

7. Николаев В. А., Храмов С. Н. Аналитические модели давления запуска цилиндрических выхлопных диффузоров // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 2(58). – С. 13–16.

8. Баланин Б. А. Истечение сверхзвуковой струи в каналы различной формы // Инженерно-физический журнал (ИФЖ). – 1968. – Т. XV, № 1. – С. 91–97.

Получено 21.11.2016

9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

10. Храмов С. Н. Аналитическая модель максимального диаметра начального участка сверхзвуковой струи.

11. Николаев В. А., Храмов С. Н. Указ. соч.

УДК 621.914

Т. Р. Хазиев, филиал Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), Златоуст

Б. А. Лопатин, доктор технических наук, профессор, филиал Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), Златоуст

Е. А. Полуэктов, кандидат технических наук, филиал Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), Златоуст

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ ПРИВОДОВ ВРЕЗАНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАШИНЫ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

При ремонте трубопроводов для вырезки дефектных участков применяются специальные машины, где в качестве режущего инструмента используется дисковая фреза [1]. В России широкое распространение получила машина «Волжанка-3М», выпускаемая ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» (рис. 1). Машина устанавливается на трубе и закрепляется с помощью цепей (на рис. 1 не показано), охватывающих трубу. Надежное закрепление машины осуществляется с помощью натяжных устройств, включающих в себя амортизаторы 1, рычаги 2 с натяжной звездочкой 3. Машина работает следующим образом. Вращение от вала электродвигателя 4 через ременную передачу передается на ведущий вал редуктора 5. На выходном валу 6 этого редуктора установлена фреза 7. Врезание режущего инструмента производится винтовым механизмом врезания 8 путем поворота редуктора на цапфах, установленных в корпусе тележки 9.

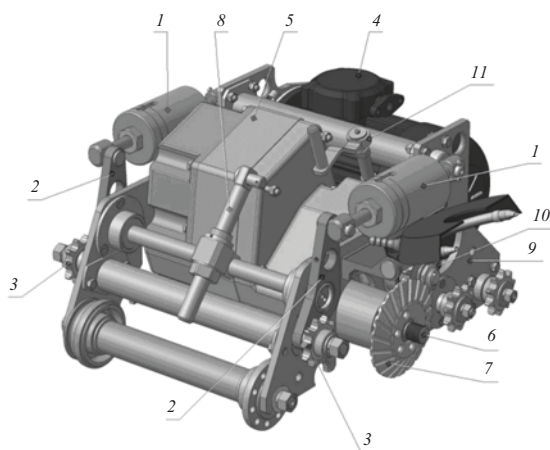


Рис. 1. Машина безогневой резки труб «Волжанка-3М»

Перемещение тележки 9 по трубе производится приводом подачи, который приводится в движение от выходного вала редуктора 5 привода вращения инструмента. Вращение от этого вала передается на приводную звездочку 10. Звездочка 10, находясь в зацеплении с неподвижной цепью, охватывающей разрезаемую трубу, приводит в движение тележку 9 и вместе с ней режущий инструмент 7. Включение подачи (перемещение машины по трубе) осуществляется механизмом включения 11. Рез осуществляется за счет перемещения машины по поверхности трубы. Данная машина была разработана сотрудниками кафедры технической механики филиала ЮУрГУ (НИУ) в г. Златоусте по заказу ЦБПО АО «Транснефть-Приволга» [2].

Несмотря на широкое применение этой машины, ее эксплуатация выявила ряд недостатков:

- жесткая кинематическая связь привода перемещения и привода вращения инструмента не позволяет регулировать скорость перемещения по трубе при резке труб разного диаметра и толщины, что часто приводит к преждевременному износу инструмента, недопустимому увеличению силы резания, вызывающей поломку инструмента или элементов привода;

- ручная врезка инструмента (фрезы) является небезопасной, так как оператор осуществляет работу вблизи зоны резания; особенно опасной является первая врезка инструмента, поскольку в трубопроводе могут присутствовать горючие остатки нефтепродуктов.

Для устранения указанных недостатков была предложена конструкция машины [3], оснащенная независимыми управляемыми приводами перемещения машины по трубе и врезания инструмента на основе вентильных электродвигателей. Такая конст-

рукция позволяет реализовать регулировку режимов резания и повысить безопасность работы оператора.

При исследовании нагруженности приводов машины [4] были установлены теоретические зависимости влияния внешних факторов, к которым относятся: сила резания, угловое положение машины на трубе, сила натяжения приводных цепей. Поскольку внешние факторы изменяются в ходе процесса резания по-разному и независимо друг от друга, то для обеспечения работы машины с рациональными режимами резания при резке труб с разным диаметром и толщиной стенки необходимо правильно произвести настройку системы управления приводами машины. В связи с этим для определения нагруженности приводов в цикле резки трубы при различных условиях резания и обеспечения надежности работы машины была разработана и исследована в среде визуального моделирования VisSim математическая модель работы приводов машины.

Модель работы привода перемещения представляет собой совокупность математических соотношений (блоков), описывающих ее поведение. Функциональная блок-схема моделирования работы привода перемещения приведена на рис. 2, где обозначено: I – блок управления, II – электродвигатель, III – внешние нагрузки. Работа привода осуществляется следующим образом. В блок управления на вход преобразователя PR подается питающее напряжение. С выхода блока «PR» питающее преобразованное напряжение  $U_{п}$  идет на вход блока «электродвигатель» в электрическую

часть двигателя «ЭЧ Дв». С выхода блока «ЭЧ Дв» снимается момент двигателя и идет на сумматор. На этот же сумматор поступает значение момента «внешние факторы» от силы резания, момента от трения в узлах трансмиссии машины и момента от веса машины. С сумматора сигнал идет на блок механической части электродвигателя «МЧ Дв», с выхода которого снимается скорость двигателя привода перемещения  $V_{дв}$ , она задает величину подачи инструмента в блоке «сила резания».

В модели реализована обратная связь по нагрузке, позволяющая корректировать работу привода в автоматическом режиме. В этом случае система управления ограничивает максимальный вращающий момент и скорость вращения на электродвигателе привода.

Блоки I и II описывают электрическую часть привода перемещения, а блок III содержит описание внешних факторов, действующих на машину.

Блок «внешние факторы» включает в себя влияние веса машины, силы трения в элементах трансмиссии и силы резания. В блоке «сила резания» рассмотрено воздействие на работу машины силы резания, возникающей в процессе резки трубопровода.

На рис. 3 представлен блок «сила резания». На входе в этот блок задаются необходимые параметры, а на выходе снимается момент от силы резания  $M_{Pz}$ . Среди входных параметров блока есть постоянные величины, обусловленные конструктивными размерами машины и инструмента, а также переменные – подача инструмента (на рис. 3 поз. 4).

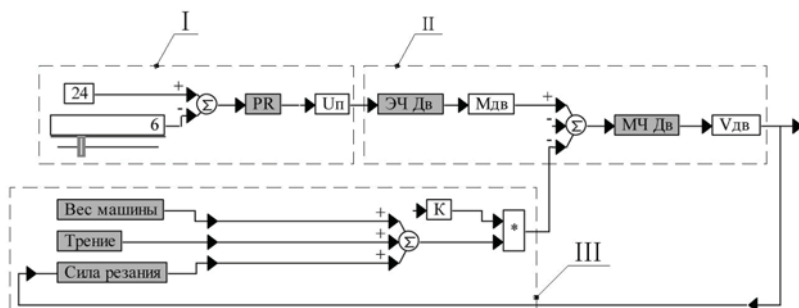


Рис. 2. Функциональная блок-схема моделирования работы привода перемещения

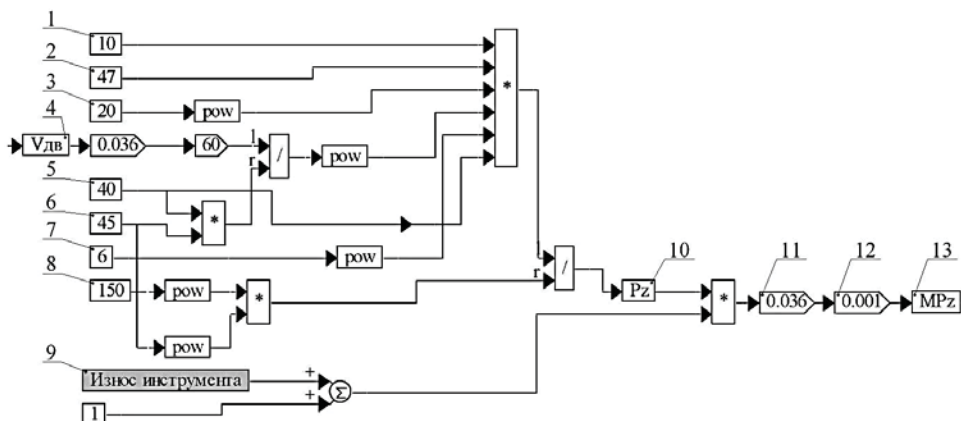


Рис. 3. Блок «сила резания»: 1 – коэффициент формулы резания; 2 – коэффициент  $C_p$ , учитывающий свойства материала; 3 – глубина резания  $t$ ; 4 – подача инструмента; 5 – число зубьев фрезы  $z$ ; 6 – частота вращения фрезы; 7 – ширина резания фрезы  $B_p$ ; 8 – диаметр фрезы; 9 – блок «износ инструмента»; 10 – выходное значение силы резания  $P_z$ ; 11 – делительный радиус приводной звездочки; 12 – передаточное число редуктора привода перемещения машины; 13 – выходное значение момента  $M_{Pz}$  от сил резания

В блоке «вес машины» (рис. 4) задается закон изменения усилия, необходимого для перемещения машины в зависимости от ее углового положения на трубе [5].

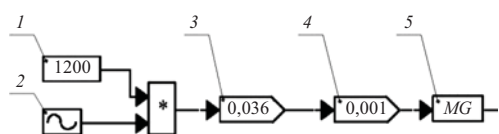


Рис. 4. Блок «вес машины»: 1 – вес машины; 2 – закон влияния углового положения машины; 3 – делительный радиус приводной звездочки; 4 – передаточное число редуктора привода перемещения машины; 5 – выходное значение момента от веса машины

В блоке «трение» на вход подается цифровое значение суммарного момента трения качения и трения скольжения в элементах трансмиссии машины, которое зависит от усилия натяжения приводных цепей. Анализ моментов трения в зависимости от внешних сил был произведен в математическом редакторе Mathcad.

В математическую модель работы привода перемещения заложен принцип стабилизации момента; влияние таких внешних факторов, как «вес машины» и «трение» стабилизируется за счет регулирования силы резания.

На рис. 5 представлены графики моментов нагрузки в ходе резки труб с толщиной стенки  $t = 10$  мм при стабилизации момента  $M_{ст} = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и натяжением приводных цепей  $P_1 = 4400 \text{ Н}$ ,  $P_2 = 6600 \text{ Н}$ ,  $P_3 = 8800 \text{ Н}$ . В режиме работы машины при натяжении приводных цепей с усилием  $P_1 = 4400 \text{ Н}$  значение момента нагрузки меньше значения  $M_{ст}$ , что обусловлено меньшей силой трения, а в режиме работы при усилении натяжения цепей  $P_2 = 6600 \text{ Н}$  и  $P_3 = 8800 \text{ Н}$  требуется ограничение момента нагрузки. Стабилизация момента достигается корректировкой силы резания (рис. 6). Значения  $M_{ст}$  принимаются из условия стойкости и прочности инструмента, а также элементов привода.

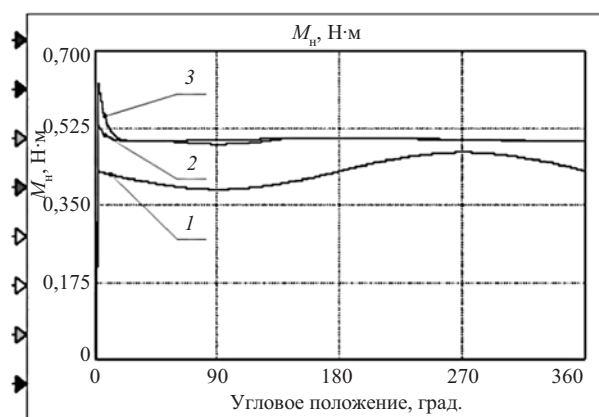


Рис. 5. Момент нагрузки на двигателе привода перемещения: 1 –  $P_1 = 4400 \text{ Н}$ ; 2 –  $P_2 = 6600 \text{ Н}$ ; 3 –  $P_3 = 8800 \text{ Н}$

Графики скоростей двигателя привода перемещения для разных усилий натяжения приводных цепей

представлены на рис. 7. Из графиков видно, что большому натяжению цепей соответствует меньшие обороты двигателя. Таким образом, с увеличением нагрузки на приводе подача инструмента замедляется и уменьшается сила резания. Благодаря уменьшению силы резания стабилизируется общая нагрузка привода на допустимом уровне.

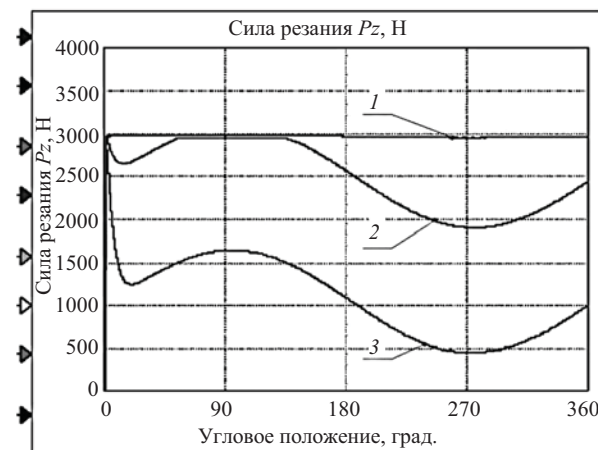


Рис. 6. Сила резания: 1 –  $P_1 = 4400 \text{ Н}$ ; 2 –  $P_2 = 6600 \text{ Н}$ ; 3 –  $P_3 = 8800 \text{ Н}$

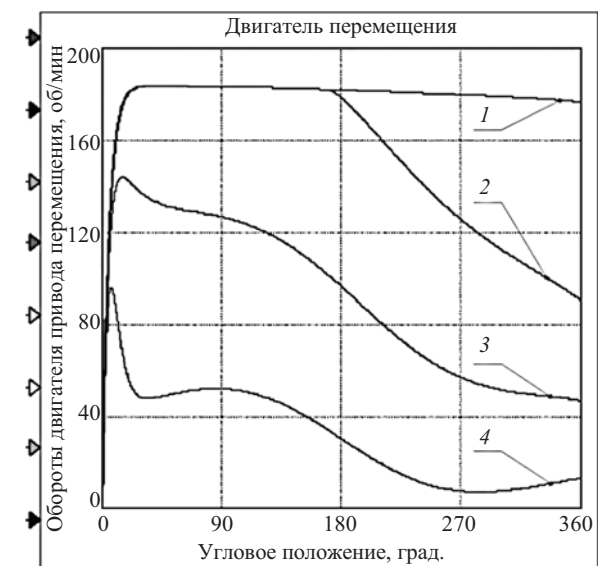


Рис. 7. Скорость двигателя привода перемещения: 1 –  $P_1 = 4400 \text{ Н}$  (без стабилизации); 2 –  $P_1 = 4400 \text{ Н}$ ; 3 –  $P_2 = 6600 \text{ Н}$ ; 4 –  $P_3 = 8800 \text{ Н}$

Математическая модель работы привода перемещения позволила оценить влияние внешних факторов и установить максимальные значения моментов нагрузки.

Реализация модели привода врезания инструмента в среде визуального моделирования VisSim выполнена аналогично модели привода перемещения. Отличие модели заключается в блоке «внешние факторы», в котором отсутствует внутренний блок «вес машины» и блок «трение». Кроме того, в блоке «сила резания» добавляются еще два переменных параметра – ширина резания и глубина.

При настройке системы управления рассматривались два варианта стабилизации нагрузки на приводе врезания: регулировка момента или скорости вращения двигателя. На рис. 8 приведен график момента с ограничением нагрузки, значения  $M_{ст}$  принимаются из условия прочности инст-

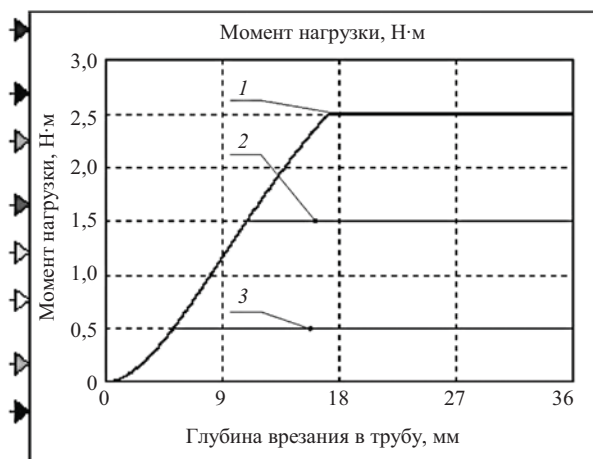


Рис. 8. Момент нагрузки на приводе врезания:  
1 –  $M_{ст} = 2,5$  Н·м; 2 –  $M_{ст} = 1,5$  Н·м; 3 –  $M_{ст} = 0,5$  Н·м

Модель привода врезания инструмента позволяет исследовать влияние внешних факторов на нагруженность привода.

Разработанные модели работы привода перемещения машины по трубе и привода врезания позволяют:

- оценить нагруженности приводов при резке труб различных диаметров и толщины стенок в цикле работы машины;

- назначить предельные величины моментов на приводах, обеспечивающих исключение поломки инструмента и элементов приводов;

- результаты исследования использовать при проектировании опытного образца машины «Волжанка-4» с независимыми приводами.

румента и элементов привода. Стабилизация момента на приводе врезания происходит путем регулирования силы резания. В процессе работы привода врезания регулировка силы резания осуществляется изменением подачи врезания фрезы (рис. 9).

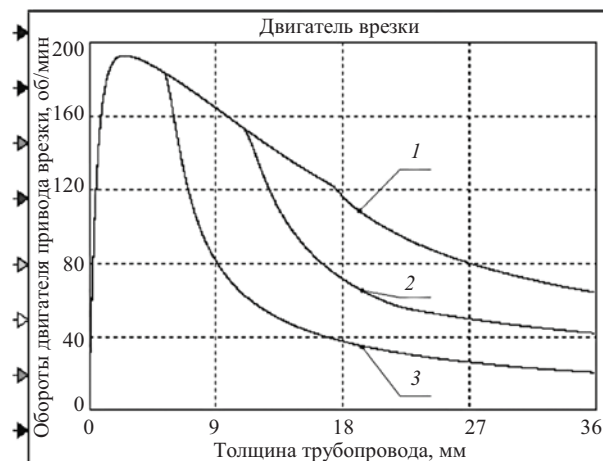


Рис. 9. Скорость двигателя привода врезания:  
1 –  $M_{ст} = 2,5$  Н·м; 2 –  $M_{ст} = 1,5$  Н·м; 3 –  $M_{ст} = 0,5$  Н·м

#### Библиографические ссылки

1. Грешняев В. А. Машина для безогневой резки труб «Волжанка-3М» // Трубопроводный транспорт нефти. – 2009. – № 8. – С. 18–20.
2. Пат. 94497 Российская Федерация, МПК В 23 D21/06. Устройство для резки труб / Б. А. Лопатин, Д. Б. Лопатин, Е. А. Полуэктов, Т. Р. Хазиев. – № 2010104653/22; заявл. 10.02.2010; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 3 с.
3. Пат. 130245 Российская Федерация, МПК В 23 D21/06. Устройство для резки труб / Б. А. Лопатин, Д. Б. Лопатин, Е. А. Полуэктов, Т. Р. Хазиев. – № 2012155841/02; заявл. 21.12.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 3 с.
4. Хазиев Т. Р., Лопатин Б. А. Исследование нагруженности приводов подачи машины для безогневой резки труб большого диаметра // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. – Серия «Машиностроение». – Вып. 2013. – С. 28–35.
5. Khaziev T. R., Lopatin B. A. Improved Design of Machine for Cold Cutting of Oil Pipes and Gas Pipelines // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 563–570.