

*Е. Я. Антонюк,
ст. науч. сотр., канд. техн. наук
(Ин-т механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины)*

*С. А. Хорошева,
ст. науч. сотр., канд. техн. наук
(Центр исследований научно-технического потенциала
и истории науки им. Г. М. Доброва НАН Украины)*

К истории проблемы минимизации динамических процессов в металлургических машинах

Проблема уравнивания имеет важное значение для многих современных машин, работа которых сопровождается высокими скоростями движения звеньев и динамическими нагрузками. В зависимости от видов машин и оборудования используются различные способы и системы механизмов уравнивания, удовлетворяющие определенным конкретным требованиям. Учитывая актуальность проблемы, рассмотрим, как она решалась в 60–80-е годы XX ст. днепропетровской научной школой по динамике машин, созданной и руководимой членом-корреспондентом НАН Украины С. Н. Кожевниковым. Эти решения, связанные с тяжелыми машинами металлургического производства, включали теоретические и экспериментальные исследования и конструкторские разработки. Они были доведены до стадии широкого внедрения в производство. Объекты отмеченных разработок выбраны не случайно, так как именно тяжелые машины металлургической промышленности работают в условиях высоких динамических нагрузок, что нередко проявляется в пониженной их надежности и долговечности.

К категории таких машин относятся станы горячей и холодной

прокатки, кривошипно-трубные и гидравлические прессы, машины-автоматы для производства крепежных изделий и другие, содержащие массивные звенья возвратно-поступательного движения. Циклически-повторяющиеся ускорения в таких системах порождают значительные силы инерции, нередко достигающие величин десятков и сотен тысяч ньютонов, что зачастую превышает технологические нагрузки, для реализации которых машины предназначены. В результате в кинематических цепях механизмов машин возникает существенная неравномерность движения, из-за которой могут раскрываться и смыкаться зазоры в подвижных соединениях, что вызывает дополнительные ударные нагрузки, шум и вибрации. Все это часто не позволяет реализовать необходимую производительность и долговечность, обеспечить требуемые санитарные нормы труда оператора. Поэтому принимаются меры, направленные на поддержание необходимого уровня надежности и уменьшение виброактивности посредством уравнивания сил инерции, обеспечивающего снижение нагрузок, действующих в тех или иных звеньях системы или передающихся на фундамент. На

К ИСТОРИИ ПРОБЛЕМЫ МИНИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ...

рис. 1, а изображена схема главного привода стана холодной прокатки труб (ХПТ), основу которого составляет кривошипно-ползунный механизм. От двигателя через спаренные зубчатые передачи 4 и шток 3 клетки 1 задается возвратно-поступательное движение. Расположенные в клетке вращающиеся валки 2 осуществляют прокатку трубы 5.

Уравновешивание кривошипно-ползунных механизмов представляет сложную техническую задачу, которая обычно решается неполностью [1]. При этом чаще ограничиваются уравновешиванием сил инерции звеньев, не принимая во внимание моменты сил инерции, т. е. осуществляют частичное решение проблемы как экономически

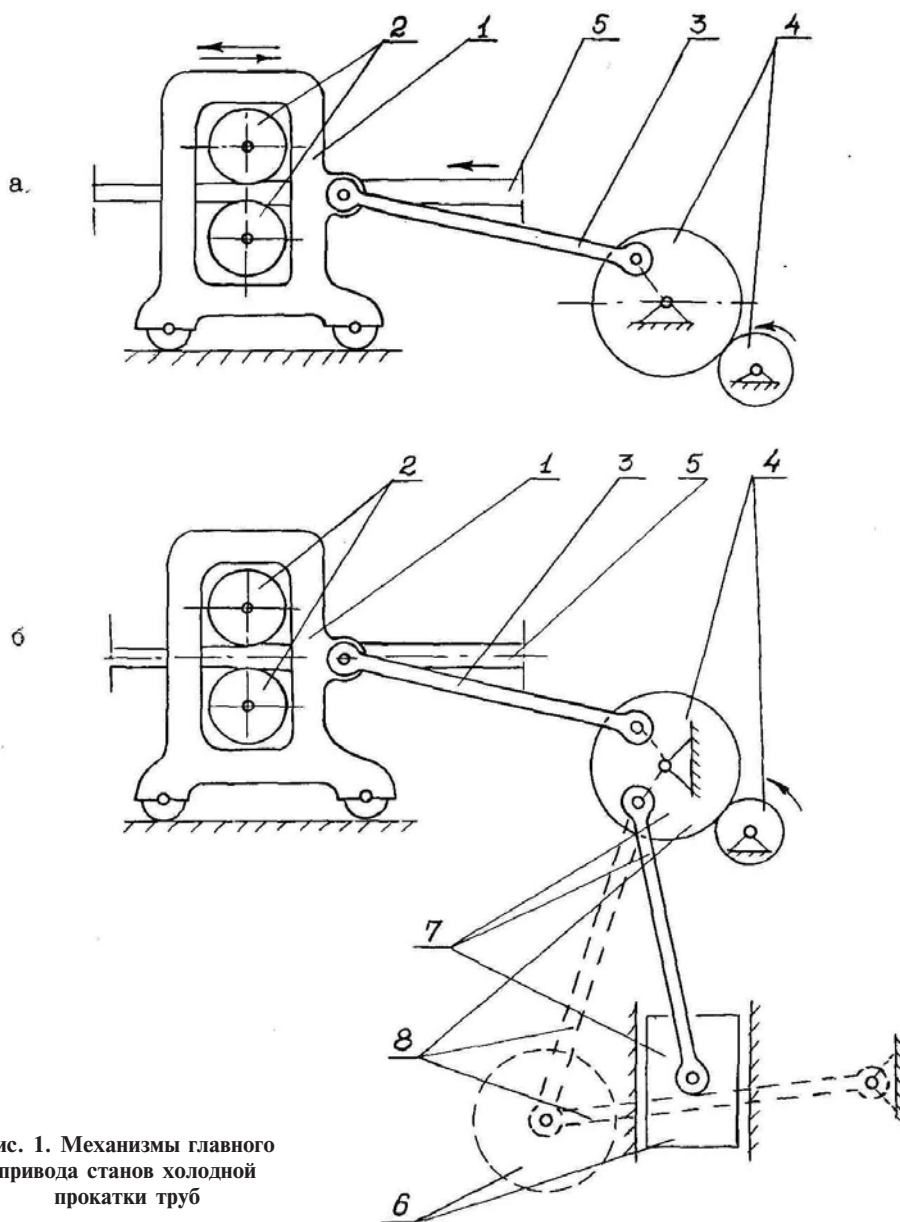


Рис. 1. Механизмы главного привода станков холодной прокатки труб

более обоснованное. Для уравнивания необходимо, чтобы центр масс работающего механизма оставался неподвижным, т. е. для кривошипно-ползунного механизма совпадал с осью вращения кривошипа относительно стойки, что возможно обеспечить введением на кривошипе и шатуне противовесов, расположенных на их продолжении, т. е. вне контура традиционно изображаемой кинематической цепи механизма [1]. При этом усложняется конструкция, увеличиваются габариты и металлоемкость, так как уравнивающие массы оказываются значительными.

В работе И. И. Артоболевского [1] приводится схема из двух симметрично расположенных с одинаковыми геометрическими и инерционными параметрами дезаксиальных кривошипно-ползунных механизмов. Их кривошипы образуют одно прямолинейное звено, ось вращения которого относительно неподвижной стойки расположена посередине. Этим обеспечивается уравнивание сил инерции, передающихся на основание (фундамент), однако пара сил инерции остается неуравновешенной. В этой же работе приводится другая схема кривошипно-ползунного механизма, позволяющая уравновесить также и моменты сил инерции. Общий ползун приводится в движение дву-

мя конгруэнтными двухзвенными цепями (диадами), включающими каждая по шатуну и кривошипу. Последние закреплены на двух одинаковых зацепляющихся зубчатых колесах, на которых расположены специально подобранные противовесы. Такая схема обеспечивает уравнивание сил и моментов сил инерции, однако она, как и первая, сложна для практической реализации, кроме того, механизм статически неопределим, что является существенным недостатком.

Упомянутые выше схемы предназначены для уравнивания динамических компонентов реакций, действующих на фундамент, т.е. при этом не решаются вопросы снижения динамических реакций в кинематических парах кривошипно-ползунного механизма, а также уравнивания момента сил инерции приведенного к валу двигателя, что имеет большое значение для нормальной работы последнего.

Для станов ХПТ всегда оставались актуальными вопросы уравнивания сил инерции клетки, о чем может свидетельствовать экспериментально определенная сила тока (кривая 1, рис. 2) двигателя стана ХПТ-55 без уравнивающего устройства [2]. Как следует из осциллограммы, сила тока, а следовательно, и развиваемый двигателем момент имеют интенсивный

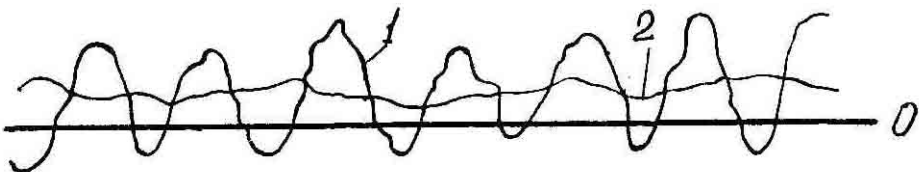


Рис. 2. Осциллограммы силы тока электродвигателя стана ХПТ-55 до (1) и после (2) введения уравнивания

колебательный характер с изменением знака, свидетельствующим о том, что двигатель периодически работает в генераторном режиме, который крайне нежелателен. Тяжелые условия функционирования двигателя отражает высокий уровень динамической нагруженности системы в целом, что подтверждено многими экспериментами. К 60-м годам XX ст. существовало несколько технических решений по механизмам уравнивания станов ХПТ, однако в большинстве случаев эти устройства оказывались малоэффективными.

Например, уравнивание крутящего момента на валу двигателя стана холодной прокатки труб предлагалось осуществить посредством соединения с одним двигателем трех прокатных станков с фазовым сдвигом на угол 120° приводов клетей, движущихся возвратно-поступательно [3]. Такая схема привода крайне громоздка и практически неосуществима, так как по условиям технологического процесса или в связи с ремонтом каждый из станков должен иметь возможность останавливаться независимо от других. Кроме того, усилия в звеньях каждого из трех кривошипно-ползунных механизмов остаются высокими.

Имелись другие способы уравнивания применительно к станам ХПТ. Фирма «Маннесманн Меер» для уравнивания момента на двигателе [4] вводила (рис. 1, б) дополнительно кривошипно-ползунный или кривошипно-коромысловый механизм (последний показан штриховыми линиями) с уравнивающей массой b , расположенной на ползуне или коромысле. При этом, однако, усложнялась кинематическая цепь, значительно увеличивалась масса, сохранялись высокие нагрузки в звеньях.

Существовали предложения с двумя уравнивающими массами, причем траектории их движения и клетки могли быть параллельными [5]. Последние устройства для уравнивания сил инерции имели тот общий недостаток, что, устраняя почти полностью или частично неравномерность нагружения приводного двигателя силами инерции, они практически без изменений сохраняли ее в звеньях кривошипно-ползунного механизма стана ХПТ. Кроме того, вследствие упругости звеньев в усложненной системе могли развиваться нежелательные колебательные процессы, снижающие эффективность уравнивания. К этому же результату приводил случайный разброс параметров (масс, моментов инерции, упругости) звеньев реальных машин. Еще одним из недостатков систем уравнивания, отмеченных выше, является значительное увеличение массы стана за счет введения противовесов, достигающее 30%.

Поэтому предприятия, эксплуатирующие станы ХПТ, поставили задачу создания нового типа уравнивания станков. В решение этой задачи включились инженерно-технические работники промышленных предприятий, коллектив научной школы по динамике машин. Данная школа сформировалась на базе кафедры теории машин и механизмов Днепропетровского металлургического института, соответствующего отдела Института черной металлургии НАН Украины и семинара г. Днепропетровска по теории машин и механизмов, которыми руководил С. Н. Кожевников. Школу также представляли ведущие специалисты предприятий металлургической промышленности Украины, многие из которых защитили под руководством

С. Н. Кожевникова докторские и кандидатские диссертации. В результате многолетней работы было создано уравнивающее устройство нового типа. Оно непосредственно соединялось с клетью, совершающей возвратно-поступательное движение, аккумулируя энергию в процессе одной фазы движения и возвращая ее в систему в процессе другой фазы с минимальными потерями. Вследствие большого хода клетки техническая реализация пружинного или торсионного уравнивания оказалась неприемлемой, к тому же при этом возникали трудности с осуществлением регулирования. Поэтому было применено пневматическое уравнивающее устройство, используемое для полиграфических машин, например для уравнивания сил инерции талеров плоскочечатных машин [6]. Здесь следует отметить,

что на Заводе тяжелого машиностроения (г. Электросталь) уже было создано пневматическое уравнивающее устройство стана ХПТ (рис. 3, а), в котором для уравнивания сил инерции использовался пневмоцилиндр *б*, соединенный со станиной стана посредством шарнира *А* вращательного движения. Шток *7* пневмоцилиндра *б* через звено *8* и шатун *9* передает на клеть *2* уравнивающую силу. В полостях цилиндра поддерживается постоянное давление, вследствие чего силы инерции клетки уравниваются только частично (приблизительно на 50%). Кроме того, устройство достаточно сложно (имеет много звеньев и шарниров) и металлоемко.

Имелись и другие прототипы, например (рис. 3, б) патент Германии [7], в котором упрощена конструкция механизма уравнива-

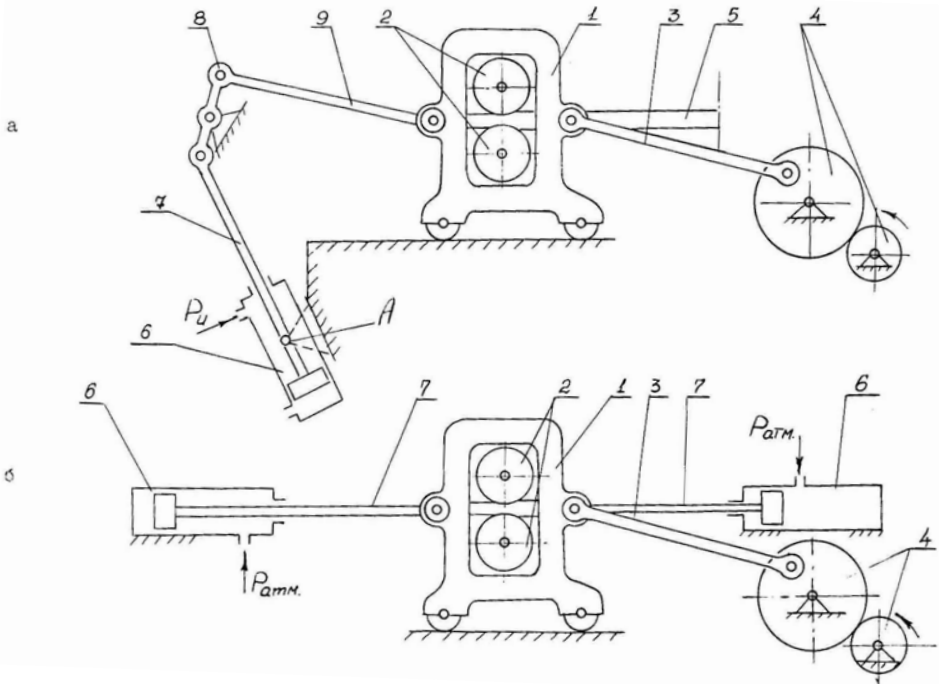


Рис. 3. Схемы станов ХПТ с пневматическими уравнивающими механизмами

ния. Однако в нем не были предусмотрены устройства для регулирования величины уравнивающей силы, что необходимо для переходных режимов (во время пуска или остановки двигателя) или при изменении скорости прокатки, поскольку силы инерции изменяются пропорционально квадрату угловой скорости вращения двигателя. Цилиндры *б* неподвижно закреплены на станине, в связи с этим механизм уравнивания оказывается статически неопределимым, а потому и недостаточно надежным.

Уравнивающее устройство, созданное коллективом, возглавляемым С. Н. Кожевниковым, воплощало лучшие свойства предшественников, обладало достаточной простотой конструкции, высокой эффективностью в работе и надежностью. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, качественное приближение уравнивающей силы, формируемой пневматическими цилиндрами, к величине силы инерции клетки возможно получить только при наличии определенного значения начального давления в цилиндрах в крайних положениях клетки. В новом устройстве (рис. 4) клетка *1* посредством штока *7* и поршня *8* соединяется с пневматическим цилиндром *б*. Цилиндр подвижно соединен с основанием посредством шарнира *А*, чем исключаются повторяющееся условие связи и статическая неопределенность механизма. Ось штока *7* параллельна или совпадает с осью прокатки трубы, в результате чего создаются оптимальные условия нагружения клетки *1*. В легких станах используется один, в средних и тяжелых по два симметрично расположенных уравнивающих цилиндра с соответствующими им поршнями, штока-

ми и шарнирами. Подача воздуха в полости цилиндров *б* осуществляется от магистрали через регулирующийся редукционный клапан *9*, создающий заданное начальное давление. Величина этого давления определяется толкателем *10* и кулачком *11*, вращение которого связано с контроллером, осуществляющим включение и управление скоростью электродвигателя. Каждому положению вала контроллера соответствуют определенные скорости вращения двигателя, силы инерции клетки и начальное давление воздуха в цилиндре *б*. При движении клетки в одной полости цилиндра воздух сжимается, в другой — расширяется, и возникающие силы упругости в полостях цилиндров *б* через штоки *7* воздействуют на клетку *2*, разгружая шатуны *3* и другие звенья механизма привода клетки, причем величина уравнивающей силы зависит от скорости вращения двигателя. Электромагнитное устройство *12* отключает редукционный клапан при остановке стана и включает клапаны *13*, обеспечивающие удаление сжатого газа с заданным сопротивлением в магистраль низкого давления. Для эффективного уравнивания неодинаковых по величине сил инерции в крайних положениях клетки используются разные степени сжатия воздуха в полостях при одинаковом начальном давлении. Об эффективности работы рассматриваемого уравнивающего устройства свидетельствует график силы тока (см. рис. 2, кривая 2) электродвигателя [2]. По сравнению с аналогичным станом (ХПТ-55) без уравнивания (сила тока представлена на рис. 2 кривой 1) произошла стабилизация работы двигателя и всей системы механизмов, снизилась нагрузка на шатуны,

повысилась надежность, появилась возможность существенного увеличения скорости прокатки.

Новые уравнивающие устройства были установлены на станах Никопольского южно-трубного завода и позволили значительно повысить производительность. Например, для станов ХПТ-32 стало возможным увеличение числа совершаемых в минуту двойных ходов клетки со 110 до 140–150, понижение коэффициента неравномерности движения в три раза. Существенным достоинством созданного уравнивающего устройства были его экономичность, обусловленная низкими потерями при термодинамических процессах, удобство и надежность в эксплуатации.

В исследовании и разработке данного уравнивающего устройства принимали участие С. Н. Кожевников, А. С. Ткаченко, Б. М. Кли-

мовский, А. Н. Шведченко и другие машиноведы. Впоследствии в 1962 г. С. Н. Кожевников в составе коллектива авторов был удостоен Государственной премии СССР за создание высокопроизводительных станов ХПТ с комплексом новых механизмов, и одним из важных механизмов в этом перечне был новый механизм уравнивания клетки.

Другой механизм стана ХПТ, для которого удачно были решены вопросы уравнивания, находится в кинематической цепи механизма подачи и поворота заготовки. Для полной реализации возможности повышения производительности станов, возникшей в связи с созданием эффективного уравнивающего устройства в приводе клетки, необходимо было усовершенствовать механизм подачи заготовки, работа которого при высокоскоростных режимах была неудовлетворительной.

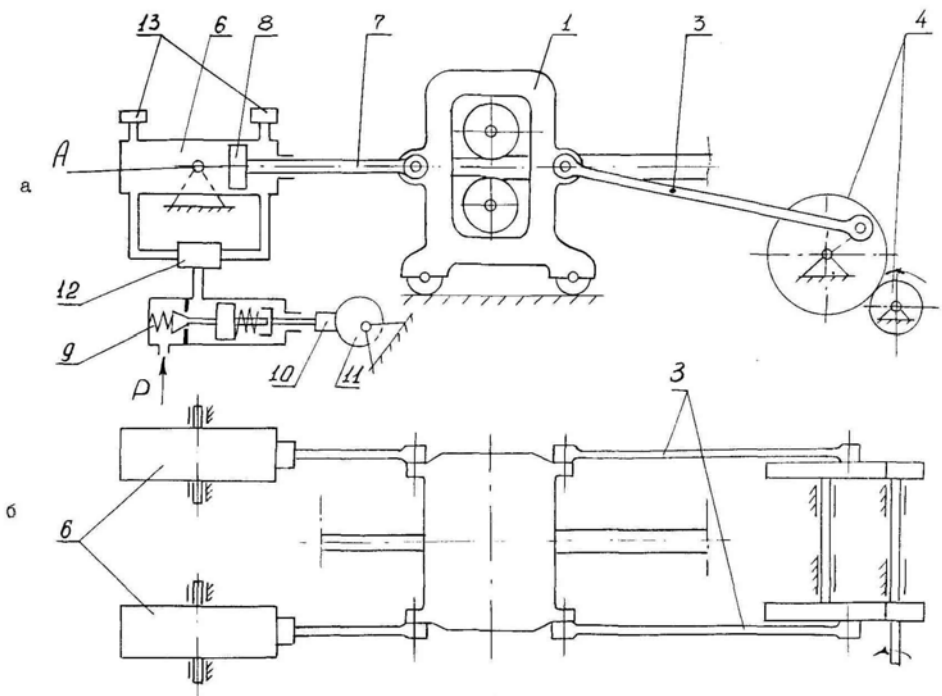


Рис. 4. Стан ХПТ с новым уравнивающим механизмом

Одна из наиболее распространенных разновидностей такого механизма в качестве базового элемента содержала муфту свободного хода, которая не обеспечивала стабильность величины подачи, что отрицательно сказывалось на качестве производимых труб [8]. Не имеющая данного недостатка другая разновидность на основе мальтийского механизма имела низкую надежность из-за высоких динамических нагрузок, возникающих в системе с большими приведенными к кривошипу переменными массами и высокими знакопеременными ускорениями, которые обусловлены особенностью конструкции и спецификой кинематических передаточных функций мальтийских механизмов.

Чтобы существенно снизить величины динамических реакций в кинематических парах системы подачи с мальтийским механизмом, было разработано уравнивающее устройство с тормозной системой, регулирующее ее работу в процессе движения механизмов. Это устройство позволило резко снизить динамические нагрузки и увеличить долговечность системы. Однако для высокоскоростных режимов эксплуатации оно оказалось малопригодным, так как не обеспечивало в должной мере уравнивание реакций в кинематической паре ролик кривошипа — паз мальтийского креста. Знакопеременность реакции приводила к раскрытию зазора в этой кинематической паре с последующим смыканием и ударом. С целью ликвидации указанного и некоторых других недостатков, а также уменьшения энергетических потерь было разработано принципиально новое уравнивающее устройство для мальтийских механизмов (рис. 5).

Здесь 1 и 2 — кривошип и крест мальтийского механизма. Профили-

рованный кулачок 3 жестко связан с крестом 2. Перекатывающийся по кулачку ролик 4 расположен на штоке 5 пневматического цилиндра 6, полость А которого соединена с воздушной магистралью через редукционный клапан 7. Когда кривошип располагается вдоль линии центров BB' , в полость А пневмоцилиндра подается воздух. При дальнейшем повороте кривошипа кинетическая энергия звеньев, движущихся с остановкой, превращается в потенциальную энергию сжатого воздуха. В начале периода стояния креста мальтийского механизма цилиндр 6 при помощи пневмоцилиндра 8 поворачивается на небольшой ($1-2^\circ$) угол, что обеспечивает ускоренный разгон механизма в последующей фазе поворота креста за счет энергии сжатого в цилиндре 6 воздуха. Отмеченное пневмокулачковое уравнивающее устройство позволило в несколько раз снизить динамические нагрузки в механизме подачи (для стана ХПТ-30-60 — в 4 раза).

В теоретических исследованиях, проектировании и доводке устройств данного типа принимали активное участие С. Н. Кожевников, А. С. Ткаченко, Б. М. Климовский, Ю. М. Черевик. Механизмы подачи многих действующих станков ХПТ были модернизированы с введением мальтийских механизмов и пневмокулачковых уравнивающих устройств. Аналогичные механизмы стали использоваться в новых станках ХПТ, серийно выпускаемых заводами тяжелого машиностроения.

Большой успех от сотрудничества науки и производства был достигнут при модернизации тяжелых кривошипно-трубных механических прессов, используемых при изготовлении высококачественных бесшовных труб, в том числе из вязких

сплавов. В процессе работы прессов на Никопольском южно-трубном заводе происходили тяжелые аварии, например неоднократные разрушения ведущего вала диаметром 400 мм, поломки зубчатых колес и другие отказы. Интенсификация производства труб на прессах потребовала проведения широких теоретических и экспериментальных исследований, в ходе которых было установлено наличие высоких динамических нагрузок и определены причины их возникновения. Среди мер, которые способствова-

ли снижению перегрузок и повышению надежности и долговечности, одна из важнейших — введение уравнивающего устройства (рис. 6) для выравнивания момента на валу пресса, исключившего раскрытие зазоров в зубчатых зацеплениях и крайне опасное последующее ударное приложение технологических нагрузок. Шток 2 пневмоцилиндра 1 устройства соединен с кривошипом 3 привода ползуна 4, осуществляющего прессование труб. Электрическое управление пневматическим клапаном 5

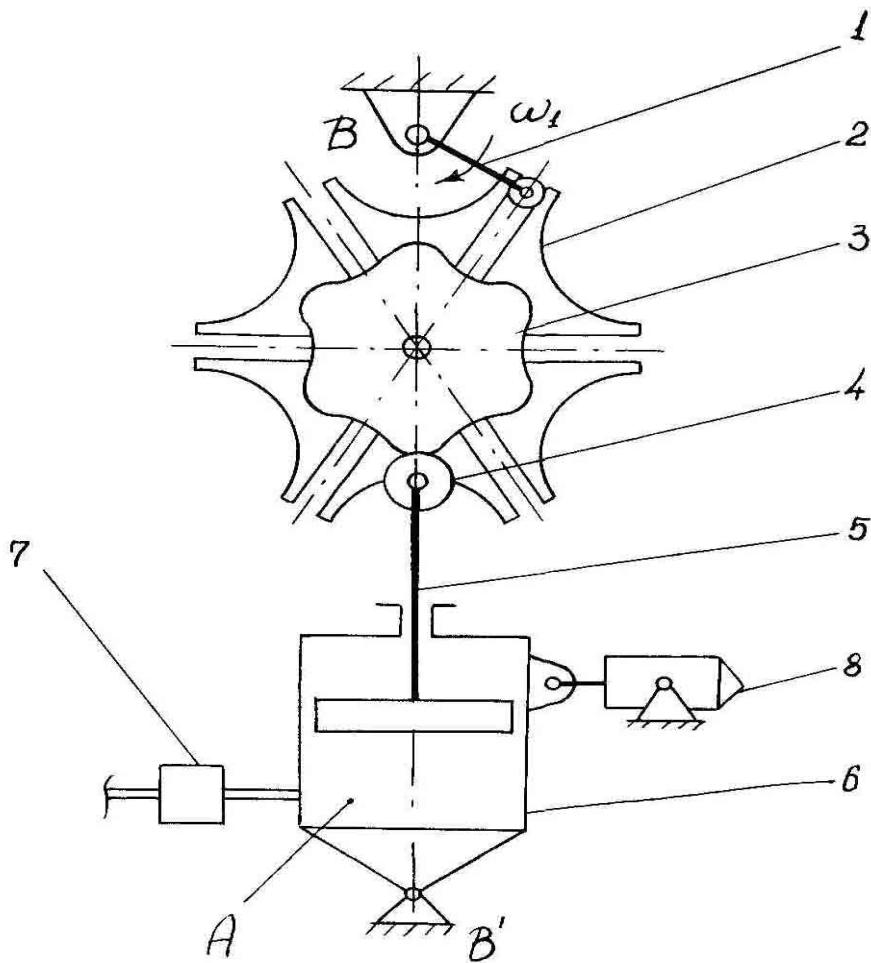


Рис. 5. Уравнивающее устройство для мальтийских механизмов

К ИСТОРИИ ПРОБЛЕМЫ МИНИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ...

и распределителем 6 осуществляется от командоаппарата, соединенного с коленчатым валом 3 пресса. Пневматический клапан предназначен для соединения полости А пневмоцилиндра с ресивером 7 (источником сжатого воздуха), обратный 8 и пропускной 9 клапаны служат для соединения полости В пневмоцилиндра с атмосферой и поддержанием заданного давления в этой полости. В исходном положении ползун занимает крайнее верхнее положение, клапан 5 открыт, а пневмораспределитель 6 соединяет полость В пневмоцилиндра с атмосферой, в результате чего создается

уравновешивающий момент, препятствующий образованию зазоров в зубчатых зацеплениях. Затем клапан 5 закрывается, воздух в полости А сжимается, создавая уравновешивающий момент необходимой величины. При прессовании трубы отпадает необходимость в уравновешивающем моменте, и пневматический клапан 5 и пневмораспределитель 6 соединяют полости А и В пневмоцилиндра 1 с ресивером.

Введение уравновешивающего устройства позволило значительно снизить динамические нагрузки, исключить раскрытие звзоров в зубчатых зацеплениях редуктора,

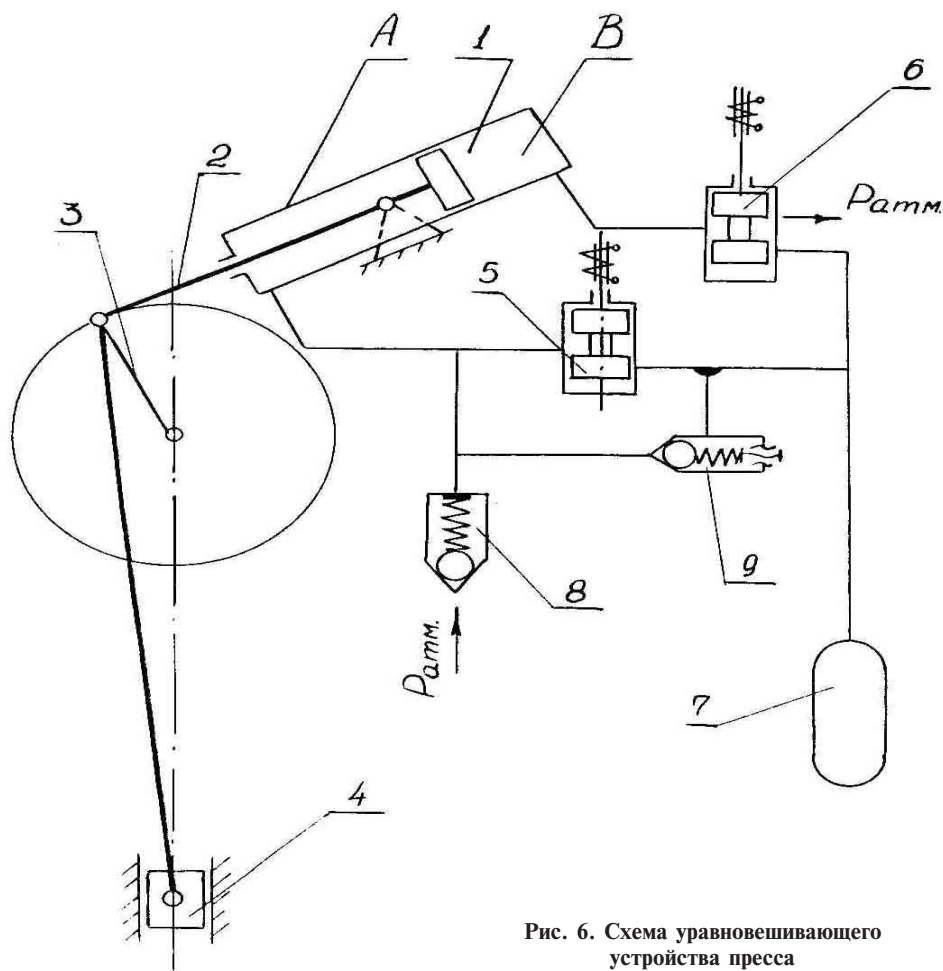


Рис. 6. Схема уравновешивающего устройства пресса

повысить надежность, долговечность и производительность. В создании устройства принимали участие С. Н. Кожевников, А. С. Малкин, А. С. Ткаченко, Б. Н. Лагутин, Б. М. Климковский. На Никопольском южно-трубном заводе были модернизированы несколько таких прессов, что принесло большой экономический эффект от увеличения производительности и снижения затрат на ремонт и эксплуатацию.

Следует отметить, что практический вклад С. Н. Кожевникова и его научной школы в совершенствование систем уравнивания тяжелых машин металлургической промышленности не ограничивается изложенными выше внедрениями в производство. Большой научно-технический задел по указанной проблеме содержится во многих публикациях, авторских свидетельствах и патентах, выданных в передовых в экономическом отношении странах — США, Англии, Германии, Франции, Италии, Швеции. По станам холодной прокатки труб лицензии проданы зарубежным странам

(Италия, Япония и др.). В некоторых зарубежных странах (например Аргентине) эксплуатируются станы ХПТ с разработанными С. Н. Кожевниковым и его учениками уравнивающими устройствами.

Значительные экономические результаты, достигнутые в вопросах оснащения тяжелых машин металлургической промышленности современными уравнивающими устройствами, и повышение таким образом их технического уровня подтверждают эффективность привлечения углубленных теоретических исследований для синтеза систем механизмов с целью снижения динамической нагруженности звеньев и увеличения надежности. При этом следует отметить ту особенность, что исследования были ориентированы на нахождение оптимального компромисса между остаточной неуравновешенностью и сложностью и надежностью системы уравнивания. Эти задачи были успешно решены и реализованы в технологическом оборудовании металлургических заводов.

1. *Артоболевский И. И.* Теория механизмов и машин: 4-е изд., перераб и доп. — М.: Наука, 1988. — 640 с.

2. *Экспериментальное* исследование станов прокатки труб с уравнивающими устройствами / С. Н. Кожевников, А. С. Ткаченко, А. А. Шведченко и др. // Динамика металлургических машин. — М.: Металлургия, 1969. — С. 135—139.

3. *Полищук В. П.* Инерционное уравнивание станов холодной прокатки труб // Стенограмма Всесоюзного совещания по автоматизации станов холодной прокатки труб. — Днепропетровск, 1961.

4. *Kirchbach H., Zeunert F.* Verbesserung des Gleichangs ud Steigerung der Drehzahl bei Kurbeltrieb-Arbeitmaschinen // VDI. — 1959. — № 10.

5. *Кожевников С. Н., Климковский Б. М., Ткаченко А. С.* Способы выравнивания нагрузок на приводном валу и уравнивание сил инерции возвратно-потупательно перемещающихся масс главного привода станов холодной прокатки труб // Механизация и автоматизация оборудования трубопрокатных станов: Тр. Ин-та черной металлургии НАН Украины (Днепропетровск). — М.: Металлургия, 1965. — С. 76—93.

6. *Ворожбин Б. А.* Пути уравнивания сил инерции талера двухоборотных плоскопечатных машин // Тр. Укр. полиграфического ин-та. — 1961. — Т. 14.

7. *Bohm K., Gladbach M.* Kaltpigerschritt Walzwerk. — Deutsches Patent n° 853138, 7a, Dr 16/01/1952.

8. *Анализ работы поворотного-подающих механизмов станов холодной прокатки труб / С. Н. Кожевников, Б. М. Климковский, А. С. Ткаченко, А. Г. Бондаренко // Модернизация и автоматизация оборудования трубопрокатных станов. — М.: Металлургия, 1965. — Т. 20. — С. 94—108.*