано осуществлять дифференцированием сигнала скорости. В процессе испытаний выяснилось, что датчик с функцией дифференциатора неустойчив к помехам от механических вибраций, биений шестерен в редукторе и других высокочастотных воздействий. На рис. 1 представлены временные диаграммы предохранительного торможения одноконцевой ШПУ 1-3-2У шахты "Бутовка-Донецкая" ПО Донецкуголь, оборудованной системой АРПТ. На рисунке приняты обозначения:

$P_{ц}$ – давление рабочего тела в тормозном цилиндре; a – сигнал действительного замедления, результат дифференцирования сигнала скорости (фотоэлектрический датчик, тахогенератор); F_T – тормозное усилие, метки времени и сигналы включения/выключения электромагнитных клапанов 1к–3к, регулирующих тормозной момент выпуская рабочее тело из тормозного цилиндра. Клапан 1к – предназначен для форсирования времени холостого хода, а клапаны 2к, 3к – настроены на грубый и точный пороги регулирования тормозного момента.

Из диаграммы спуска груза видно, что на начальном переходном этапе торможения, выхода на диаграмму заданного замедления происходит кратковременное срабатывание регулирующих клапанов, которое вызвано высокочастотными колебаниями сигнала замедления из-за биений зубчатых соединений в редукторе. В средней части диаграммы происходит повторное, более длительное, срабатывание клапанов, которое вызвано высоким уровнем амплитуд низкочастотных колебаний упругой части подъема, искажающим действительный уровень замедления машины. Эти срабатывания в процессе предохранительного торможения создают избыток тормозного момента и замедления, что создает динамические перегрузки в системе.

Торможение при подъеме не вызывает проблем с динамикой. Клапаны отработывают четко, замедление происходит практически на свободном выбеге и не вызывает перерегулирования тормозного момента.

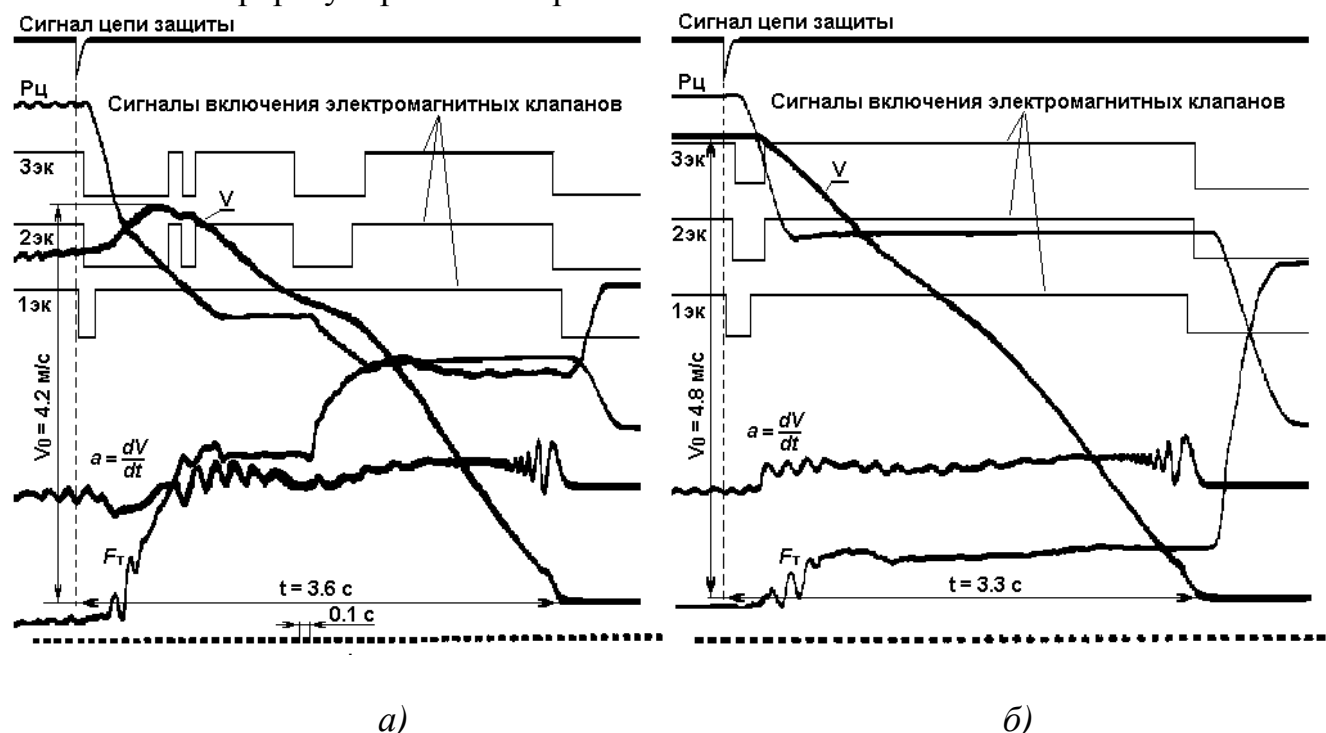


Рис.1. Временные диаграммы предохранительного торможения одноконцевой ШПУ 1-3-2У шахты “Бутовка-Донецкая” ПО Донецкуголь системой АРПТ, в режиме спуска (а) и подъема (б) груза.

На скиповом подъеме ш/у им. IX пятилетки ПО Советскуголь проводились промышленные испытания первой отечественной серийной ШПУ ЦШ-4х4Д с дисковыми тормозами и системой АРПТ [3]. За основу системы АРПТ были приняты технические решения с односторонним регулированием (увеличением)

тормозного момента с учетом особенностей многоступенчатого торможения. Контроль замедления осуществлялся дифференцированием действительной скорости ШПУ.

Особенностью подъемной установки с дисковым многоступенчатым тормозом, как объекта регулирования – являлось существенно высокое значение минимально регулируемого тормозного усилия, т. к. подъемная установка была оборудована восемью тормозными модулями, создающими в совокупности трехкратное статическое тормозное усилие F_{cm} . Соответственно, величина тормозного усилия, создаваемого одним модулем приближалась к $0,4F_{cm}$. Это предопределило склонность системы к перерегулированию, даже при низкой инерционности объекта регулирования. Потому, в этих условиях, получение высокой точности регулирования определялось рациональным вводом очередной группы модулей по окончании переходного процесса, вызванного вводом предыдущей группы. Опыт исследований показал, что для более точного регулирования использовалось усредненное значение измеряемого замедления. Для цифровых систем такое усреднение выражается в выборе рационального периода квантования сигнала. Потому эта рациональность заключается в выборе компромиссного решения, учитывающего обязательность выполнения требования Правил безопасности по времени нарастания тормозного усилия до величины, соответствующей одному статическому усилию и собственных частотных свойств системы подъема.

Исходя из этих условий, в процессе исследований при разработке системы был принят следующий алгоритм ее работы:

1. по сигналу срабатывания цепи защиты сразу вводится в работу первая группа тормозных элементов, предназначенных для уравнивания статической нагрузки, при обеспечении необходимого быстродействия;
2. по окончании переходного процесса, вызванного включением элементов первой группы по величине рассогласования заданного и действительного замедления, формируется управляющее воздействие на включение очередной группы элементов, количество которых пропорционально величине рассогласования;
3. повторяется предыдущий пункт и при необходимости корректируется недостаток тормозного усилия;
4. при достижении скорости, при которой возможно наложение полного тормозного усилия включаются оставшиеся элементы.

Для реализации алгоритма были исследованы количественные резервы быстродействия АРПТ: переходные характеристики подъемной установки на воздействия групп тормозных модулей, тормозных модулей на управляющие сигналы и др. Переходные характеристики подъемной установки $a_d = f(t)$ при включении группы элементов с тремя значениями периода квантования: приведены на рис. 2. На них представлены: кривая 1 – для интервала квантования 0,16 с; кривая 2 - 0,64 с; кривая 3 - 0,96 с.

Анализ характеристик позволил сделать следующие выводы:

- при времени измерения (квантования) замедления менее 0,6 с резко падает точность, вызванная высокочастотными помехами;
- длительность переходного процесса для данной подъемной установки составляет величину более 2 с.

Для достижения приемлемой точности регулирования был выбран компромиссный для данной установки период квантования, составивший 0,64 с.

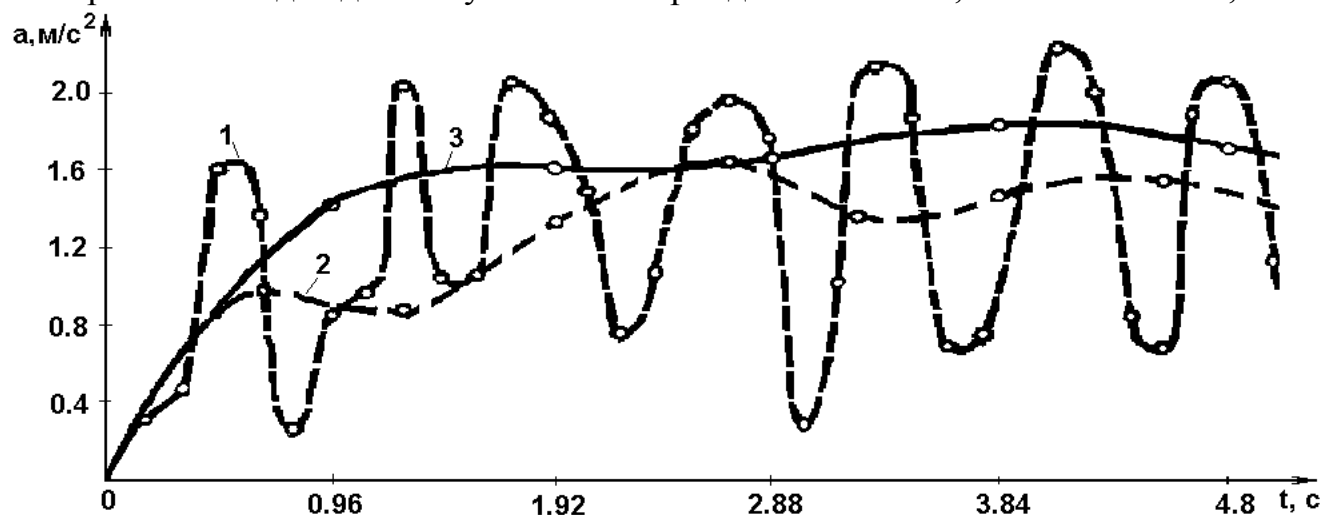


Рис. 2. Семейство переходных характеристик замедления $a_d = f(t)$, многоканатной ШПУ ЦШ-4х4Д скипового подъема ш/у IX пятилетки ПО Советскуголь, при ступенчатом наложении тормозного усилия и различных интервалах измерения (квантования)

Дальнейшие исследования, проведенные в ходе испытаний подъемной установки, показали, что:

- необходимая точность регулирования определяется количеством тормозных модулей и способом их введения;
- для снижения динамических ударов, при ступенчатом наложении тормозных элементов, их необходимо вводить последовательно во времени, с интервалом 0,1 – 0,2 с;
- исключение дифференцирующего звена из цепи обратной связи и переход на регулирование в функции скорости позволяет улучшить помехоустойчивость системы.

В процессе проведения промышленных испытаний систем АРПТ проверялось несколько технических решений улучшения динамики ШПУ за счет повышения точности и минимизации избыточного тормозного момента. В частности, снизить влияния низкочастотных амплитуд упругих колебаний каната, для систем с радиальным тормозом, удалось введением зоны нечувствительности в закон регулирования с порогами на включение/отключение клапанов управляющих тормозом.

Применение фильтров для ограничения влияния высокочастотных помех ухудшило бы быстродействие системы, потому пришлось искать другие способы помехоустойчивости. За основу были приняты технические решения на снижение порядка производной контролируемого параметра переходом к контролю скорости. Для этого был разработан способ контроля скорости ШПУ, который учитывает особенности влияния холостого хода тормоза и амплитуд упругих сил в канатах системы. При этом заданная скорость формируется непрерывным переключением двух законов: снижения и нарастания скорости [2]. Принцип контроля скорости по заданному замедлению с формированием заданной скорости переключением законов скоростей приведен на рис. 3.

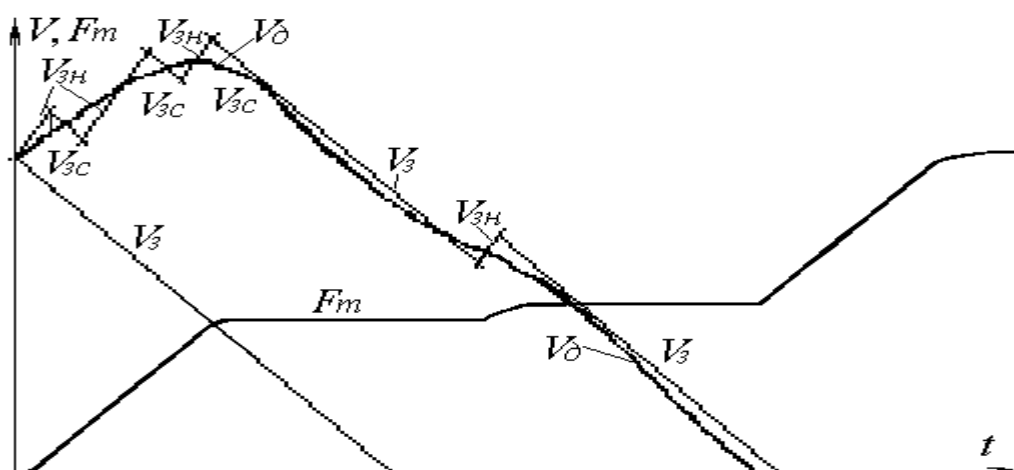


Рис.3. Временные диаграммы способа контроля скорости подъемной установки по заданному замедлению. V_d – действительная скорость, $V_3 = V_{3с}$ – заданная скорость снижения, $V_{3н}$ – закон нарастания скорости, F_m – тормозное усилие.

Закон нарастания скорости должен быть не меньшим, ускорения свободного выбега, а закон снижения равен заданному замедлению. На рис. 4. представлена структурная схема модернизированной системы АРПТ, составленная на основании дифференциальных уравнений в операторной форме: подъемной машины ПМ с упругой частью, системы АРПТ и предохранительного тормоза. Контроль скорости по описанному способу выполняется нелинейным фильтром (НФ), позволяющим устанавливать необходимые значения ускорения и замедления. Эти решения были смоделированы на вычислительной машине и взяты за основу при модернизации серийной системы.

Усовершенствованная система стала более помехоустойчивой к высокочастотным помехам, благодаря чему удалось избавиться от динамических перегрузок связанных с механическими вибрациями. Временные диаграммы предохранительного торможения серийной системы АРПТ на вертикальной многоканатной подъемной установке ЦШ-4х4Р шахты “Северопесчанская” Богословского р/у ПО Уралруда (Россия) с радиальным тормозом приведены на рис. 5. Испытания показали, что данная система АРПТ поддерживает заданное замедление в режимах спуск/подъем с достаточной точностью.

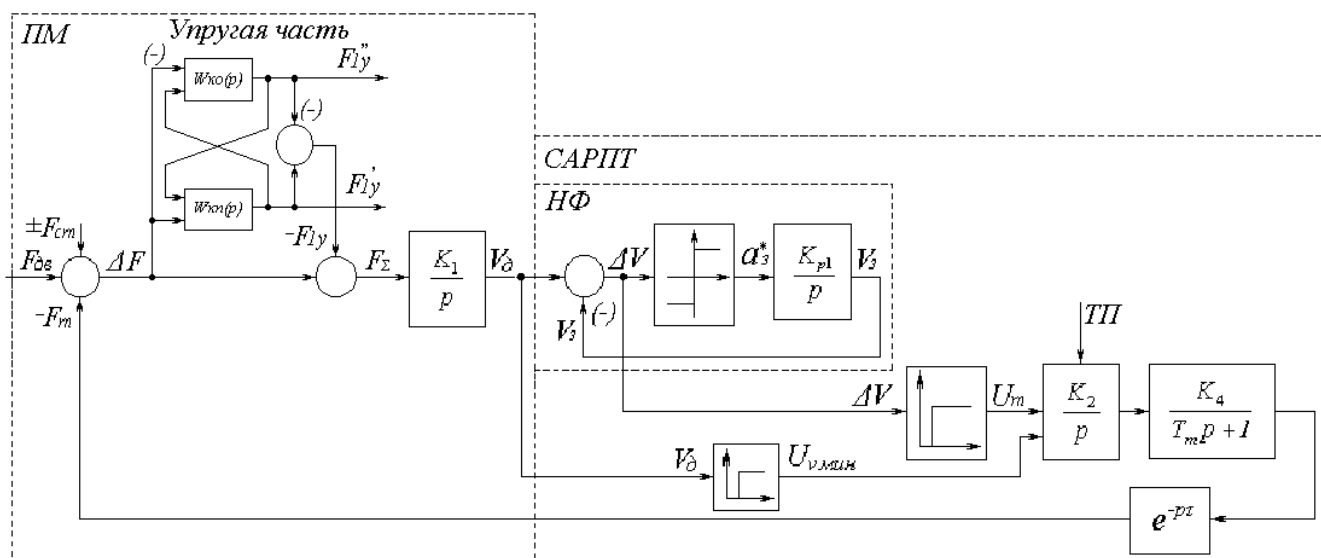


Рис. 4. Структурная схема замкнутой системы АРПТ с клапанным приводом предохранительного тормоза.

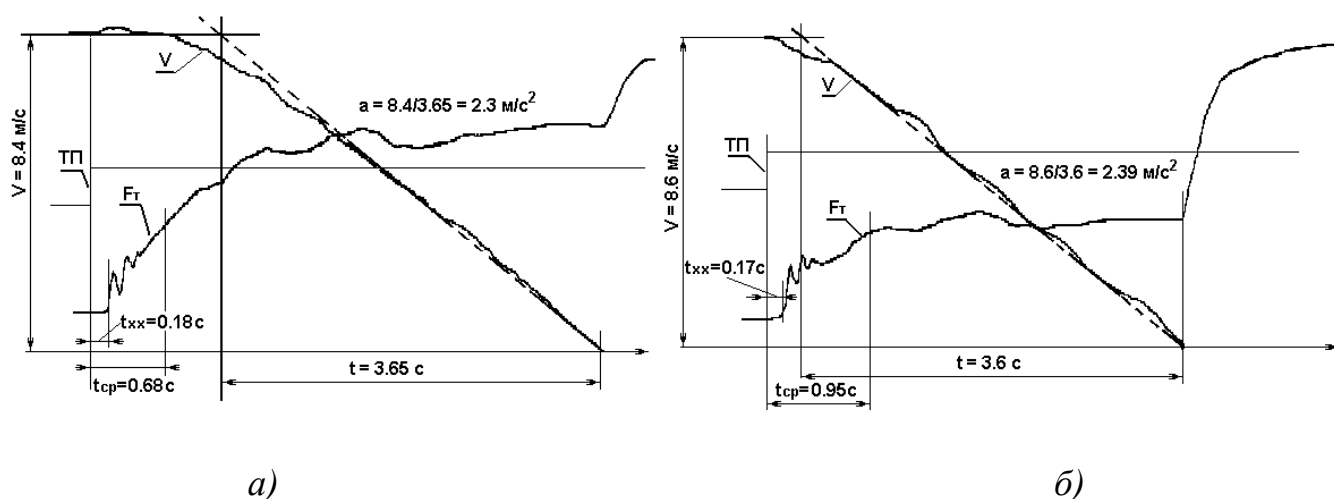


Рис.5. Временные диаграммы предохранительного торможения вертикальной многоканатной ШПУ ЦШ4-4Р шахты “Северопесчанская” Богословского р/у ПО Уралруда (Россия) при спуске противовеса (а) и подъеме груза (б).

Все приведенные выше решения были направлены на снижение динамических перегрузок путем повышения точности управления тормозом. При этом резервом снижения динамических перегрузок остаются имеющиеся во всех диаграммах существенные амплитуды колебаний упругих сил в канатах, вызванные неэффективными законами приложения тормозного момента к ШПУ. Снижение этих амплитуд, путем рациональных по времени и величинам воздействий на тормозную систему стало бы эффективной мерой повышения надежности и долговечности канатов и ШПУ. При создании новых систем АРПТ необходимо предусмотреть такие меры воздействий.

Основным способом для достижения результата является замедление ШПУ при одновременном ограничении величин замедления и рывка [4]. Ограничением

замедления создается стабилизация тормозного момента при предохранительном торможении и не создаются условия для возбуждения колебаний канатов, а ограничение рывка принуждает линейно изменять тормозное усилие (замедление/ускорение) в переходных процессах, придает диаграмме скорости естественную параболическую форму, при которой динамические перегрузки не возникают.

Для реализации этого способа при формировании управляющего воздействия на тормоз необходимо учитывать в процессе торможения параметры упругости канатов: основную частоту, амплитуду, степень затухания и фазовый сдвиг относительно воздействия тормоза. Такие системы могут работать в разомкнутом состоянии, с учетом режима подъем/спуск. В качестве исполнительного привода необходимо использование быстродействующих линейных регуляторов или клапанных электромеханических преобразователей, которые в процессе работы способны создавать кратковременные импульсные растормаживающие воздействия на упругую часть.

Представленные временные диаграммы динамики торможения на рис. 6, полученные на компьютерной модели системы “сосуды – канаты – шкив трения – тормоз” (рис.3), поясняют принцип снижения динамических нагрузок в канатах путем формирования тормозного воздействия в функции времени, с учетом изложенного выше. При этом функция $F_T(t)$ должна определять не только замедление ШПУ, но и учитывать упругие свойства канатов с целью предотвращения переходных процессов в них, вызываемых обменом энергией в движущейся системе между упругими частями и движущимися массами. На рис. 5,а представлена переходная характеристика результирующей суммы динамических усилий в канатах, приложенных к точкам сопряжения со шкивом, $F_{ly}(t)=f(F_T(t)=sign1)$. В практических условиях может использоваться, экспериментально полученная (прямым или косвенным способом), функция реального времени $F_{ly}(t)$, действующей машины при пробном торможении на малой скорости.

Поскольку реальное математическое описание функции $F_{ly}(t)$ для уравновешенной многоканатной установки с учетом упругостей ветвей уравновешивающего каната имеет порядок дифференциального уравнения не менее 8-го [5], то для практической реализации в технических системах она должна быть аппроксимирована элементарной затухающей гармонической функцией низкого порядка, например, 2-го:

$$F_{appr}(t)=e^{-at}A_m\sin(\omega t+\psi)+y_{уст},$$

где: A_m – амплитуда, ω – частота, ψ – фазовый сдвиг, a – степень затухания колебаний, $y_{уст}$ – установившееся значение.

Заменим в модели подъемной машины (см. рис. 4) функцию $F_{ly}(t)$ ее аппроксимацией $F_{appr}(t)$, и с учетом усилий, приложенных к подъемной машине в режиме предохранительного торможения, применим прямое преобразование Лапласа. Получим в операторной форме дифференциальное уравнение аппроксимированной функции инерционных свойств и суммы всех усилий, действующих на машину. После проведения необходимых преобразований:

$$F_{\Sigma}(t) = [F_m(t) \pm F_{cm}(t)] \frac{\frac{y_{ycm} + A_m \sin \psi}{\omega^2 + a^2} p^2 + \frac{2ay_{ycm} + A_m(a \sin \psi + \omega \cos \psi)}{\omega^2 + a^2} p + y_{ycm}}{\frac{1}{\omega^2 + a^2} p^2 + \frac{2a}{\omega^2 + a^2} p + 1}$$

Полученная операторная форма дифференциального уравнения представляет собой дробную функцию степенных многочленов, основные гармонические свойства которой, определены параметрами знаменателя. Для исключения колебаний в системе эти параметры должны быть учтены при формировании функции тормозного воздействия.

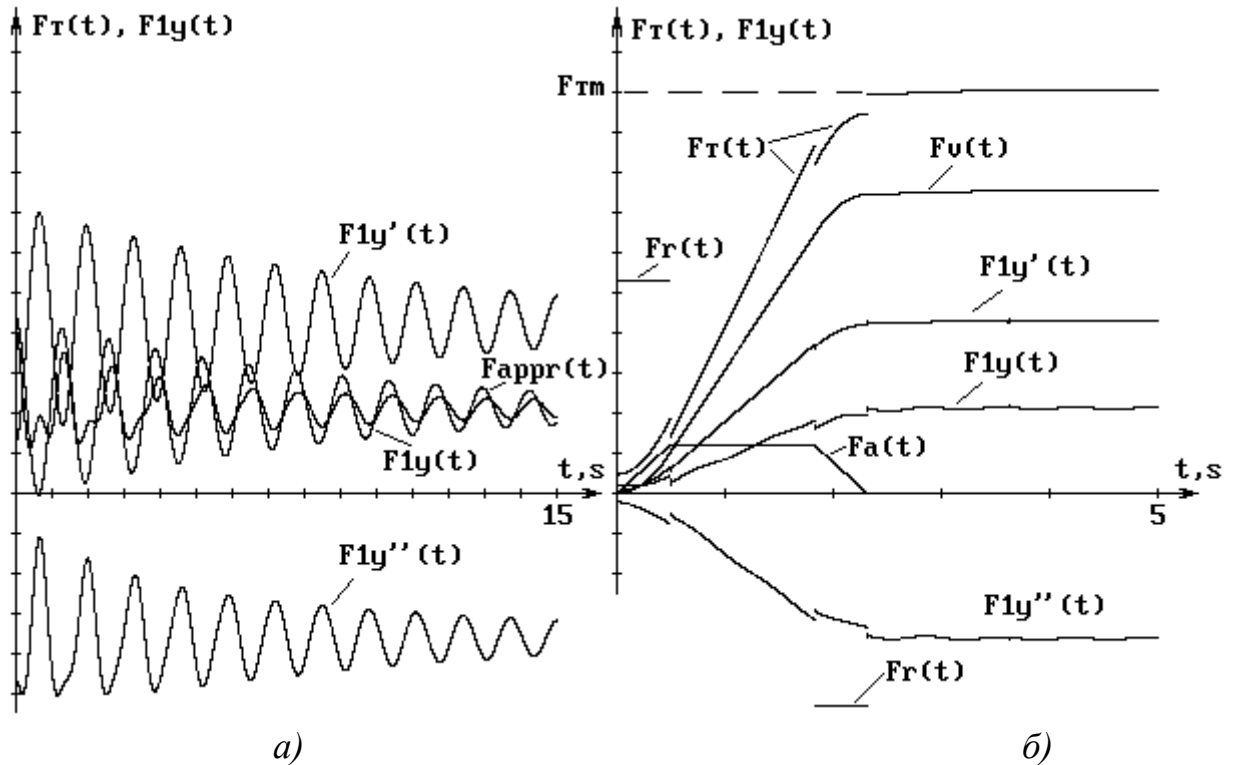


Рис.6. Моделирование временных диаграмм упругой части системы с компенсацией динамических перегрузок воздействием тормоза.

Закон приложения тормозного усилия представляет собой сложную функцию времени $F_T(t) = F_v(t) + k_1 F_a(t) + k_2 F_r(t)$, учитывающую и ограничивающую ускорение и рывок в системе на основании полученных параметров. Составляющие функции: $F_v(t)$, $F_a(t)$, $F_r(t)$ связаны дифференциальной зависимостью аналогичной той, что имеет место между координатами скорости, ускорения и рывка. Потому функция $F_T(t)$ учитывает естественные реактивные взаимодействия элементов подъема с кинетической и потенциальной энергией и предупреждает возникновение условий взаимодействия между ними расчетными воздействиями импульсного характера. Устройство, позволяющее реализовать изложенные принципы, торможения систем с упругими свойствами и методика расчета его параметров изложены в [6].

На временной диаграмме компьютерной модели рис.6,б представлены изменения усилий упругой части составляющих $F_{1y}(t)$, полученные формированием тормозного усилия $F_T(t)$, с ограничением в процессе

предохранительного торможения замедления и рывка в системе, практически в десятки раз. На практике такой эффект будет зависеть от корректности настройки системы. Однако, современные компьютеризованные системы вполне могут осуществлять подобные самонастраивающейся (адаптивные) технологии САРПТ.

Литература

1. Самуся В.И., Ильина И.С. Взаимодействие сосудов с жесткой арматурой при торможении шахтной многоканатной подъемной установки. // Сб. Науч. тр. НИИГМ им. М.М. Федорова: Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок. - № 99. – Донецк, 2004. – С. 173-183.
2. А.с. № 1296500 СССР, МКИ В 66 В 5/00 / Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины./Чермалых В.М., Васильев В.И., Матвиенко Н.П. Открытия. Изобретения.- 1987. - № 10.
3. Литягин В.Ф., Васильев В.И. Построение системы управления предохранительным торможением ШПМ с многоступенчатым дисковым тормозом. // Уголь Украины – 1989. – № 7. – С. 23 – 24.
4. Васильев В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.
5. Чермалых В.М. Исследование сложных электромеханических систем. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
6. А.с. № 1447743 СССР, МКИ В 66 В 5/00 /Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины./Васильев В.И., Дубовик В.Г., Чермалых В.М. Открытия. Изобретения.- 1988. - № 48.

Васильев В.И. Пути снижения динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок системами автоматически регулируемого предохранительного торможения [Текст] / В.И. Васильев // Стальные канаты: Сб. науч. тр. МАИСК. – Одесса: “Астропринт”, 2010, №8. – С. 18-29.