

ДИНАМИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА РОТОРА С ПОМОЩЬЮ ВИБРОАНАЛИЗАТОРА

В.В. Кудин – к.т.н., доцент

А.Т. Скойбеда – д.т.н., профессор, кафедры «МиДМ»

А.М. Авсиевич – к.т.н., доцент, декан ФИТР

Е.М. Дубовская – к.т.н., доцент кафедры «МиДМ»

Е.М. Робилко – магистрант, заведующий лабораторией кафедры «ТФ»

Белорусский национальный технический университет, Минск

e-mail: mparts@bntu.by

DYNAMIC ROTOR BALANCING USING A VIBRATION ANALYZER

Dubouskaya A.M.

Аннотация: Одним из возможных способов при проведении динамической балансировки ротора является использование виброанализатора СД-21. Использование в лабораторной работе цифрового виброанализатора позволит не только продемонстрировать принципы балансировки, но и привить обучающимся навыки работы на современном оборудовании. Показана эффективность использования универсального вибродиагностического оборудования для выполнения операции балансировки.

Ключевые слова: балансировка ротора, вибродиагностика, виброанализатор, измерения, лабораторная работа.

Abstract: One of the possible methods for dynamic rotor balancing is the use of a vibration analyzer SD-21. The use of a digital vibration analyzer in laboratory work will not only demonstrate the principles of balancing, but also instill in students the skills of working with modern equipment. The effectiveness of using universal vibration diagnostic equipment for performing balancing operations is shown.

Key words: rotor balancing, vibration diagnostics, vibration analyzer, measurements, practical studying.

Введение

В соответствии с ГОСТ 19534-74 ротором называется тело, которое при вращении удерживается своими несущими поверхностями в опорах. В машинах это может быть маховик, ротор электродвигателя, шкив и т.д. [1]. Несущими являются поверхности цапф или поверхности, их заменяющие. Ось ротора – прямая, соединяющая центры тяжести контуров поперечных сечений средин несущих поверхностей. По числу опор роторы бывают двух

и многоопорные. Элементарные силы инерции F_i точечных масс ротора, образующих пространственную систему сил, приводятся к главному вектору центробежных сил инерции \vec{F}_u , приложенному к центру масс “S” ротора, и к главному моменту сил инерции M_u , действующих в разных плоскостях

$$\vec{F}_u = \Sigma \vec{F}_i = \omega^2 \cdot \Sigma m_i \vec{r}_i = \omega^2 \vec{D}^2, \quad (1)$$

$$M_u = \omega^2 \cdot \sqrt{I_{xz}^2 + I_{yz}^2} = \omega^2 M_D, \quad (2)$$

где m_i, \vec{r}_i - неуравновешенная точечная масса и её эксцентриситет;

$D = \Sigma m_i r_i = m_p \rho_s$ - главный вектор дисбаланса ротора;

m_p, ρ_s - соответственно масса и эксцентриситет ротора;

I_{xz}, I_{yz} - центробежные моменты инерции ротора;

$$I_{xz} = \Sigma m_i x_i z_i, I_{yz} = \Sigma m_i y_i z_i;$$

$M_D = \sqrt{I_{xz}^2 + I_{yz}^2}$ - главный момент дисбалансов ротора.

Векторы \vec{F}_u и M_u центробежных сил инерции вызывают динамические реакции в подшипниках ротора, которые передаются станине машины и фундаменту, причем \vec{F}_u и M_u вращаются вместе с ротором. В следствие этого возникают механические колебания в опорах ротора и станине, что увеличивает износ подшипников и потери энергии на трение.

Не подверженный воздействию внешних сил ротор, вращающийся с постоянной угловой скоростью, находится в состоянии динамического равновесия, характеризующего равенством главного вектора \vec{F}_u и главного момента M_u сил инерции, т.е.

$$\vec{F}_u = \omega^2 \vec{D} = 0, \quad (3)$$

$$M_u = \omega^2 M_D = 0. \quad (4)$$

Для выполнения условия (3) необходимо и достаточно, чтобы центр масс S ротора находился на оси вращения, т.е. $\rho_s = 0$.

Для выполнения условия (4) необходимо и достаточно, чтобы одна из центробежных осей инерции совпадала с осью вращения ротора ($I_{xz} = 0, I_{yz} = 0$).

Ротор полностью уравновешен тогда, когда ось вращения является главной центральной осью инерции, то он является неуравновешенным. Неуравновешенность является естественным свойством любого вращающегося тела и имеется всегда. Поэтому в технике различают допустимый дисбаланс, при котором эксплуатация машин возможна, а

повышенный дисбаланс, под воздействием которого в машине образуется и быстро развиваются дефекты, которые могут привести к аварии.

Процесс уменьшения дисбаланса ротора до допустимых значений называется балансировкой. Наличие дисбаланса ротора характеризуется большой составляющей вибрации машины на частоте ее вращения. Часто одной из причин появления повышенной вибрации на частоте вращения машины является «излом» линии ротора или несоосность осей валов. Одноплоскостная неуравновешенность ротора обычно называется статической неуравновешенностью. Многоплоскостная неуравновешенность (динамическая), может не проявляться в станине, но вызывает достаточно сильную вибрацию.

Так как неуравновешенность проявляется – вызывает вибрации механической системы, в которую включен ротор, эффективным средством проведения балансировки с использованием универсального виброизмерительного оборудования.

Теоретические основы балансировки с использованием виброанализатора.

При применении виброанализаторов для расчета балансировочных масс эффективен метод коэффициентов влияния. Рассчитываются чувствительности машины на вибрации во всех точках её измерения при установке пробных масс сначала в первой плоскости установки массы, затем во второй и т.д. Таким образом учитывается влияние каждой плоскости установки массы на вибрацию во всех контрольных точках. Расчет коэффициентов влияния производится после проведения начального пуска машины (без установочных пробных масс) и пробных пусков (с установочными пробными массами). Коэффициенты влияния являются комплексными величинами, поэтому выводятся на экран два числа (действительная и мнимая части). [2].

Последовательность операций при балансировке с помощью виброанализатора СД-21.

При проведении балансировки при помощи встроенной программы прибора СД необходимо провести измерения параметров исходной вибрации (до установки пробных масс) во всех выбранных точках контроля и по величине дисперсии (среднеквадратичного отклонения) сигналов определить возможность проведения балансировки данного ротора машины. Если дисперсия велика (60% и более), балансировка практически невозможна. Нормальная величина дисперсии 5-15%. Далее установить первую пробную массу, провести измерения параметров вибрации во всех контрольных точках контроля и расчет корректирующих масс.

По расчетной вибрации после установки корректирующих масс (в данной программе рассчитывается максимальная величина вибрации во всех точках измерения) принять решение об установке следующей пробной массы, если рассчитанная вибрация больше требуемой, или об окончании пусков с пробными массами и переходу к установке корректирующих масс. При продолжении пробных пусков – установить очередную (следующую) пробную массу и повторить весь цикл работ для нее. После установки пробных масс во всех возможных (не более трех) плоскостях установки или при достижении требуемой расчетной величины вибрации необходимо установить рассчитанные корректирующие массы. Провести контрольное измерение параметров вибрации во всех контрольных точках. По его результатам программа автоматически рассчитывает параметры дополнительных корректирующих масс и величину вибрации при их установке. На основании результатов этого расчета нужно принять решение об окончании балансировки. Если ожидаемая эффективность достаточна большая (уменьшение вибрации в полтора и более раза), можно установить рассчитанные массы и повторить контрольное измерение и расчет корректирующих масс и эффективность. [3].

Обзор установок для балансировки на виброанализаторе СД-21 компании ВАСТ.

Запуск встроенной программы балансировки осуществляется из «Основное Меню». В меню установок задают количество точек измерения – не более 8-ми, единицы измерения амплитуды, тип детектора, который будет использован для представления амплитуды вибрации: СКЗ (среднее квадратическое значение); ПИК (амплитудное значение); Пик-Пик (двойной размах).

Скорость вращения – единицы представления скорости (частоты) вращения ротора (об/мин, об/с, Гц) и могут быть изменены клавишами <Влево> и <Вправо>.

Контроль тахометра – всегда автоматический. В случае обнаружения погрешностей в этом сигнале, в нижней строке экрана «Измерение вибраций» появляется одно из следующих сообщений: 1) Вне диапазона (меньше 60 об/мин или больше 100000 об/мин); 2) Нет синхронизации (отсутствует питание тахометра или нет сигнала от отметки на роторе); 3) Нестабильная синхронизация (имеется случайный сигнал или несколько сигналов за оборот); 4) Достигнута заданная точность измерения.

Угол установки массы – необходимо выбрать одно из двух направлений возрастания угла установки пробных и корректирующих масс (по вращению или против вращения ротора).

Поправка по фазе – для согласования измеряемых данных с данными приборов, имеющих сдвиг по фазе. [4].

Измерение вибрации.

Это один из основных экранов программы балансировки. Он предназначен для измерения параметров вибрации (амплитуды и фазы вибрации на частоте вращения ротора) и величины скорости вращения (рис.1):

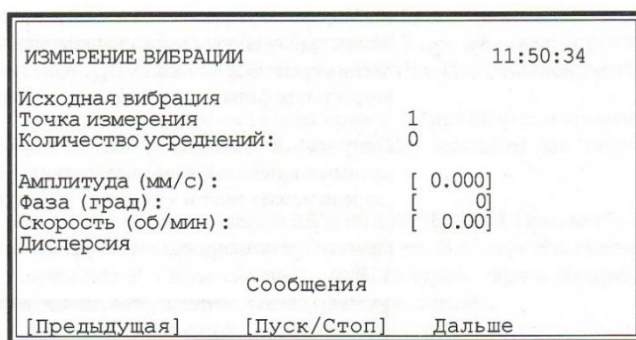


Рис. 1. Измерение вибрации

На экране указывается этап балансировки – «Исходная вибрация» или «Пробная масса N» (где N – номер плоскости установок массы), или «Измерение вибрации K» (где K – номер контрольного измерения, и номер точки измерения).

Измеряемые величины представим значениям амплитуды, фазы и текущими значениям скорости вращения. Количество усреднений показано в соответствующей строке. Кнопки внизу экрана, выбираемые при помощи клавиш <Влево> и <Вправо>, позволяют провести следующие операции:

ПУСК/СТОП – запускается процесс измерения или прерывания его нажатии кнопки <Ввод>;

ПРЕДЫДУЩАЯ – позволяет перейти к предыдущему экрану «Измерение вибрации»;

ДАЛЬШЕ – переход к следующему экрану измерений или к экранам для продолжения работы.

Установка пробных и корректирующих масс при балансировке

Во встроенной программе балансировки сборщика данных допускается два вида установки пробных масс – со снятием предыдущей пробной массы перед установкой следующей, а также без её снятия. Допускается снятие любой пробной массы. Необходимо обратить особое внимание на то, что в этой программе рассчитываются корректирующие массы, которые

обеспечивают балансировку ротора только при снятии всех пробных масс перед установкой корректирующих.

Порядок работы с использованием встроенной в прибор программы балансировки.

Из основного меню, выбрав команду «Прикладные программы» и в меню «Прикладные программы» выбрать команду «Балансировка» При выборе команды «Дальше» выводится экран «Точка канал». При заполнении экрана допускается использование одного канала для разных точек измерения вибрации.

Процедура балансировки. При нажатии кнопки «Дальше», появится экран «Измерение исходной вибрации» (рис. 2)

ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИИ 11:50:34

Исходная вибрация

Точка измерения: 1

Количество усреднений: 0

Амплитуда (мм/сек): [0.00]

Фаза (град): [0]

Скорость (об/мин): [0.00]

Дисперсия:

Сообщения

[Предыдущая] [Пуск/Стоп] [Дальше]

Рис. 2. Измерение вибрации

После того, как измерения автоматически будут остановлены (при отсутствии сообщений об ошибках или неточностях в измерении), нужно нажать кнопку «Дальше». Появится такой же экран для измерения следующей точки. После проведения всех измерений исходной вибрации появляется экран «Результаты измерений» (рис. 3), на котором представлены все результаты измерения параметров исходной вибрации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ 11:50:34

Исходная вибрация

Номер точки	Амплитуда (мм/сек)	Фаза (град)
[1]	5.75	215
[2]	13.16	127

[Дальше]

Рис. 3. Результаты измерений

При нажатии кнопки «Дальше» появляется экран «Вид балансировки». Необходимо выбрать «Продолжение работы», тогда появляется экран «Установка пробной массы» (рис. 4).

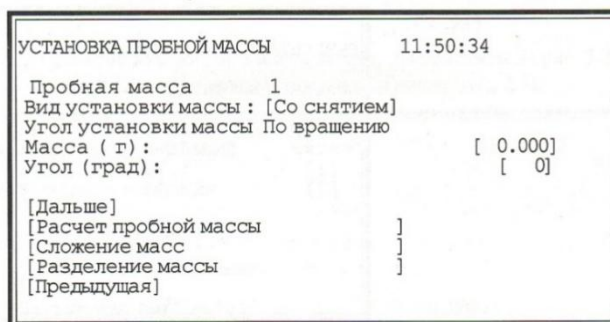


Рис. 4. Установка пробной массы

Следует остановить установку (машину) и закрепить пробную массу и перейти к шагу «Измерения вибрации с пробной массой» (рис. 5). После нажатия кнопки «Дальше» появится следующий аналогичный экран для следующей точки (2) измерения. После последнего измерения появится экран «Результаты измерения вибраций» (рис. 6)

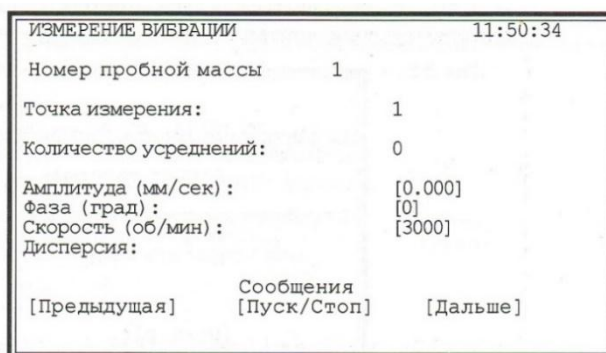


Рис. 5. Измерения вибрации с пробной массы

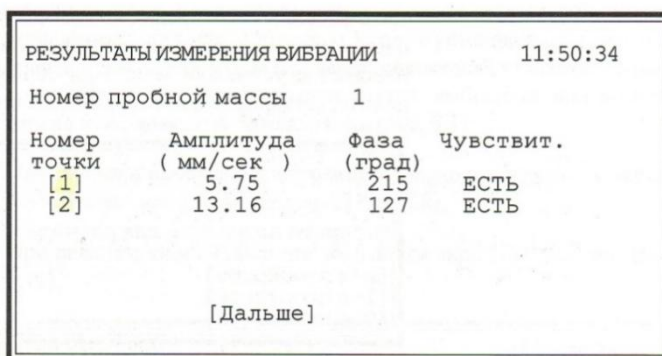


Рис. 6. Результаты измерения вибраций

В столбце «Чувствительность» приведены данные о наличии чувствительности вибрации во всех точках измерения к пробной массе. Если чувствительности нет во всех точках, то при нажатии кнопки «Дальше» появляется экран «Малая чувствительность» (рис. 7).

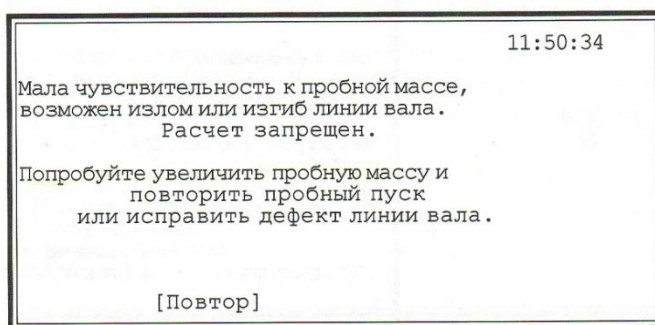


Рис. 7. Малая чувствительность

Далее, после установки пробной массы во вторую плоскость, производится проверка на наличие эквивалентных плоскостей установки масс. При обнаружении таких плоскостей появляется экран «Эквивалентные плоскости» (рис. 8)

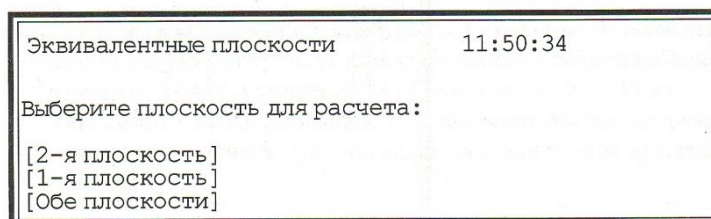


Рис. 8. Эквивалентные плоскости

Выбираем для расчета «Обе плоскости» и нажимаем клавишу <Ввод>. Программа перейдет к следующему экрану (рис. 9). На нем указаны результаты расчета максимальной величины вибрации во всех точках её измерения при установке рассчитанных корректирующих масс, а также параметров корректирующих масс – «Масса» и «Угол» её установки относительно начала отсчета этого угла для данной плоскости. [5].

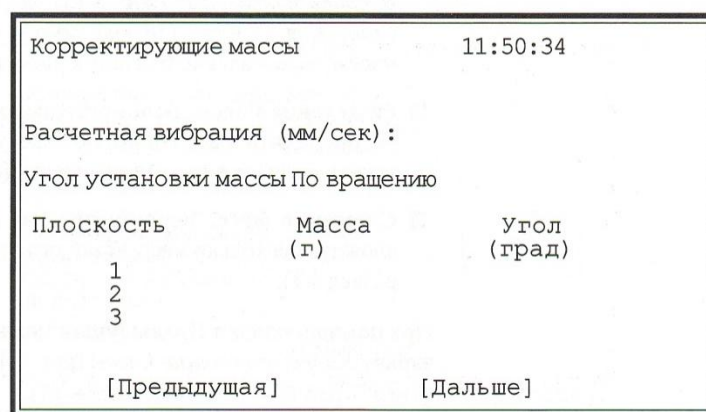


Рис. 9. Корректирующие массы

При нажатии кнопки «Дальше» появится экран «Вид работы». Этот экран позволяет выбрать вид дальнейшей работы из следующего списка:

- Следующая пробная масса – переходим к экрану «Установка пробной массы» для ввода параметров следующей пробной массы и продолжения балансировки.

- Контрольное измерение – переход к экрану «Ввод установочных масс». При этом необходимо установить корректирующие массы максимально близкие к расчетным. [6].

Если выбрана команда «Контрольное измерение», появляется экран (рис. 10).

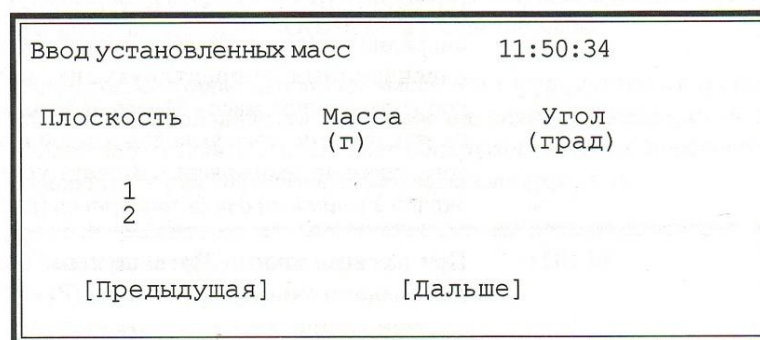


Рис. 10. Ввод установленных масс

При помощи этого экрана необходимо с клавиатуры ввести действительные значения, закрепленных корректирующих масс, которые по техническим причинам могут отличаться от рассчитанных.

При нажатии кнопки «Дальше» появится экран «Контрольное измерение вибрации» и начнется процесс измерения (рис. 11)

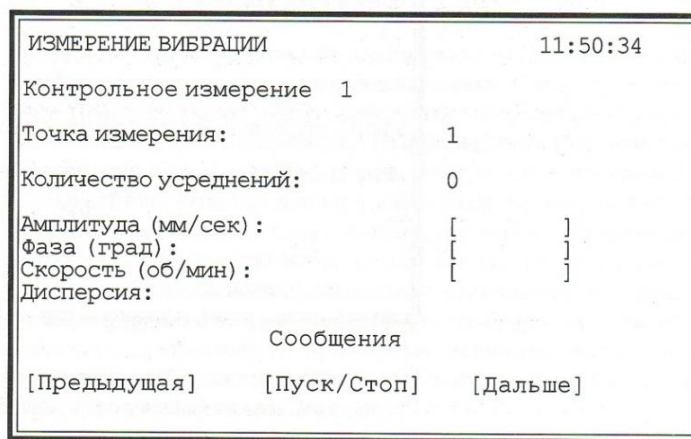


Рис. 11. Контрольное измерение вибрации

На экране указаны результаты измерения параметров вибрации с установленными корректирующими массами.

По окончании измерений появится экран «Результаты измерения вибрации» (рис. 12)

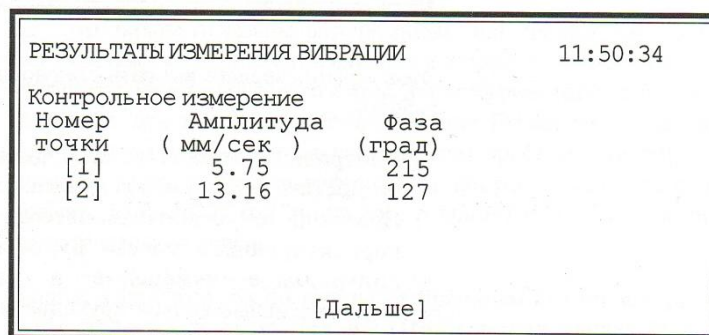


Рис. 12. Результаты измерения вибрации

При нажатии кнопки «Дальше» программа автоматически рассчитывает параметры дополнительных корректирующих масс и величину вибрации при их установке и показывает результаты расчета на экране (рис. 13).

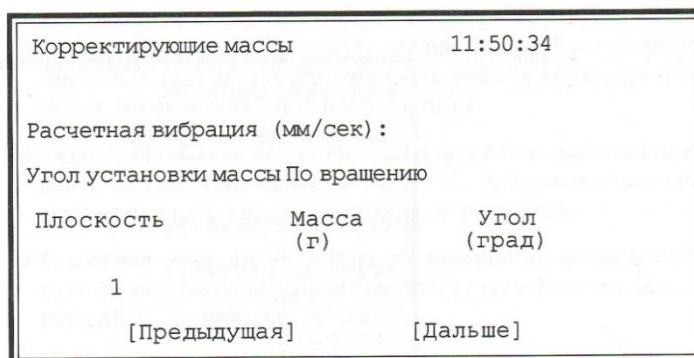


Рис. 13. Корректирующие массы

Затем программа снова переходит к выбору вид дальнейшей работы:

1. Контрольные измерения. Если заданный эффект балансировки не достигнут, его можно увеличить, выбрав эту команду.
2. Окончание. Окончание и оформление результатов балансировки. Программа перейдет к экрану «Протокол балансировки». [7].

Окончание балансировки.

Выбрав команду «Окончание» экрана «Вид работы» можно перейти к просмотру «Протокола балансировки». В протоколе приведены все данные измерений параметров вибрации, рассчитанные и установленные массы. Массы, рассчитанные по результатам последнего контрольного измерения и не установленные на роторе, приводятся в протоколе для того, чтобы дать пользователю возможность рассчитать примерные величины остаточных дисбалансов. Для этого достаточно умножить величину этих масс на радиусы их установки на роторе.

Кроме того, приводятся рассчитанные коэффициенты влияния в полярной форме (модуль/фаза).

Данные в протоколе расположены по страницам. Листание страниц осуществляется кнопками «Дальше» и «Предыдущая». Кнопка «Дальше» на последней странице вызывает экран «Конец протокола». [8].

Выводы

Описанная методика позволяет провести с высокой точностью балансировку широкой номенклатуры роторов с различными конструктивными параметрами без применения специального балансировочного оборудования.

Литература

1. ГОСТ 19534-74 Балансировка вращающихся тел [Термины] – Введ. 01.01.1975 – Москва: Государственный комитет стандартов, 1975. – 49 с.
2. Анципорович П.П., Кудин В.В., Дубовская Е.М.– Балансировка вращающихся масс: учебно-методическое пособие к лабораторным работам по дисциплине «Теория механизмов, машин и манипуляторов» 4-е изд., испр. – Минск: БНТУ, 2012. – 26 с.
3. Кудин В.В., Авсиевич А.М. – Балансировка ротора при помощи виброанализатора СД-21: Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2018. – Т. 2. – 427 с.
4. Астахов, Э.И., Кудин, В.В. Колебания в машинах и методы их устранения: учебно-методическое пособие для студентов машиностроительных специальностей. – Мн.: БГПА, 1997. – 130 с.

5. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т.6. Защита от вибраций и ударов / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

6. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.

7. Колебания в машинах: Лабораторные работы для студентов специальностей 1–36 01 01 «Технология машиностроения» и 1–36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / Сост.: Э.И. Астахов, В.В. Кудин, М.В. Кудин. – Мн.: БНТУ, 2005 – 95 с.

8. Виброанализатор СД-21. Руководство по эксплуатации / ООО Ассоциация ВАСТ: СПб, 2012. – 113 с.

УДК 681.3.06

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММЫ «ДЕТАЛИ МАШИН» ДЛЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

В. Д. Василёнок, к.т.н, доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь,

email: mparts@bntu.by

FEATURES OF THE “MACHINE PARTS” PROGRAM FOR INSTRUMENT-MAKING SPECIALTIES

V. D. Vasilyonok

Associate Professor, Belarusian National Technical University,

Minsk, Republic of Belarus, email: mparts@bntu.by

Аннотация. На основании академических нормативных материалов показан единый подход к составлению программ курсов дисциплин деталей машин и приборных деталей машин. На примере зубчатых передач показано, как миниатюризация исходных параметров влияет на коэффициенты, учитывающие форму зуба (величину относительных напряжений).

Ключевые слова: машина, механизм, приборные детали машин, прочность при изгибе, коэффициент формы зуба.

Abstract. Based on academic regulatory materials, a unified approach to compiling course programs for the disciplines of machine parts and instrument parts of machines is shown. Shown using the example of gears, how miniaturization of the initial parameters affects the coefficients that take into account the shape of the tooth (the magnitude of the relative stresses).