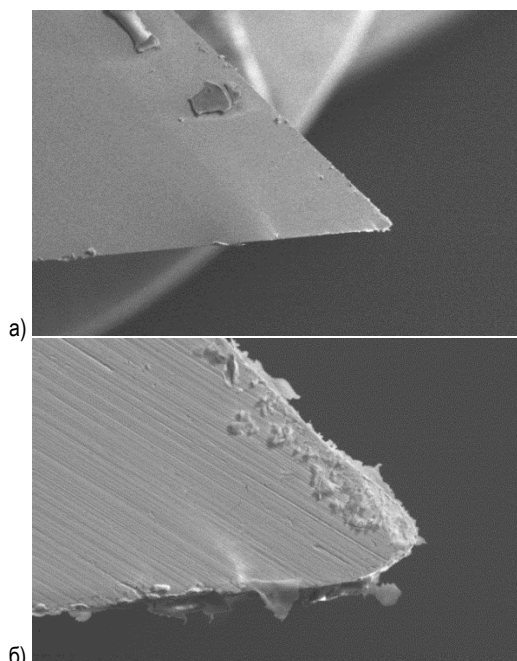


Производственные испытания твердосплавных ножей ВК8 проводили на УП Мебельная фабрика «Явид» г. Барановичи.

На рис. 6 представлены фотографии острия лезвия дереворежущего ножа из твердого сплава ВК8 перед началом производственных испытаний (рис. 6, а) и после испытаний упрочненным комбинированным методом (рис. 6, б).



а) до испытаний; б) после испытаний с КВО

Рис. 6. Фотографии острия дереворежущего ножа из твердого сплава ВК8 ($\times 100$)

Значение радиуса закругления всех дереворежущих ножей из твердого сплава ВК8 до производственных испытаний составляло 5 мкм (рис. 6, а).

Средний радиус закругления режущих кромок ножей, не обработанных КВО, по окончании испытаний составил 32 мкм (рис. 6, б).

Полученные результаты позволяют рекомендовать применение разработанного в ФТИ НАН Беларуси и УО «БарГУ» комбинированного высокоэнергетического метода упрочнения для упрочняющей обработки фрезерных ножей, изготовленных из твердого сплава ВК8 и применяемых для обработки деталей из различных древесных материалов.

Данные исследования проводились в рамках выполнения задания 5.2.07 «Разработка научных и технологических основ создания высокопрочных градиентных слоев на поверхности изделий из стали и сплавов, работающих в условиях ударных нагрузок, интенсивного износа, комбинированными методами высокоэнергетических и механических воздействий» Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» (подпрограмма «Высокоэнергетические технологии»).

Заключение. Таким образом, результаты проведенных исследований показывают высокую эффективность и перспективность разработанного специалистами ФТИ НАН Беларуси и УО «БарГУ» комбинированного метода высокоэнергетического воздействия дереворежущих ножей из твердого сплава ВК8. В результате комбинированной высокоэнергетической обработки дереворежущих ножей, значительно повысилась их износостойкость, а период их эксплуатации увеличился в 1,9 раз, что позволяет рекомендовать предложенный метод для использования в деревообработке.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Программа развития мебельного производства концерна «Беллесбумпром» на период до 2020 года – Мн.: Белорусский производственно-торговый концерн лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, 2014.
2. Алифанов, А.В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А.В. Алифанов, А.В. Акулов, Ж.А. Попова, А.С. Демянчик // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 77–83.
3. Алифанов, А.В. Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих ножей / А.В. Алифанов, Ж.А. Попова, А.С. Демянчик // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – С. 74–78.
4. Алифанов, А.В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А.В. Алифанов, Ж.А. Попова, Н.М. Ционенко // Литье и металлургия. – 2012. – № 4. – С. 151–155.
5. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
6. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, С.П. Кундас, А.П. Достанко; под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко, П.А. Витязя. – Мн.: Научный центр политехники и бизнеса Арианта – Маркетинг, Менеджмент, 1999. – 544 с.
7. Зверев, А.И. Свойства и применение детонационных покрытий / А.И. Зверев, Е.А. Астахов. – Киев: Знание, 1980. – 28 с.
8. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.

Материал поступил в редакцию 25.03.15

DEMYANCHIK A.S., NARANOVICH O.I. Influence of the combined high-energy processing on wear resistance of hard-alloy woodcutting knives

The results of pilot tests of saw blades made of carbide BK8 treated with combined high energy – deposition of hardening coatings and subsequent magnetic-pulse treatment was shown that the wear resistance of saw blades treated proposed in this paper the method is significantly higher than the same wear resistance of saw blades, rough at all; treated with knives showed increasing resistance of 1,9 times on the square timber milling operation of solid oak, which indicates a high efficiency and prospects of application of this method in the wood.

УДК 681.5+621.52

Прокопеня О.Н., Власовец А.А., Олех А.Г.

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ПРИВОДОВ РОБОТОВ МЕТОДОМ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛЮСОВ

Введение. Электромеханические приводы с двигателями постоянного тока (ДПТ) широко применяются в составе роботов. Традици-

онно такой привод строился как система автоматического регулирования (САР) по перемещению с использованием пропорционально-

Прокопеня Олег Николаевич, к.т.н., зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета.

Власовец Артем Алексеевич, магистрант кафедры автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета.

Олех Анна Григорьевна, м.т.н., ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

дифференциального (ПД) или пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регуляторов, которые обеспечивали приемлемое качество регулирования [1]. Метод размещения полюсов дает более широкие возможности для проектирования САР и теоретически позволяет обеспечить любые переходные характеристики. Для приводов роботов и других манипуляционных механизмов обязательным требованием является отсутствие перерегулирования [2]. Оно должно выполняться при изменении параметров привода, в частности приведенного к валу двигателя момента инерции.

Недостатком систем, синтезированных данным методом, является достаточно сложная структура [3]. Система получается многоконтурной, причем количество контуров обратной связи равно числу переменных состояния системы. Применительно к приводу перемещения на основе ДПТ получаем систему третьего порядка с переменными состояниями: перемещение выходного звена, скорость и ток двигателя. Для построения обратных связей указанные переменные должны измеряться, что требует соответствующих средств.

Поверхностный анализ проблемы показывает, что в частных случаях коэффициенты в цепях обратной связи по отдельным переменным могут быть равны нулю, то есть данные обратные связи могут отсутствовать. Это позволяет упростить структуру привода, уменьшить его массу и габариты, что актуально для приводов, устанавливаемых непосредственно на звеньях робота. Однако исключение обратных связей по отдельным переменным не должно ухудшать качество работы системы. Монотонный характер движения должен обеспечиваться при изменении параметров системы в достаточно широких пределах, а время регулирования не должно существенно изменяться. Подтверждение возможности практической реализации указанных приводов имеет важное значение для робототехники.

Постановка задачи. При синтезе рассматриваемым методом показатели качества переходного процесса задаются посредством назначения желаемых значений полюсов передаточной функции. Процедура синтеза позволяет найти значения коэффициентов обратной связи по отдельным переменным, обеспечивающие расположение полюсов в заданных точках на комплексной плоскости. Данная процедура реализуется соответствующей инструкцией в программе MatLab. Однако решение обратной задачи, т.е. поиск значений полюсов, при которых обеспечивается нулевое значение одного из коэффициентов в цепи обратной связи, численным методом сопряжено с большим объемом вычислений. Для решения данной задачи целесообразно получить аналитические зависимости указанных коэффициентов от значений полюсов. Данные зависимости дают возможность выявить условия существования решения поставленной задачи в каждом конкретном случае.

Следует иметь в виду, что на расположение полюсов также накладываются ограничения, обусловленные требованием обеспечения заданных показателей качества переходного процесса. Для отсутствия перерегулирования все полюсы должны быть вещественными, а для обеспечения заданного времени регулирования t_p абсолютное значение доминирующих полюсов не должно быть меньше $4/t_p$.

Применение привода без обратной связи по отдельным переменным состояниям на практике возможно только в случае, если такой привод обеспечивает заданное качество регулирования при возможном изменении его параметров. В первую очередь это изменение приведенного момента инерции, который зависит от массы объектов, с которыми работает робот. Данный параметр может изменяться в достаточно широких пределах. Анализ влияния изменяемых параметров на качество регулирования целесообразно выполнять численным методом. Для этого необходима соответствующая математическая модель.

Методика исследований. Метод размещения полюсов основан на описании объектов управления переменными состояниями.

Исходные уравнения, описывающие динамику привода:

$$\dot{\alpha} = k_p \omega; \quad (1)$$

$$J_{\text{ПР}} \cdot \dot{\omega} = C_M \cdot I_{\text{Я}}; \quad (2)$$

$$L_{\text{Я}} \cdot \dot{I}_{\text{Я}} + R_{\text{Я}} \cdot I_{\text{Я}} + c_e \cdot \omega = k_y U_{\text{Я}}, \quad (3)$$

где α – угол поворота выходного звена;

ω – угловая скорость двигателя;

$I_{\text{Я}}$ – ток якоря двигателя;

$J_{\text{ПР}}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции привода;

$L_{\text{Я}}$ – индуктивность обмотки якоря;

k_p и k_y – коэффициенты передачи редуктора и силового преобразователя.

Характеристическое уравнение замкнутой системы в матричной форме

$$|pI - A + BK| = 0. \quad (4)$$

Желаемое характеристическое уравнение

$$(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3) = 0, \quad (5)$$

где p_1, p_2, p_3 – желаемые значения полюсов.

Сравнивая (4) и (5), получаем значения коэффициентов усиления в цепях обратной связи (коэффициенты матрицы K).

$$k_1 = -p_1 p_2 p_3 \frac{L_{\text{Я}} J_{\text{ПР}}}{C_M k_y k_p}, \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{J_{\text{ПР}} L_{\text{Я}}}{C_M k_y} (p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_1 p_3) - \frac{c_e}{k_y}, \quad (7)$$

$$k_3 = -\frac{L_{\text{Я}}}{k_y} (p_1 + p_2 + p_3) - \frac{R_{\text{Я}}}{k_y}. \quad (8)$$

Из уравнений (7), (8) следует, что теоретически могут быть обеспечены нулевые значения коэффициентов k_2 и k_3 при выполнении условий, соответственно

$$p_1 p_2 + p_2 p_3 + p_1 p_3 = \frac{c_e C_M}{J_{\text{ПР}} L_{\text{Я}}}, \quad (9)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = -\frac{R_{\text{Я}}}{L_{\text{Я}}}. \quad (10)$$

Поскольку правая часть уравнений (9), (10) фиксирована, то она накладывает ограничение на абсолютное значение полюсов и соответственно, быстродействие привода. Наибольшее быстродействие привода обеспечивается при кратных значениях полюсов. Если $p_1 = p_2 = p_3 = p^*$, то время регулирования приблизительно может быть оценено по формуле

$$t_p = 7,5 / p^*. \quad (11)$$

Соответственно, из (7) при $k_2=0$ получаем

$$p^* = \sqrt{\frac{c_e C_M}{3 J_{\text{ПР}} L_{\text{Я}}}}, \quad (12)$$

$$k_1 = \frac{c_e}{3 k_y k_p} \sqrt{\frac{c_e C_M}{3 J_{\text{ПР}} L_{\text{Я}}}}, \quad (13)$$

$$k_3 = -\frac{1}{k_y} \left(\sqrt{\frac{3 c_e C_M L_{\text{Я}}}{J_{\text{ПР}}}} - R_{\text{Я}} \right). \quad (14)$$

Аналогично, из (8) при $k_3=0$ получаем

$$p^* = -\frac{R_{\text{Я}}}{3 L_{\text{Я}}}, \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{J_{\text{ПР}} R_{\text{Я}}^3}{27 L_{\text{Я}}^2 C_M k_y k_p}, \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{J_{\text{ПР}} R_{\text{Я}}^2}{3 L_{\text{Я}} C_M k_y} - \frac{c_e}{k_y}. \quad (17)$$

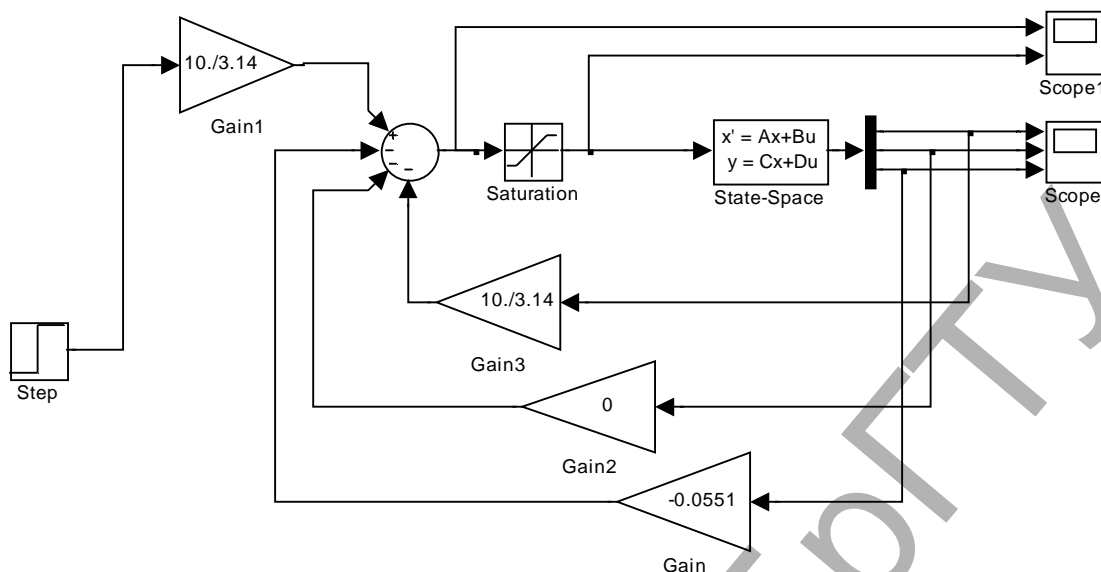


Рис. 1. Модель привода в приложении Simulink

Формулы (12), (15) с использованием (11) позволяют оценить время регулирования при отсутствии обратной связи по скорости и току двигателя соответственно. Из (12), (15) получаем условие отсутствия обратных связей по скорости и току одновременно

$$\frac{C_e C_M}{J_{ГР}} = \frac{R^2_{Я}}{3L_{Я}} \quad (18)$$

Анализ параметров серийно выпускаемых двигателей показывает, что для подавляющего большинства из них данное условие не выполняется. Поэтому с практической точки зрения можно рассматривать возможность синтеза приводов методом размещения полюсов при отсутствии обратной связи только по одному из параметров. Для реализации такой возможности необходимо выполнение следующих условий:

- 1) обеспечиваемое в соответствии с (11) время регулирования должно соответствовать предъявляемым к приводу требованиям;
- 2) заданное качество регулирования должно обеспечиваться при изменении параметров привода в допустимых пределах;
- 3) для приводов роботов заданное качество регулирования должно сохраняться при изменении приведенного момента инерции в достаточно широких пределах.

Проверку выполнимости двух последних условий можно выполнить численным моделированием. Для этого была разработана математическая модель привода в приложении Simulink программы MatLab (рис. 1).

В модели предусмотрен вывод всех переменных состояния, а также сигналов на входе и выходе нелинейного элемента. Это дает возможность контролировать пределы изменения всех сигналов и возможность перехода системы в нелинейный режим работы.

Результаты исследования и обсуждение. Возможность построения приводов без обратной связи по одной из переменных состояния была исследована для двигателей серии 2П [4] защищенного исполнения для роботов и станков с числовым программным управлением. Анализ с помощью вышеприведенных формул показал, что время регулирования (время перемещения звена из одного крайнего положения в другое) не превышает 1 с, как при отсутствии обратной связи по скорости, так и при отсутствии обратной связи по току. Такое быстрое действие вполне приемлемо для большинства манипуляционных роботов с позиционной системой управления (с перемещением от точки к точке). Следовательно, оба варианта могут быть использованы при условии обеспечения остальных требований.

Исследование переходных характеристик с помощью численного моделирования при варьировании параметрами привода также показало, что характер переходных процессов существенно не изменяется при отклонении отдельных параметров от расчетных значений на 8...10% (для некоторых на 12...15%). Таким образом, измене-

ние параметров привода в процессе работы вследствие повышения температуры и влияния других факторов не будет приводить к ухудшению качества регулирования.

Далее с помощью математической модели был выполнен анализ качества регулирования при изменении приведенного момента инерции привода. Ниже приводятся результаты моделирования для привода с двигателем 2ПБ90М мощностью 0,28 кВт.

Расчет коэффициентов обратной связи для обеспечения $k_2=0$ выполнен в соответствии с (13), (14) для максимального момента инерции (при перемещении роботом груза наибольшей массы), который принят в 2,5 раза больше минимального (при перемещении робота без груза). Анализ переходных характеристик (рис. 2) показывает, что уменьшение момента инерции вплоть до минимального значения не отражается существенно на показателях качества (перерегулирование отсутствует). Однако при увеличении момента инерции даже на небольшую величину появляется перерегулирование. Кривая с перерегулированием 1% соответствует повышению момента инерции на 20% относительно расчетного. Таким образом, будучи настроенным на максимальный момент инерции, привод способен обеспечить заданные показатели качества при изменении момента инерции во всем рабочем диапазоне.

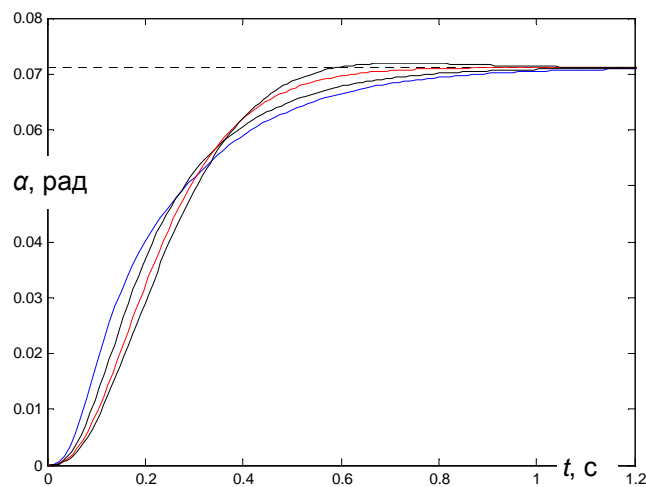


Рис. 2. Переходные характеристики по угловому перемещению привода без обратной связи по скорости при изменении $J_{ГР}$ в пределах (0,4...1,2) $J_{РАСЧ}$ ($J_{РАСЧ}$ – значение приведенного момента инерции, при котором рассчитывались коэффициенты в цепях обратной связи)

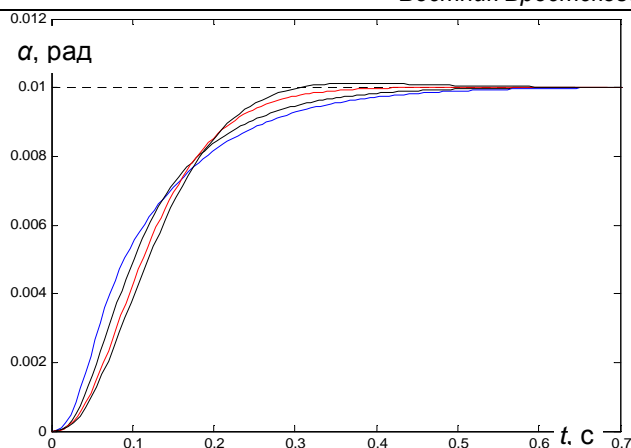


Рис. 3. Переходные характеристики по угловому перемещению привода без обратной связи по току при изменении $J_{пр}$ в пределах $(0,4...1,2) J_{расч}$

Аналогично выполнен расчет коэффициентов обратной связи для обеспечения $K_3=0$ по формулам (16), (17). При данной настройке привода влияние изменения момента инерции на переходные характеристики примерно такое же, как и при отсутствии обратной связи по скорости (рис. 3). Перерегулирование появляется только при увеличении момента инерции относительно расчетного значения на 10% и более. Абсолютное значение полюсов для указанного двигателя по (15) несколько больше, чем по (12), что обеспечивает несколько меньшее время регулирования. Однако в обоих случаях оно не превышает 1 с (рис. 2, 3), что согласуется с расчетным значением по (11). Подобные результаты получаются и для других двигателей данной серии.

Таким образом, результаты исследования подтверждают возможность построения приводов для робототехнических устройств на основе двигателей постоянного тока без обратной связи по скорости или току двигателя при синтезе методом размещения полюсов. Следует отметить, что ограничение уровня сигнала на выходе устройства сравнения (переход в нелинейный режим) не отражается существенно на характере переходного процесса (незначительно возрастает время регулирования). Поэтому ограничение уровня задающего сигнала на входе не является обязательным для данных приводов.

Заключение. Результаты исследования подтверждают возможность построения приводов постоянного тока без обратной связи по скорости или току двигателя, и тем самым, минимизации структуры привода, при синтезе методом размещения полюсов. Обеспечиваемые при этом показатели качества переходного процесса позволяют применять данные приводы в составе роботов. Полученные аналитические зависимости дают возможность предварительно оценить длительность переходных процессов и рассчитать коэффициенты передачи в цепях обратной связи, не прибегая к стандартной процедуре синтеза.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Накано, Э. Введение в робототехнику / Э. Накано; пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 334 с.
2. Шахинпур, М. Курс робототехники / М. Шахинпур; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
3. Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор; пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
4. Копылов, И.П. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.

Материал поступил в редакцию 25.11.15

PROKOPENYA O.N., VLASOVETS A.A., OLYOH A.G. Specificity of synthesis of robots drives by a method of poles arrangement

Possibility of creation of drives on the basis of direct-current motors without feedback on separate state variables at synthesis by a method of poles arrangement is well-founded. Conditions, a feedback on speed or a motor current can be unused, are formulated in the form of analytical dependences. Formulas for calculation of gains in circuits of the feedback are obtained, and it allows, the synthesis procedure can be simplified.

By numerical simulation it is confirmed that required quality of control are ensured in broad range of change of a moment of inertia of the drive. It allows such drives be applied for robots.

УДК 621.89

Акулич Я.А., Акулич А.П.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАР ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРИРАБОТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Введение. Приработка во многом определяет общую долговечность деталей. К концу процесса приработки основные взаимосвязанные параметры качества поверхности, например такие, как шероховатость, микротвердость, структура граничного слоя металла и ряд других, приобретают значения, соответствующие данным условиям изнашивания или эксплуатации. Эти условия определяются материалом пар трения, скоростью скольжения, нагрузкой, способом смазывания, а также некоторыми другими факторами.

Крагельский И.В. одним из основных условий завершения процесса приработки считает переход исходной технологической шероховатости к эксплуатационной [1]. Экспериментальные исследования, приведенные в работах [2, 3], показали, что по окончании приработки на поверхностях трения формируется шероховатость, кото-

рая не зависит от исходной, полученной при механической обработке, а будет зависеть только от условий изнашивания. Данная шероховатость будет являться оптимальной для данных условий трения и обеспечивать оптимальный износ пары трения.

Подготовка экспериментального исследования взаимодействия пар трения в процессе приработки. По мнению Д.Н. Гаркунова [4], наиболее оптимальным вариантом является такая компоновка пары трения, когда сравнительно мягкая поверхность одной из деталей трения с меньшей площадью трения скользит по более твердой поверхности другой детали. При этом, коэффициент трения скольжения чувствителен к материалам пар трения, скоростям скольжения, давлению, видам смазки, качеству обработки трущихся поверхностей.

Акулич Антон Павлович, к.т.н. доцент, доцент кафедры технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

Акулич Ярослав Антонович, м.т.н., зам. декана факультета заочного обучения учреждения образования Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.