

ходе и в полюсе их зацепления. Получены уравнения максимальных контактных напряжений, размеров участка контакта и радиусов кривизны фланкированных участков зубьев.

2. Установлено, что при наличии профильной модификации на нескольких участках рабочих поверхностей зубьев шестерни и колеса существенно снижается величина максимальных контактных напряжений. Указанное снижение напряжений приводит к росту погрузочной способности зубчатой передачи приблизительно в 2...3 раза.

3. Данная профильная модификация зубьев позволяет в процессе эксплуатации уменьшить ударное нагружение и осуществить плавное зацепление зубьев, что приводит к улучшению виброакустических характеристик зубчатой передачи.

4. Анализ предварительно выполненных исследований указывает на возможность повышения эффективности рассматриваемой зубчатой передачи заменой начального линейного контакта точечным контактом. В связи с этим, в последующем целесообразно провести исследование зубчатой передачи с пространственной точечной системой зацепления зубьев.

**Список литературы:** 1. Попов А.П. Контактная прочность зубчатых механизмов. – Николаев: Изд-во НУК, 2008. – 580с. 2. Попов А.П. Нагрузочная способность энкайтных зубчатых передач по контактному напряжению // Вестн. Национал. Техн. Университета "ХПИ". – Харьков, 2004. – № 30 – С.61–68. 3. Попов А.П. Нагрузочная способность зацепления Попова А.П. по контактному напряжению // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Харьков, 2003. – С.95–104. 4. Попов А.П., Кипреев Ю.Н. Снижение виброакустических характеристик зубчатых передач // Сб. трудов XV Междунар. науч.-техн. конф. "Машиностроение и техносфера XXI века". – Донецк, 2008. – Т.3. – С.104–109. 5. Патент 84606 на винахід. Україна. Зубчаста передача з рівномірним зацепленням евольвентних зубів / О.П. Попов (Україна). – а200611795; Заявл. 09.01.06; Опубл. 10.11.08. Бюл. №21. 6. Патент 81008 на винахід. Україна. Зубчаста передача Попова О.П. з точковою і двопарною системою зацеплення евольвентних зубів / О.П. Попов (Україна). – а200507850; Заявл. 08.08.05; Опубл. 21.11.07. Бюл. №19. 7. Патент 29612 на корисну модель. Україна. Зубчаста передача з точковою і трипарною системою зацеплення евольвентних зубів / О.П. Попов (Україна). – а200706154; Заявл. 04.06.07; Опубл. 25.01.08. Бюл. №2. 9. Патент 35343 на корисну модель. Україна. Зубчаста передача з точковою і чотирипарною системою зацеплення евольвентних зубів / О.П. Попов, Ю.М. Кипреев (Україна). – 200805267; Заявл. 22.04.08; Опубл. 10.09.08. Бюл. №17.

*Поступила в редколлегию 01.06.09*

УДК 621.833.031

*А.Г. ПРИЙМАКОВ*, к.т.н., профессор ХГТУСА, г. Харьков  
*А.В. УСТИНЕНКО*, к.т.н., доцент НТУ "ХПИ", г. Харьков

### **САМОРЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПАР С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ**

У статті автори розглядають створення загальної методології використання теорії поверхневої міцності стосовно явищ саморегулювання процесів руйнування зубчастих пар під час експлуатації і на стадії проектування.

In the article authors consider the common methodology creation of the use of superficial durability theory in relation to the self-regulation phenomena of toothed pair destruction processes during exploitation and on the stage of planning.

**Введение.** Теория поверхностной прочности (ПП) представляет собой универсальный и достаточно точный [1...4] инструмент синергетики – науки о структурной приспособляемости вторичных структур триботехнических систем (ТС), например, зубчатых пар.

Целью данной статьи авторы предполагают создание общей методологии использования теории ПП применительно к явлениям саморегулирования процессов разрушения зубчатых пар во время эксплуатации и на стадии проектирования.

**1. Явление саморегулирования процессов разрушения зубчатых пар.** Явление саморегулирования процессов разрушения и восстановления вторичных структур выявлены с помощью методов электрохимического потенциала, электронной микроскопии, калориметрирования, изменения электромагнитных параметров поверхностных слоев [1]. Закономерности этого явления состоят в свойстве термодинамической системы трения (начиная с момента окончания приработки – после периода релаксации) поддерживать сколь угодно долго стационарность всех термодинамических и структурных параметров.

В результате исследований были установлены явления стационарности и минимальности теплового потока [1, 2] (рисунок 1), стационарности установившейся относительной площади вторичных структур и субмикрорельефа [2, 3], стационарности электродного потенциала, определяющего физико-химическую активность поверхности [1]. Эти явления объясняют известный факт стационарности микрорельефа (исследования М.М. Хрущева и П.Е. Дьяченко).

В результате исследования механизма нормального износа и условий возникновения повреждаемости установлены следующие основные условия

нормального износа. Динамическое равновесие процессов разрушения и восстановления вторичных структур при неизменных параметрах трения (нагрузках, скоростях, средах и т.п.) реализуется при условии  $v_p'' = v_b''$ , где  $v_p''$  – скорость разрушения вторичных структур и  $v_b''$  – скорость их восстановления.

Метаустойчивое состояние поверхности трения как следствие динамического равновесия достигается в тех случаях, когда  $S_{пл} = \text{const}$ , где  $S_{пл}$  – суммарная площадь поверхности трения, покрытая пленкой вторичных структур при неизменных параметрах трения.

Устойчивость динамического равновесия ( $v_p'' = v_b''$ ) в некотором диапазоне параметров трения материалов и условий среды достигается, если  $p < p_{кр}^{v_i}$ ,  $C_i$ ;  $v < v_{кр}^{p_i}$ ,  $C_i$ ,

где  $p_{кр}^{v_i}$ ,  $C_i$  – критические значения нагрузки для некоторого фиксированного значения скорости  $v_i$  и параметров трения  $C_i$ ;  $v_{кр}^{p_i}$ ,  $C_i$  – критические значения скорости для некоторого фиксированного значения нагрузки  $p_i$  и параметров  $C_i$ . Причем в этом диапазоне  $v$ ,  $C$ ,  $p$  заданному изменению параметров соответствует определенное время переходного процесса.

Приведенные закономерности, подтверждаемые экспериментально, позволяют прийти к заключению о наличии явления саморегулирования при износе металлов [1].

Для рассмотрения механизма саморегулирования процессов разрушения и восстановления вторичных структур физическая модель нормального износа была описана структурной схемой.

Процесс, происходящий в тончайших поверхностных слоях, условно может быть разделен на три этапа: 1) деформирование и активация; 2) образование вторичных структур; 3) разрушение вторичных структур.

Работа связей вызывает пластическое деформирование тонких слоев металла. При этом плотность несовершенств достигает значений насыщения. Термодинамически неустойчивое состояние металла в процессе деформирования вызывает его резкую активацию. Материальный контакт активированного слоя и имеющихся в зоне трения активных компонентов среды (в частности, кислорода) приводит к их физико-химическому взаимодействию – образованию вторичных структур. В результате многократного нагружения и

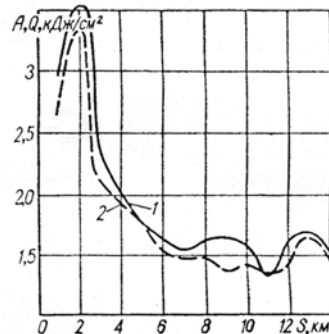


Рисунок 1 – Зависимость энергетических соотношений от пути трения  $s$  для пары трения медь-медь при  $p=1,1$  МПа,  $v=0,34$  м/с в поверхностно-активной среде:  
1 – затраченная работа;  
2 – выделившаяся теплота

наличия внутренних напряжений в пленке вторичных структур происходит образование и развитие микротрещин, а на поверхности раздела пленки и основного металла – ослабление связей и отслаивание пленки. Последующие механические воздействия приводят к разрушению и уносу пленки. На обнаженных (ювенильных) участках процесс повторяется. Вследствие неравномерности нагружения и неоднородности характеристик пленки на поверхности контакта одновременно присутствуют все три фазы описанного процесса.

Рассмотренная физическая модель может быть представлена структурной схемой (рисунок 2,а), в которой приняты следующие обозначения:  $S$  – общая площадь контакта;  $S_{пл}$  – площадь, покрытая пленкой;  $S_p$  – часть  $S_{пл}$ , подвергающаяся разрушению;  $S_b$  – часть ювенильной поверхности, на которой произошло восстановление пленки;  $z$  – толщина пленки;  $i=kzS_p$  – скорость износа;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $\varepsilon$  – рассогласование, равное площади обнаженной поверхности в каждый момент времени, т.е.  $E=S_p-S_b$ ; нагрузка  $p$  и скорость скольжения  $v$  объединены в один вектор ( $q$ ).

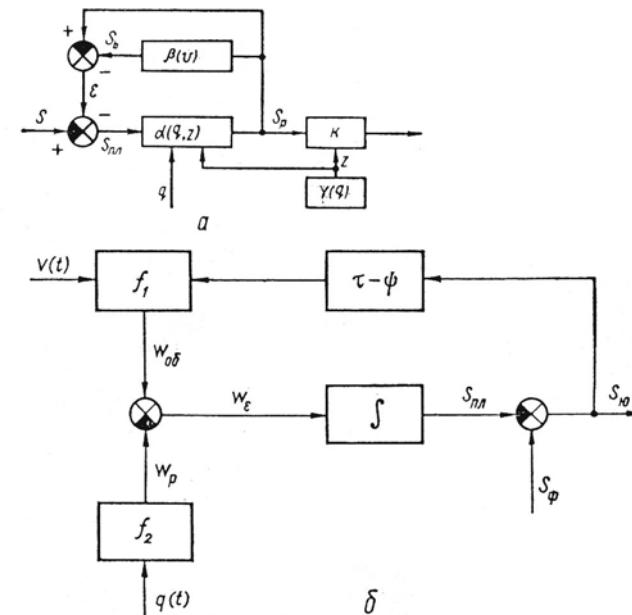


Рисунок 2 – Структурная схема саморегулирования процессов при изнашивании металлов (а) и взаимодействия металлов и среды в зоне трения (б)

В результате деформирования при наличии активной среды (в частности, кислорода) поверхность контакта покрывается пленкой. Но под действием механических возмущений (вектор  $q$ ) часть пленки разрушается. Причем площадь, на которой произошло разрушение, зависит от прочности, а следо-

вательно, и от толщины пленки  $z$ , поэтому  $S_p = \alpha(q, z)S_{пл}$  (блок  $\alpha(q, z)$ ).

На каждом элементарном участке моменты разрушения и восстановления пленки разделены отличным от нуля отрезком времени, что обусловлено дискретностью контакта и конечностью скорости скольжения. Таким образом, в каждый момент времени восстановление пленки происходит только на части ювенильной поверхности. Считая параметр, характеризующий дискретность контакта при установившемся износе, постоянным, получаем  $S_b = \beta(v)S_p$ , где  $\beta(v) \leq 1$  (блок  $\beta(v)$ ).

Термодинамически устойчивым является состояние, когда вся поверхность контакта покрыта пленкой, поэтому  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Но вследствие задержки в восстановлении пленки выполняется только условие  $\varepsilon = \varepsilon_0 > 0$ , что соответствует динамическому равновесию процессов разрушения и восстановления пленок вторичных структур. Толщина разрушаемой пленки является функцией вектора  $q$  (блок  $\gamma(q)$ ).

Структурной схеме соответствует следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} S_{пл} &= S - \varepsilon; \\ \varepsilon &= S_p - S_b; \\ S_p &= \alpha_1(q)S_{пл}; \\ S_b &= \beta(v)S_p; \\ i &= kzS_p; \\ z &= \gamma(q), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\alpha_1(q) = \alpha[q, z(q)]$ . Поэтому можно записать

$$i = \frac{kS_\gamma(q, \bar{C})\alpha_1(q, \bar{C})}{1 + \alpha_1(q, \bar{C})[1 - \beta(v, \bar{C})]}. \quad (2)$$

В этом выражении участвует в явном виде вектор  $\bar{C}$ , компонентами которого являются параметры материалов и рабочих сред. Используя  $\bar{C}$ , можно получить закономерности для расчета нормального износа в зависимости от условий нагружения и среды.

Для описания кинетических закономерностей явлений СП и процессов трения и износа при переменных воздействиях разработана динамическая модель саморегулирования (рисунок 2,б) [4, 5, 6].

Для аналитического описания рассматриваемой физической модели приняты следующие обозначения:  $S_\phi$  – площадь фактического контакта;  $S_{ю}$  – площадь ювенильных участков на поверхности фактического контакта, образующихся в результате разрушения и уноса пленок;  $W_p$  – скорость раз-

рушения пленок (уменьшение площади пленок в единицу времени);  $W_{об}$  – скорость образования пленок (увеличение их площади в единицу времени);  $q(\tau)$  – обобщенный параметр нагружения, зависящий от величины удельной нагрузки  $p(\tau)$ ;  $f_1$  и  $f_2$  – функции, выражающие зависимости скоростей образования и разрушения пленок вторичных структур от соответствующих параметров;  $\psi$  – время между моментами разрушения и уноса пленок (образования ювенильных участков) и возникновения новых пленок на этих участках. Параметр  $\psi$  характеризуется, главным образом, проникающей способностью среды и скоростью физико-химического взаимодействия среды и ювенильной поверхности металла. Рассматриваемой физической модели соответствуют следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{пл}}{d\tau} &= W_{об}(\tau) - W_p(\tau) = W_\varepsilon(\tau); \\ W_{об}(\tau) &= f_1[v(\tau), S_{ю}(\tau - \psi)]; \\ W_p(\tau) &= f_2[q(\tau)]; \\ S_{ю}(\tau) &= S_\phi - S_{пл}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Скорость образования пленок пропорциональна скорости скольжения и площади, на которой возможно их образование и может быть записана в виде  $W_{об} = kW(\tau)S_{ю}(\tau - \psi)$ , где  $k$  – коэффициент интенсивности образования пленок. Учитывая независимость механических воздействий – удельной нагрузки и скорости перемещения – можно записать, что  $W_p[q(\tau)] = a_1v(\tau) + a_2p(\tau)$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты, зависящие от прочности пленок.

Таким образом, процесс образования и разрушения вторичных структур описывается дифференциальным уравнением первого порядка с запаздывающим аргументом

$$\frac{dS_{пл}}{d\tau} + kv(\tau)S_{пл}(\tau - \psi) = v(\tau)(kS_\phi - a_1) - a_2p(\tau). \quad (4)$$

которое при  $p, v = \text{const}$  описывает состояние саморегулирования и стационарности процессов разрушения и образования пленок вторичных структур [7, 8].

**2. Исследование переходных процессов при изменении условий нагружения.** Исследование установившихся режимов динамического равновесия позволяет определить закономерности одновременного протекания процессов разрушения и восстановления вторичных структур при неизменном соотношении интенсивностей этих процессов. Изучение переходных процессов, возникающих при изменении параметров нагружения, дает возможность исследовать процессы разрушения и восстановления при различных соотно-

шениях их интенсивностей и, таким образом, предоставляет возможность их дифференцированного изучения. Кроме того, исследование переходных процессов важно в связи с тем, что в реальных условиях эксплуатации машин узлы трения работают при изменяющихся режимах нагружения.

Рассмотрим протекание процессов разрушения и трансформации поверхностных слоев металла при скачкообразном изменении параметров нагружения. Как показано выше, электродный потенциал поверхностей трения определяется площадью пассивирующих вторичных структур. Поэтому изменение электродного потенциала во времени, как при установившихся режимах, так и при переходных процессах, характеризует соотношение процессов разрушения и восстановления вторичных структур, протекающих одновременно. Схема изменения электродного потенциала во времени при изменении  $p$  или  $v$  приведена на рисунке 3.

При приложении нагрузки происходит резкое отрицательное смещение электродного потенциала  $\varphi$ , а затем его плавное возрастание (облагораживание) до определенного значения  $\varphi_{уст}$ , при котором потенциал устанавливается. В качестве основных параметров переходного процесса выбраны: время до установления потенциала  $\tau_{уст}$ , максимальное смещение потенциала по отношению к установившемуся значению  $\Delta\varphi$ , угловая характеристика времени начального срыва потенциала  $\alpha$ .

Для исследования установившихся режимов и переходных процессов было проведено пять серий опытов: скачкообразное (последовательное) увеличение нагрузки соответственно на 0,30; 0,45; 0,50; 0,90; 1,05 МПа (большие скачки); скачкообразное изменение скорости скольжения на величины от 0,1 до 1,8 м/с; скачкообразное уменьшение нагрузки до значений  $p=0,15$  МПа и  $p=0$  (остановка); скачкообразное уменьшение скорости до нуля (остановка).

На рисунке 4 представлены зависимости изменения установившегося значения электродного потенциала от нагрузки и скорости скольжения.

При неизменных установившихся значениях  $p$  и  $v$  имеет место динамическое равновесие процессов разрушения и восстановления вторичных структур. При этом параметр равновесия – метастабильная площадь вторичных структур – определяется режимами нагружения. Это оказывается справедливым только в определенном диапазоне  $p$  и  $v$ , в котором процессы разрушения локализованы в слоях вторичных структур. При значениях нагрузок и скоростей выше критических возникают процессы схватывания и разрушения ме-

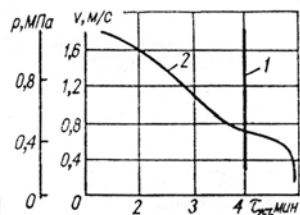


Рисунок 3 – Время восстановления электродного потенциала после различных режимов нагружения:

1 – при изменении удельной нагрузки; 2 – при изменении скорости скольжения

талла, что выражается в неустойчивости электродного потенциала.

При сравнении кривых 2 и 3 видно, что равновесие зависит также и от предшествующих условий нагружения. При малых последовательных скачках смещение потенциала меньше, что может быть объяснено меньшей скоростью разрушения вторичных структур, т.е. прочность вторичных структур при более плавном нагружении оказывается выше, чем при резком нагружении до одинаковых значений нагрузки.

На рисунке 5 представлены переходные процессы в зависимости от перегрузок при малых (а) и больших (б) скачках  $p$ .

При всех перегрузках, не превышающих критические, максимальное отрицательное смещение электродного потенциала не превышает значений, соответствующих установившемуся потенциалу, при котором еще не возникает схватывание.

Параметр  $\alpha$  является, в основном, характеристикой процесса разрушения вторичных структур в момент возникновения перегрузок и непосредственно связан с механическими свойствами вторичных структур. Параметры  $\Delta\varphi$  и  $\tau_{уст}$  характеризуют соотношение интенсивности процессов разрушения и восстановления вторичных структур.

Из графика изменения электродного потенциала на образцах, покрытых пленками естественных окислов (кривая 2) и вторичных структур трения (кривая 1) (рисунок 6), при приложении одинаковых нагрузок следует, что прочностные характеристики вторичных структур при нагружении трением значительно выше.

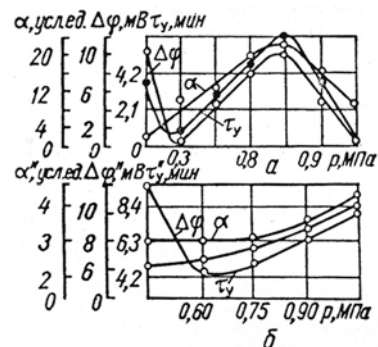


Рисунок 5 – Характеристики переходных процессов в зависимости от перегрузок

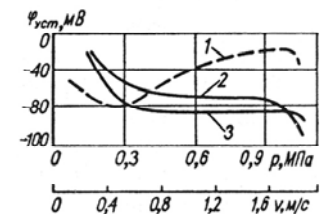


Рисунок 4 – Зависимость электродного потенциала от скорости скольжения (1) и удельной нагрузки, изменяющейся большими (3) и малыми (2) скачками

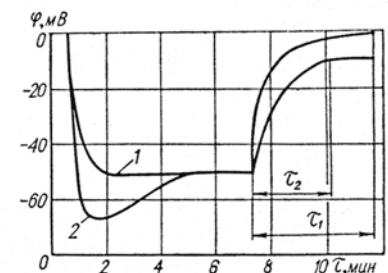


Рисунок 6 – Смещение электродного потенциала во времени при изменении типа пленок на поверхностях трения

## Выводы.

1. Произвольную зубчатую пару следует рассматривать как открытую трибосистему, работающую в условиях абразивного изнашивания.

2. При определении параметров трения (качения и скольжения) в зубчатом зацеплении следует учитывать явления саморегулирования процессов разрушения и переходные процессы при изменении условий нагружения, а также параметры этих явлений.

3. Теория поверхностной прочности позволяет более качественно подойти к выбору материалов зубчатых пар и назначению их допускаемых контактных напряжений.

4. В статье показано, что зарождение трещин и потеря выносливости зубчатых пар происходит в поверхностном слое пятна контакта при одновременной максимизации контактного давления  $p_{кр}$ , скорости скольжения в зацеплении  $V$ , а также установившегося значения электродного потенциала  $\varphi_{уст}$ , толщины вторичных структур  $z$  и высоты микронеровностей  $R_a$ .

5. Теория поверхностной прочности хорошо согласуется с теорией износостойкой выносливости, по крайней мере, в вопросе прогнозирования выносливости износоконтактных трибосистем, например, зубчатых пар.

**Список литературы:** 1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 296с. 2. Расчет износостойкости трущихся поверхностей машин / Под. ред. А.А. Благодрава. – М.: ВНИИМАШ, 1972. – 296с. 3. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 386с. 4. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О., Приймаков Г.О. Експериментально-аналітичне визначення параметрів зношування та витривалості авіаційних матеріалів // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып. "Динамика и прочность машин". – Харьков, 2004. – №3. – С.127–133. 5. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Статистична модель поверхневого деформування трибосполучень // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2008. – Вып.1(52). – С.88–103. 6. Приймаков О.Г. Витривалість авіаційних конструкцій та її прогнозування на прикладі зубчастих передач // Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып. "Технологии в машиностроении". – Харьков, 2002. – №10. – С.85–97. 7. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Експериментальні дослідження інтенсивності зношування та пов'язаного з ним напружено-деформованого стану визначальних пар тертя в середньому машинобудуванні // Вестник науки и техники. – 2005. – №4(21). – С.19–28. 8. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 160с.

Поступила в редколлегию 15.05.2009

УДК 621.01.(833)

**Х.С. САМИДОВ**, д.т.н., проф., зав. кафедрой АзАСУ  
**Ф.Ф. АГАЕВ**, асп. АзАСУ

## СОСТАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

У роботі ставиться завдання про складання динамічної моделі головного приводу токарного патронно-центрального верстата 1М63БФ30С1 з оперативною системою управління (ОСУ).

In this work a task is put about drafting of dynamic model of main drive of cartridge-central lathe with operative control the system (WASP).

Зубчатые передачи (простые и планетарные) являются наиболее распространенными видами передач, используемых в приводах современных машин различного назначения. Достоверность динамического расчета привода машин во многом зависит от адекватности выбранных динамических моделей зубчатых передач.

Адекватная динамическая модель зубчатой передачи должна удовлетворять двум основным требованиям: обеспечивать правильное качественное и количественное отображение динамических процессов исследуемой системы и количественное описание этих процессов с принятой степенью точности. Выбор адекватной динамической модели не является однозначным, поскольку число факторов, которые могут быть учтены при динамической схематизации реальной машины, формально не ограничено. Поэтому, при решении практических инженерных задач используются оптимальной адекватной модели машин. Под оптимальной адекватной или корректной, динамической моделью понимается максимальная простая модель, удовлетворяющая выше указанным двум требованиям адекватности.

В настоящей работе ставится задача о составлении динамической модели главного привода токарного патронно-центрального станка 1М63БФ30С1 с оперативной системой управления (ОСУ). В главной привод данного станка входят: источник движения – асинхронный электродвигатель типа 4А16ОМЧУЗ мощностью 18,5кВт с частотой вращения 1465 об/мин, коробка скоростей, коробка передач, клиноременная передача и рабочие машины – шпиндельный узел и суппорт (рисунок 1). При составлении динамической модели учитываются распределенные и сосредоточенные массы движущихся деталей главного привода станка, крутильная и изгибная податливостей валов и приведенная к крутильной контактная податливость шлицевых, шпоночных соединений и зубчатых передач.

Ниже дано краткое описание последовательности составления динамической модели главного привода станка 1М63БФ30С1 с ОСУ.