

УДК 681.523

А.Т. РЫБАК, А.Г. ЕФИМЕНКО

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕМНОЙ ЖЁСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ МАШИН

Дана информация о методах расчёта коэффициента объёмной жёсткости элементов гидравлических приводов машин, предлагается описание стенда для экспериментальных исследований жёсткостных свойств трубопроводов гидравлических систем, включая и коэффициент объёмной жёсткости.

Ключевые слова: технологическая машина, гидравлический привод, трубопровод, объёмная жёсткость, эксперимент.

Введение. Методы расчёта силового гидравлического привода и других гидравлических систем, известные ещё 50 лет назад [1], широко применяются и сегодня. Они учитывают нарушение уравнения неразрывности потока во время работы на неустановившихся режимах [2, 3]. В работах В.П. Жарова и других авторов [4-7] в подобных случаях предлагается использовать такое свойство гидросистем, как их объёмная жёсткость, которое характеризуется коэффициентом приведенной объёмной жёсткости [4], равным приращению давления жидкости, соответствующему единичному приращению её первоначального объёма, происшедшему под действием этого приращения давления, или иначе – *приращению давления, необходимому для изменения первоначального объёма жидкости на единицу.*

Постановка задачи. В случае использования коэффициента приведенной объёмной жёсткости изменение во времени давления в любой точке гидравлической системы можно определить по формуле [8]

$$dp = C_{\text{пр}} (\Sigma Q_{\text{вх}} - \Sigma Q_{\text{вых}}) dt, \quad (1)$$

где dp – приращение давления жидкости за время dt ; $\Sigma Q_{\text{вх}}$ и $\Sigma Q_{\text{вых}}$ – суммарные расходы входящей в рассматриваемый объём и выходящей из него жидкости соответственно.

Коэффициент приведенной объёмной жёсткости рассматриваемого участка гидросистемы в этом случае определяется [9] как

$$C_{\text{пр}} = \frac{\prod_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{C_i} \prod_{i=1}^n C_i \right)}, \quad (2)$$

где $C_{\text{пр}}$ – коэффициент приведенной объёмной жёсткости гидравлической системы, состоящей из n совместно работающих элементов; C_i – коэффициент приведенной объёмной жёсткости i -го элемента системы.

В определенных случаях [8, 9] предлагаются формулы для вычисления коэффициента приведенной объёмной жёсткости наиболее распространённых элементов силового гидравлического привода.

Коэффициент приведенной объёмной жёсткости стенки цилиндрического трубопровода (цилиндрической оболочки) с учётом её деформации в радиальном и линейном направлениях можно вычислить по формуле

$$C_{\text{пр.ст}} = \frac{E_{\text{ст}}}{V_0} \cdot \frac{1}{\frac{2}{\bar{d}_{\text{тр}} - 1} + \frac{1}{\bar{d}_{\text{тр}}^2 - 1}}, \quad (3)$$

где $\bar{d}_{\text{тр}}$ – наружный диаметр цилиндрического трубопровода, отнесённый к его внутреннему диаметру, $\bar{d}_{\text{тр}} = d_{\text{н}}/d_{\text{тр}}$; V_0 – начальный объём рассматриваемого участка трубы; $E_{\text{ст}}$ – модуль упругости материала стенки трубопровода (модуль Юнга).

Коэффициент приведенной объёмной жёсткости трубопроводов. На практике деформация стенок трубы происходит одновременно с деформацией рабочей жидкости, которая движется по трубопроводу. В этом случае коэффициент приведенной объёмной жёсткости цилиндрического трубопровода рассчитывается по уравнению (2) с учётом коэффициента объёмной жёсткости про-

текающей через него рабочей жидкости, и также коэффициента приведенной объёмной жёсткости стенки цилиндрического трубопровода:

$$C_{\text{пр.тр}} = \frac{C_{\text{ж}} C_{\text{пр.ст}}}{C_{\text{ж}} + C_{\text{пр.ст}}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{пр.тр}}$ – коэффициент приведенной объёмной жёсткости рассматриваемого участка трубопровода; $C_{\text{ж}}$ – коэффициент объёмной жёсткости жидкости, содержащейся в объёме рассматриваемого участка трубопровода, $C_{\text{ж}} = \frac{E_{\text{ж}}}{V_0}$; $E_{\text{ж}}$ – объёмный модуль упругости жидкости,

$E_{\text{ж}} = 1/\beta_{\text{ж}}$; $\beta_{\text{ж}}$ – коэффициент объёмного сжатия жидкости [4].

Если деформацией трубопровода в осевом направлении можно пренебречь, то без учёта удлинения трубы для вычисления коэффициента приведенной объёмной жёсткости её стенки можно использовать уравнение [9]

$$C_{\text{ст}} = \frac{4E_{\text{ст}}}{\pi d^3 \frac{l}{\delta}}, \quad (5)$$

а формула для расчёта коэффициента приведенной объёмной жёсткости трубопровода примет вид

$$C_{\text{пр.тр}}^* = \frac{E_{\text{ж}}}{V_{\text{тр}} \left(1 + \frac{d}{\delta} \frac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}} \right)}, \quad (6)$$

где d и δ – внутренний диаметр и толщина стенки трубы соответственно; $V_{\text{тр}}$ – первоначальный внутренний объём рассматриваемого участка трубы.

С использованием свойства «объёмная жёсткость» можно рассчитывать изменение давления не только в трубопроводе, но и в различных элементах гидравлического привода.

Так, коэффициент приведенной объёмной жёсткости поршневой полости гидравлического цилиндра (без учёта изменения длины гильзы гидроцилиндра) можно вычислить из выражения

$$C_{\text{пр.п}} = \frac{4E_{\text{ж}}}{\pi d_{\text{ц}}^2 x \left(1 + \frac{d_{\text{ц}}}{\delta_{\text{ц}}} \frac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}} \right) + 4V_{\text{п.вр}}}, \quad (7)$$

где $d_{\text{ц}}$ и $\delta_{\text{ц}}$ – внутренний диаметр и толщина стенки гильзы гидроцилиндра в ненапряжённом состоянии, соответственно; x – ход поршня гидроцилиндра; $V_{\text{п.вр}}$ – объём вредного пространства поршневой полости гидроцилиндра.

Аналогично (7) коэффициент приведенной объёмной жёсткости *штоковой полости гидроцилиндра* можно вычислить как

$$C_{\text{пр.шт}} = \frac{4E_{\text{ж}}}{\pi(L-x) \cdot \left[(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{шт}}^2) + \frac{d_{\text{ц}}^3}{\delta_{\text{ц}}} \frac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}} \right] + 4V_{\text{шт.вр}}}, \quad (8)$$

где L – полный ход поршня гидроцилиндра; $d_{\text{шт}}$ – диаметр штока гидроцилиндра; $V_{\text{шт.вр}}$ – объём вредного пространства штоковой полости гидроцилиндра.

Для определения коэффициента приведенной объёмной жёсткости *рабочей полости плунжерного гидроцилиндра* (без учёта изменения длины гильзы гидроцилиндра) можно использовать формулу

$$C_{\text{пр.пл}} = \frac{4E_{\text{ж}}}{\pi \left[\frac{d_{\text{ц}}^3}{\delta_{\text{ц}}} \frac{E_{\text{ж}}}{E_{\text{ст}}} L - d_{\text{пл}}^2 (L-x) \right] + 4V_{\text{пл.вр}}}, \quad (9)$$

где $d_{\text{пл}}$ – внутренний диаметр плунжера гидроцилиндра в ненапряжённом состоянии соответственно; L – полный ход плунжера гидроцилиндра; $V_{\text{пл.вр}}$ – объём вредного пространства рабочей полости плунжерного гидроцилиндра.

Существуют выражения для определения коэффициентов приведенной объёмной жёсткости и некоторых других элементов гидравлических приводов [9].

Следует заметить, что все, представленные выше формулы по определению коэффициентов приведенной объёмной жёсткости различных элементов гидравлического привода, выведены для случая, когда модуль упругости материалов гидравлических элементов несоизмеримо выше модуля упругости собственно рабочей жидкости. Однако в современных гидравлических системах, особенно в машинах агропромышленного комплекса, широко используются резинокордные рукава высокого давления (РВД), трубопроводы из пластмасс и другие неметаллические конструкционные материалы. В этом случае коэффициент приведенной объёмной жёсткости элементов гидравлических систем определяют экспериментально.

На рис.1 даны примеры полученных экспериментально графиков зависимости от давления коэффициентов приведенной объёмной жёсткости различных РВД.

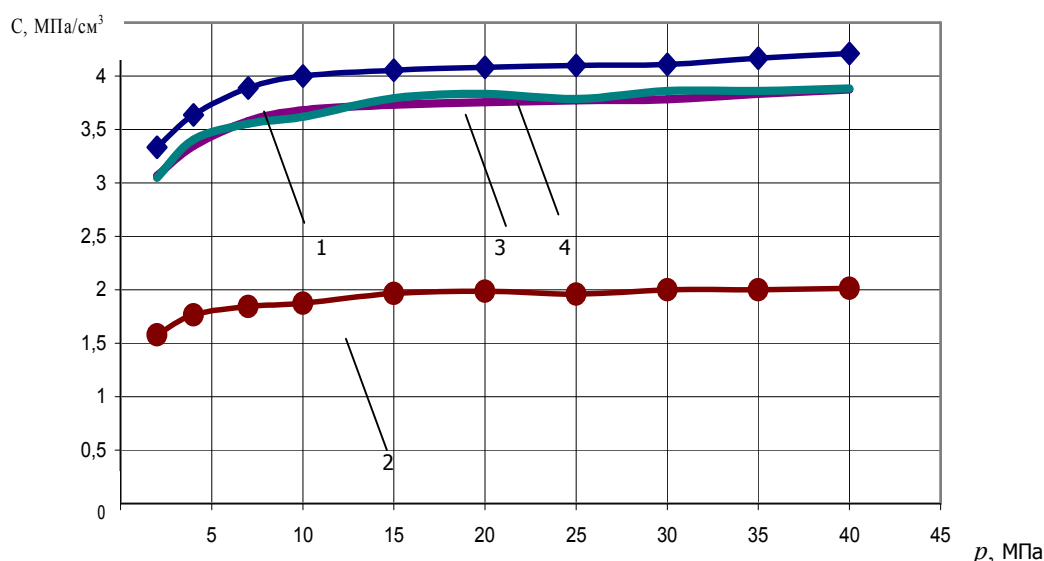


Рис. 1. Зависимость коэффициента приведенной объёмной жёсткости РВД от давления: 1 – РВД с диаметром условного прохода $d_1 = 16$ мм, длина которого 0,94 м; 2 – график зависимости от давления коэффициента приведенной объёмной жёсткости такого же РВД, длина которого 1,94 м; 3, 4 – соответственно графики зависимости от давления коэффициентов приведенной объёмной жёсткости тех же РВД, пересчитанных на 1 м их длины

Исследования показали [10], что коэффициенты приведенной объёмной жёсткости рукавов высокого давления с резинокордными оболочками в зоне низких давлений ($p < 15$ МПа) нелинейно возрастают. Такой характер изменения коэффициента приведенной объёмной жёсткости объясняется тем, что в указанной зоне изменения давления оболочка расширяется за счёт выборки зазоров между струнами плетеного металлического корда и деформации самой резиновой основы. При дальнейшем повышении давления внутри оболочки коэффициент её приведенной объёмной жёсткости изменяется линейно, так как в этом случае объём изменяется за счёт растяжения струн, образующих корд, т.е. оболочку с некоторым приближением можно рассматривать, как металлическую поверхность с определёнными жёсткостными характеристиками.

Доказано также, что для описания жёсткостных свойств рукавов высокого давления различной длины нет необходимости экспериментально определять коэффициенты приведенной объёмной жёсткости каждого из них. Достаточно знать коэффициент приведенной объёмной жёсткости единицы длины каждого типа оболочки, что позволит, используя уравнение (2), рассчитать коэффициент приведенной объёмной жёсткости рукава любой длины.

Метод расчёта гидравлических приводов машин на основе использования коэффициента приведенной объёмной жёсткости элементов гидравлических систем с успехом используется при исследовании систем приводов современных технологических машин [10, 11]. Но процесс изменения давления в гидравлической системе по умолчанию принимается квазистатическим, в расчётных формулах не учитываются диссипативные свойства материала гидравлических элементов и самой жидкости, что требует обоснования.

Экспериментальное определение коэффициента приведенной объёмной жёсткости трубопроводов. Предлагаем метод исследования диссипативных и жёсткостных свойств, наибо-

лее часто используемых в гидравлических приводах машин элементов – гидравлических трубопроводов.

На рис.2 изображена схема используемого для этой цели стенда. Основными элементами стенда являются: насосная станция малой подачи и высокого давления НС; стойка с кронштейном СТ достаточно жёсткой конструкции, чтобы их совместная деформация не влияла на качество проведения эксперимента; испытуемый трубопровод ТР.

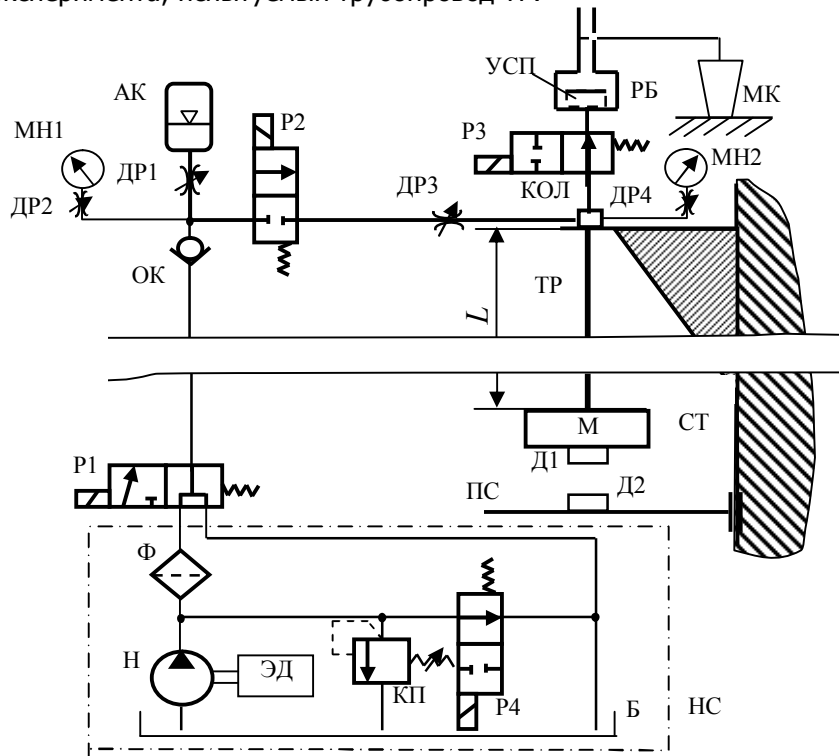


Рис. 2. Схема стенда для определения жесткостных характеристик гидравлических трубопроводов

Установка может работать в трёх режимах:

1. Снятие статической характеристики трубопровода – зависимости коэффициента его приведенной объёмной жёсткости от давления.
2. Определение колебательных свойств трубопровода при резком заполнении его полости жидкостью под давлением.
3. Определение колебательных свойств трубопровода при резком снятии давления – выпуске сжатой жидкости из внутренней полости трубопровода.

В первом режиме установка работает следующим образом. Насосная станция НС нагнетает рабочую жидкость в испытуемый трубопровод, закреплённый на коллекторе КОЛ, через распределитель Р1, обратный клапан ОК, распределитель Р2 и дроссель ДР3. Распределитель Р3 при этом закрыт. Уровень давления контролируется манометром МН2. При достижении давления заданной величины дроссели ДР3 и ДР4 закрываются, и открывается гидрораспределитель Р3, который соединяет внутреннюю полость трубопровода ТР с расширительным баком РБ, оснащённым успокоителем жидкости УСП. При расширении сжатой до заданного давления рабочей жидкости и сжатии самого трубопровода часть жидкости через расширительный бак РБ стекает в мерную колбу МК. По результатам замеров определяется коэффициент приведенной объёмной жёсткости трубопровода при заданном давлении.

Во втором режиме работа стенда заключается в следующем. При закрытом дросселе ДР3 и открытом распределителе Р3 насосной станцией НС поднимается давление в гидропневмоаккумуляторе АК до заданного уровня. Затем открывается дроссель ДР3 и закрывается распределитель Р3, а распределитель Р2 открывается. Жидкость, сжатая в гидроаккумуляторе, мгновенно устремляется в испытуемый трубопровод ТР, вызывая его деформацию в радиальном и линейном направлениях, а также сжатие рабочей жидкости, уже находящейся в нём. В этом случае масса М, закреплённая на нижнем конце трубопровода, будет осуществлять затухающие колебательные

движения. Для контроля частоты колебаний в стенде установлен вибродатчик Д1, а линейное перемещение массы М (удлинение трубопровода ТР) контролируется датчиком линейных перемещений Д2, установленным на подвижном столе ПС стойки СТ.

Третий режим работы стенда. После того как колебания массы М, вызванные резким удлинением трубопровода ТР, затухнут полностью, можно произвести его испытание в третьем режиме. Для этого дроссель ДРЗ закрывается, а распределитель РЗ открывается, что вызовет обратную деформацию (сокращение) трубопровода и расширение рабочей жидкости, которая, как и при первом режиме испытаний, отводится в расширительный бачок РБ, а параметры движения массы М, вызванного резким сокращением длины трубопровода ТР, контролируются датчиками Д1 и Д2.

Выводы. Предлагаемый стенд позволяет определить не только коэффициент приведенной объёмной жёсткости трубопровода, но и его (трубопровода) поведение при резких сменах давления во время переходных процессов, возникающих в гидравлических приводах машин и механизмов различного назначения. Испытания на таком стенде позволят также выявить влияние диссипативных сил, возникающих в трубопроводах гидравлических систем, на характер изменения давления в них при работе гидравлических приводов на переходных режимах.

Библиографический список

1. Розанов Б.В. Гидравлические прессы / Б.В. Розанов. – М.: Гос. науч.-техн. изд. машиностр. лит., 1959. – 428 с.
2. Анисимов А.В. Исследование в среде HYDROCAD регулируемого насоса типа 313 с регулятором мощности / А.В. Анисимов, А.И. Бутов, В.Л. Кондрашев [и др.] // Новые технологии управления движением технических объектов: сб. ст. по материалам 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Новочеркасск – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ. – 2004. – Вып.5. – С.129-134.
3. Водяник Г.М. Математическое моделирование потока жидкости в трубопроводе / Г.М. Водяник, А.В. Анисимов, Н.В. Дивулин // Новые технологии управления движением технических объектов: сб. ст. по материалам 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Новочеркасск – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ. – 2003. – Вып.4. – С.144-148.
4. Рыбак А.Т. Совершенствование научно-методологических основ проектирования систем привода технологических машин / А.Т. Рыбак, И.В. Богуславский // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т.10. – №2(45). – С.249-257.
5. Жаров В.П. Моделирование синхронной гидромеханической системы и анализ её динамики / В.П. Жаров, А.Т. Рыбак // СТИН. – 2007. – №2. – С.6-10.
6. Сердюков А.В. Влияние приведенной объёмной жёсткости гидромеханической системы пресс-молота на его технологические показатели / А.В. Сердюков, А.Т. Рыбак, В.П. Жаров // КШП. ОМД. – 2008. – №6. – С.26-30.
7. Рыбак А.Т. Моделирование и расчёт гидромеханических систем на стадии проектирования / А.Т. Рыбак. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 167 с.
8. Рыбак А.Т. Гидромеханические системы. Моделирование и расчёт: монография / А.Т. Рыбак. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 145 с.
9. Мирный В.И. Повышение эффективности быстродействующего гидравлического привода возвратно-поступательного движения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Ростов н/Д, 2008. – 21 с.
10. Затолокин С.А. Совершенствование теории и методов проектирования гидромеханических систем с насосно-аккумуляторным источником расхода постоянного давления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Ростов н/Д, 2009. – 18 с.

References

1. Rozanov B.V. Gidravlicheskie pressy / B.V. Rozanov. – M.: Gos. nauch.-tehn. izd. mashinostr. lit., 1959. – 428 s. – in Russian.
2. Anisimov A.V. Issledovanie v srede HYDROCAD reguliruemogo nasosa tipa 313 s regulyatorom moschnosti / A.V. Anisimov, A.I. Butov, V.L. Kondrashev [i dr.] // Novye tehnologii upravleniya dvizheniem tehnikeskikh ob'ektov: sb. st. po materialam 7-i Mejdunar. nauch.-tehn. konf., Novoherkassk – Rostov n/D: Izd-vo SKNC VSh. – 2004. – Vyp.5. – S.129-134. – in Russian.
3. Vodyanik G.M. Matematicheskoe modelirovanie potoka jidkosti v truboprovode / G.M. Vodyanik, A.V. Anisimov, N.V. Divulin // Novye tehnologii upravleniya dvizheniem tehnikeskikh ob'ektov: sb. st. po materialam 6-i Mejdunar. nauch.-tehn. konf., Novoherkassk – Rostov n/D: Izd-vo SKNC VSh. – 2003. – Vyp.4. – S.144-148. – in Russian.

4. Rybak A.T. Sovershenstvovanie nauchno-metodologicheskikh osnov proektirovaniya sistem privoda tehnologicheskikh mashin / A.T. Rybak, I.V. Boguslavskii // Vestnik DGTU. – 2010. – T.10. – №2(45). – S.249-257. – in Russian.
5. Jarov V.P. Modelirovanie sinhronnoi gidromekhanicheskoi sistemy i analiz ee dinamiki / V.P. Jarov, A.T. Rybak // STIN. – 2007. – №2. – S.6-10. – in Russian.
6. Serdyukov A.V. Vliyanie privedennoi ob'emnoi jestkosti gidromekhanicheskoi sistemy press-molota na ego tehnologicheskie pokazateli / A.V. Serdyukov, A.T. Rybak, V.P. Jarov // KShP. OMD. – 2008. – №6. – S.26-30. – in Russian.
7. Rybak A.T. Modelirovanie i raschet gidromekhanicheskikh sistem na stadii proektirovaniya / A.T. Rybak. – Rostov n/D: Izdatel'skii centr DGTU, 2006. – 167 s. – in Russian.
8. Rybak A.T. Gidromekhanicheskie sistemy. Modelirovanie i raschet: monografiya / A.T. Rybak. – Rostov n/D: Izdatel'skii centr DGTU, 2008. – 145 s. – in Russian.
9. Mirnyi V.I. Povyshenie effektivnosti bystrodeistvuyushchego gidravlicheskogo privoda vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.02. – Rostov n/D, 2008. – 21 s. – in Russian.
10. Zatolokin S.A. Sovershenstvovanie teorii i metodov proektirovaniya gidromekhanicheskikh sistem s nasosno-akkumulyatornym istochnikom rashoda postoyannogo davleniya: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.02. – Rostov n/D, 2009. – 18 s. – in Russian.

Материал поступил в редакцию 15.09.2010.

A.T. RYBAK, A.G. EFIMENKO

ON THREE-D RIGIDITY OF HYDRAULIC DRIVE MACHINES ELEMENTS

Calculation method for three-D rigidity coefficient of the elements of hydraulic drive machines is offered. Description of the stand for field research of the stiffness properties of the hydraulic systems pipelines, including three-D rigidity coefficient, is presented.

Key words - technological machine, hydraulic drive, pipeline, three-D rigidity, experiment.

РЫБАК Александр Тимофеевич (р. 1953), профессор кафедры «Технологическое оборудование» ДГТУ (2008), кандидат технических наук (1990), доцент (1998). Окончил РИСХМ (1979) по специальности «Приборы точной механики».

Область научных интересов – системы приводов технологического оборудования, моделирование и расчёт.

Автор более 100 научных работ.

rat_ritm@aaanet.ru

ЕФИМЕНКО Александр Геннадьевич (р. 1963), аспирант кафедры «Основы проектирования машин» Ростовского государственного университета путей сообщения (2009). Окончил РИСХМ (1991) по специальности «Технология машиностроения».

Область научных интересов – системы приводов технологического оборудования, моделирование и расчёт.

Имеет 1 научную публикацию.

Alexander T. RYBAK (1953), Professor of the Technological Equipment Department, Don State Technical University (2008). Candidate of Science in Engineering (1990), associate professor (1998). He graduated from Rostov Institute of Agricultural Engineering (1979).

Research interests: process equipment drive systems, modeling and computation.

Author of more than 100 scientific publications.

Alexander G. EFIMENKO (1963), Postgraduate student of the Machine Design Principles Department, Rostov State Transport University (2009). He graduated from Rostov Institute of Agricultural Engineering (1991).

Research interests - process equipment drive systems, modeling and computation.

Author of 1 scientific publication.