

УДК 621.833

*Б. М. Моргалик, И. В. Лесковец*

## КРИТЕРИИ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

UDC 621.833

*B. M. Morgalik, I. V. Leskovets*

## CRITERIA OF CONTROLLABILITY FOR EVALUATING THE CONDITION OF GEARS

### Аннотация

Получены формализованные диагностические параметры, применяемые при оценке технического состояния механической трансмиссии, диагностируемой импульсным способом. Синтезированы критерии контролепригодности, в соответствии с которыми определяется возможность и глубина диагностирования исследуемой кинематической цепи. Для получения формализованных диагностических параметров кинематической цепи использовался математический аппарат, параметры зубчатых зацеплений и шлицевых соединений в соответствии с ГОСТ 25044–81, ГОСТ 1643–81, ГОСТ 16530–83.

### Ключевые слова:

диагностические параметры, механическая трансмиссия, импульсный способ, схема измерения, установленные критерии, контролепригодность, кинематическая цепь, алгоритмы подготовки диагностических параметров, диагностируемый объект.

### Abstract

Formalized diagnostic parameters have been obtained to be used in assessing the technical condition of a mechanical transmission diagnosed by the pulse method. In addition, testability criteria have been synthesized, according to which the possibility and depth of diagnosis of the studied kinematic chain are determined. To obtain formalized diagnostic parameters of the kinematic chain, a mathematical apparatus has been used, as well as the parameters of gearing and spline connections in accordance with GOST 25044–81, GOST 1643–81, GOST 16530–83.

### Keywords:

diagnostic parameters, mechanical transmission, pulse method, measurement scheme, established criteria, controllability, kinematic chain, algorithms for preparing diagnostic parameters, diagnosed object.

### Введение

Исходные данные для расчета величин диагностических параметров, упорядочивание диагностических данных создают необходимость реализации программной системы принятия решений по оценке результатов мониторинга и постановке диагноза. Техническое обеспечение, в состав которого входит подобная система, содержит набор диагностических признаков, механизмы их оценки, признаки дефектов, диагности-

ческие симптомы, алгоритмы и программное обеспечение для контроля, а также показатели контролепригодности объекта [1].

Согласно основным тенденциям развития систем мониторинга, обеспечение, в состав которого входит аппаратная и программная части, может включать алгоритмы подготовки данных, алгоритмы расчета параметров, анализа и постановки диагноза, средства обработки и визуализации информации [9]. Аппаратные средства обра-



ботки входящей информации являются носителями алгоритмов оценки, содержат полученные диагностические данные, режимы воздействий, идентифицируют реакции объекта наблюдения на диагностические воздействия [11]. В свою очередь, алгоритм диагностирования предполагает оценку диагностических параметров, которые являются количественными характеристиками состояния объекта диагностирования, содержат в себе логическую последовательность диагностических операций.

### Базовые оценочные параметры

Суммарный угловой зазор как интегральный параметр  $j_p^{\text{гар}}$  по ГОСТ 25044–81 обладает гарантированной величиной по ГОСТ 1643–81, ГОСТ 16530–83 на начальной стадии эксплуатации объекта наблюдения [7]:

$$j_p^{\text{гар}} = \sum_{k=1}^i j_k^{\text{гар}} + \sum_{q=1}^e j_q^{\text{гар}}, \quad (1)$$

где  $i$  – количество зубчатых зацеплений кинематической цепи;  $k$  – минимальное значение количества зубчатых зацеплений;  $e$  – количество шлицевых соединений кинематической цепи;  $q$  – минимальное значение количества шлицевых соединений;  $j_{k,q}^{\text{гар}}$  – гарантированное значение бокового зазора в передаче, мм.

Подготовка данных предназначена для определения характеристик зубчатых передач и контролируемых параметров, выражение (1) для кинематической цепи, состоящей из  $i$  зубчатых передач и  $e$  шлицевых соединений/муфт отдельной передачи  $p$  представлено как

$$j_p^{\text{тек}} = j_k^{\text{гар}} + \Delta j_k^{\text{тек}} + j_q^{\text{гар}} + \Delta j_q^{\text{тек}}. \quad (2)$$

Гарантированный боковой зазор зубчатой передачи при  $\Delta j_k^{\text{тек}} = 0$  формируется следующим образом:

$$j_k^{\text{тек}} = j_k^{\text{гар}} + \Delta j_k^{\text{тек}}. \quad (3)$$

Гарантированный боковой зазор шлицевых соединений/муфт при  $\Delta j_q^{\text{тек}} = 0$  рассчитывается по формуле

$$j_q^{\text{тек}} = j_q^{\text{гар}} + \Delta j_q^{\text{тек}}. \quad (4)$$

Суммарная величина бокового зазора определяется в зависимости от значений износа зубчатых передач кинематической цепи, которые изменяются от 0 до 100 % предельно допустимых значений в границах значений износа боковых поверхностей зубьев (предельные значения  $\Delta j_{ip}^{\text{пред}}$ ,  $\Delta j_{ep}^{\text{пред}}$  для каждого элемента цепи) [3]. В зависимости от количества зубчатых передач (индекс  $i$ ) и количества шлицевых соединений/муфт (индекс  $e$ ) по рассчитываемой кинематической цепи (2) определяются суммы ( $j_k^{\text{гар}} + \Delta j_k^{\text{тек}} + j_q^{\text{гар}} + \Delta j_q^{\text{тек}}$ ) с износом от 0 до 100 % при шаге 25 %. Оценка текущего значения износа для  $k$ -й зубчатой передачи  $\Delta j_k^{\text{тек}}$  и  $q$ -го шлицевого или муфтового соединения  $\Delta j_q^{\text{тек}}$  осуществляется соответственно с использованием выражений

$$\Delta j_k^{\text{тек}} = \Delta j_k^{\text{тек}} + \Delta j_{ip}^{\text{пред}} \cdot 0,25;$$

$$\Delta j_q^{\text{тек}} = \Delta j_q^{\text{тек}} + \Delta j_{ep}^{\text{пред}} \cdot 0,25. \quad (5)$$

Суммы ( $j_k^{\text{гар}} + \Delta j_k^{\text{тек}} + j_q^{\text{гар}} + \Delta j_q^{\text{тек}}$ ) составляют набор диагностических данных, которые применяются в алгоритмах расчета параметров и при формировании диагностической модели отдельной цепи зубчатых передач. Создание алгоритма определения диагностических параметров реализовано на основе способа диагностирования, приведенного в [12], который является начальным этапом формирования логических условий выявления передачи с наиболее высокой условной вероятностью необнаруженной неисправности [8] (далее – «лимитирующая зубчатая передача»).



## Выражение

$$n_p = \sum_{k=1}^i \left( \frac{\left( (j_k + \Delta j_k) \cdot \prod_{L=1}^k \frac{z_{1L}}{z_{2L}} \right) \cdot z_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{max}} \cdot u_p}{\pi \cdot m_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{ВЫХ}}} \right) + \sum_{q=1}^e \left( \frac{\left( \left( \frac{j_q + \Delta j_q}{r_{\text{ШЛ/ЗМ}}} \right) \cdot \left( \frac{z_{\text{ШЛ/ЗМ}} \cdot m_{\text{ШЛ/ЗМ}}}{2} \right) \cdot \prod_{M=1}^q \frac{z_{1M}}{z_{2M}} \right) \cdot z_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{max}} \cdot u_p}{\pi \cdot m_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{ВЫХ}}} \right), \quad (6)$$

где  $j_k$  – гарантированное значение бокового зазора зубчатого зацепления, мм;  $\Delta j_k$  – текущее значение износа зубчатого зацепления, мм;  $k$  – количество зубчатых зацеплений кинематической цепи;  $z_{1L}$  – количество зубьев зубчатого колеса;  $z_{2L}$  – количество зубьев шестерни;  $z_{\text{ВЫХ}}$  – количество зубьев выходного зубчатого колеса кинематической цепи, возле которого устанавливается выходной первичный преобразователь;  $m_{\text{ВЫХ}}$  – модуль выходного зубчатого колеса, мм;  $z_{\text{max}}$  – количество зубьев маховика, возле которого устанавливается входной первичный преобразователь;  $u_p$  – передаточное число кинематической цепи;  $j_q$  – гарантированное значение бокового зазора шлицевого соединения, мм;  $\Delta j_q$  – текущее значение износа шлицевого соединения, мм;  $q$  – количество шлицевых соединений кинематической цепи;  $r_{\text{ШЛ/ЗМ}}$  – радиус шлицевого участка вала, мм;  $z_{\text{ШЛ/ЗМ}}$  – количество шлицев шлицевого участка вала;  $m_{\text{ШЛ/ЗМ}}$  – модуль шлицевого соединения, мм;  $z_{1M}$  – количество зубьев зубчатого колеса шлицевого участка вала;  $z_{2M}$  – количество зубьев шестерни шлицевого участка вала, характеризует сумму опорных импульсов ( $n_{\text{рпк}}^{\text{гар}} + n_{\text{рпк}}^{\text{гар}}$ ), соответствующую гарантированным величинам зазоров ( $j_k^{\text{гар}} + j_q^{\text{гар}}$ ) передач

кинематической цепи и сумму опорных импульсов ( $n_{\text{рпк}} + n_{\text{рпк}}$ ), соответствующую величинам износов ( $\Delta j_k^{\text{тек}} + \Delta j_q^{\text{тек}}$ ) передач (2). Возможностью определения «лимитирующего соединения» является минимальное целочисленное значение количества опорных импульсов  $n_{\text{рпк}}^{\text{гар}}$  или  $n_{\text{рпк}}^{\text{гар}}$ , соответствующее одному выходному импульсу исследуемого соединения. Без шлицевого, шпоночного или муфтового соединения выражение (6) принимает вид:

$$n_{\text{рпк}}^{\text{гар}} = \frac{\left( j_k^{\text{гар}} \cdot \prod_{L=1}^k \frac{z_{1L}}{z_{2L}} \right) \cdot z_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{max}} \cdot u_p}{\pi \cdot m_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{ВЫХ}}}, \quad (7)$$

где  $j_k^{\text{гар}}$  – гарантированное значение бокового зазора зубчатого зацепления, мм;  $j_q^{\text{гар}}$  – гарантированное значение бокового зазора шлицевого соединения, мм.

Определение «лимитирующей зубчатой передачи» осуществляется с использованием передаточных чисел передач кинематической цепи по наблюдаемому объекту МТЗ-1221. Передача 9 трансмиссии МТЗ-1221 обладает наиболее низким передаточным числом из всех передач ( $u_p = 78,1$ ); значения  $u_p$  и  $n_{\text{рпк}}^{\text{гар}}$  сведены в табл. 1.



Табл. 1. Количество опорных импульсов на один выходной импульс

Индекс передачи $p$	1	2	3	4	5
Передаточное число передачи $u_p$	1,666	3,332	11,382	22,764	78,1
Количество импульсов $n_{pk}^{gap}$	10	20	71	142	488

Исходя из

$$n_{max} = (z_{max} \cdot u_p) / z_{вых} \quad (8)$$

и при неизменных значениях  $z_{max}$  и  $z_{вых}$ , расчет осуществляется по каждому зубчатому зацеплению, а передаточное число цепи

$$u_p = u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_i; \quad (9)$$

$$n_{pk}^{gap} = \left( z_{max} \cdot \sum_{k=1}^i u_k \right) / z_{вых};$$

$$n_{pq}^{gap} = \left( z_{max} \cdot \sum_{q=1}^e u_q \right) / z_{вых}, \quad (10)$$

где  $u_k$  – передаточное число рассчитываемого зубчатого зацепления;  $u_q$  – передаточное число рассчитываемого шлицевого соединения.

Величины  $n_{pk}^{gap}$ ,  $n_{pq}^{gap}$  обладают минимальными значениями при  $k = 1$  и имеют максимальное значение при  $k$ , равном количеству зубчатых передач в кинематической цепи  $p$  (см. табл. 1). Следовательно, «лимитирующим соединением» является соединение с индексом  $k = 1$ .

### Критерии контролепригодности

Для «лимитирующего соединения» определяется количество опорных импульсов, соответствующее гарантированному боковому зазору, с помощью выражений (2)–(10) и следующих условий.

1. Кинематическая цепь контролепригодна, если общий предельный износ  $\Delta j_k^{тек}$  «лимитирующей зубчатой пе-

редачи» содержит значение  $n_{p\Delta k} = 4$  или  $k_{крат\Delta k} \cdot n_{p\Delta k} + 2$  (где 2 – «опорные» импульсы, соответствующие значению «нецелого импульса», отбрасываемого аппаратными средствами при оцифровке сигнала), которое формализовано следующим образом:

$$k_{крат\Delta k} \cdot n_{p\Delta k} + 2 = \left( \frac{\left( \Delta j_k^{тек} \cdot \prod_{L=1}^k \frac{z_{1L}}{z_{2L}} \right) \cdot z_{вых}}{\pi \cdot m_{вых}} \right) \cdot \frac{z_{max} \cdot u_p}{z_{вых}}, \quad (11)$$

где  $k_{крат\Delta k}$  – коэффициент кратности для значения износа зубчатой передачи; применяется в случае, если значение  $n_{p\Delta k}$  превышает установленное в  $f$  раз.

2. Кинематическая цепь контролепригодна, если гарантированный боковой зазор  $j_k^{gap}$  «лимитирующей зубчатой передачи» содержит значение  $n_{pk}^{gap} = 4$  или  $k_{кратk} \cdot n_{pk}^{gap} + 2$  (где 2 – «опорные» импульсы, соответствующие значению «нецелого импульса», отбрасываемого аппаратными средствами при оцифровке сигнала;  $k_{кратk}$  – коэффициент кратности для бокового зазора зубчатой передачи; применяется в случае, если значение  $n_{pk}^{gap}$  превышает установленное в  $f$  раз).

При изменении величины износа от 0 до 100 % для «лимитирующей зубчатой передачи» ( $u_p = 1,666$ ) количество опорных импульсов изменяется от 0 до 5, поэтому не могут быть выполнены приведенные выше условия. Предполагается решение задачи поиска парамет-



ров, которые наилучшим образом удовлетворяют условиям 1 и 2. Тогда вы-

ражение параметра  $Z_{\max}$  для задачи будет иметь вид:

$$Z_{\max\text{расч}} = \frac{(k_{\text{кратк}} \cdot n_{\text{рк}}^{\text{гар}} + 2 + k_{\text{крат}\Delta k} \cdot n_{\text{р}\Delta k} + 2) \cdot \pi \cdot m_{\text{вых}}}{\left( (j_k^{\text{гар}} + \Delta j_k^{\text{тек}}) \cdot \prod_{L=1}^k \frac{z_{1L}}{z_{2L}} \right) \cdot u_p} \quad (12)$$

Переопределяя значение  $n_{\text{рк}}^{\text{гар}}$  (при  $n_{\text{р}\Delta k} = k_{\text{крат}\Delta k} \cdot n_{\text{р}\Delta k} + 2$ ), получаем требуемое значение  $Z_{\max}$ . При невозможности изменений кинематической цепи объекта диагностирования изменение параметров  $j$ ,  $\Delta j$ ,  $m_{\text{вых}}$ ,  $Z_{\text{вых}}$ ,  $Z_{\max}$  возможно только на стадии проектирования. В этом случае при анализе кинематической цепи интерес представляют результаты, полученные с использованием реальных значений параметров  $j$ ,  $\Delta j$ ,  $m_{\text{вых}}$ ,  $Z_{\text{вых}}$ ,  $Z_{\max}$ . При определении величины  $Z_{\max}$  величины  $n_{\text{рк}}$  и  $n_{\text{р}\Delta k}$  подвергаются перерасчету таким образом, чтобы полученная частота следования опорных импульсов была кратна количеству зубьев маховика:

$$Z_{\max\text{расч}} / Z_{\max} = s_i, \quad (13)$$

где  $s_i$  – целое количество первичных преобразователей возле источника опорного сигнала.

Если в результате подготовки диагностических данных найдено значение  $s_i$  и выполнены условия 1 и 2, проверяются условия по шлицевому, шпоночному и муфтовому соединению.

3. Кинематическая цепь контролепригодна, если общий предельный износ  $\Delta j^{\text{тек}}_q$  «лимитирующего шлицевого, шпоночного или муфтового соединения» (шлицы вала со шлицевой ступицей или/и с зубчатой полумуфтой синхронизатора, шпоночный вал со шпонкой и втулка) содержит значение  $n_{\text{р}\Delta q} = 4$ , или  $k_{\text{крат}\Delta q} \cdot n_{\text{р}\Delta q} + 2$  (где 2 – опорные импульсы, соответствующие значению «нецелого импульса», отбрасываемого аппаратными средствами при оцифровке сигнала), которое формализуется следующим образом:

$$k_{\text{крат}\Delta q} \cdot n_{\text{р}\Delta q} + 2 =$$

$$= \left( \frac{\left( \left( \frac{\Delta j_q^{\text{тек}}}{r_{\text{шл}}} \right) \cdot \left( \frac{z_{\text{шл}} \cdot m_{\text{шл}}}{2} \right) \cdot \prod_{M=1}^q \frac{z_{1M}}{z_{2M}} \right) \cdot Z_{\text{вых}}}{\pi \cdot m_{\text{вых}}} \right) \times \frac{Z_{\max} \cdot u_p}{Z_{\text{вых}}}, \quad (14)$$

где  $k_{\text{крат}\Delta q}$  – коэффициент кратности для величины износа шлицевого, шпоночного или муфтового соединения, применяется в случае, если значение  $n_{\text{р}\Delta q}$  превышает установленное в  $f$  раз.

4. Кинематическая цепь контролепригодна, если гарантированный боковой зазор  $j^{\text{гар}}_q$  «лимитирующего шлицевого, шпоночного или муфтового соединения» содержит значение  $n^{\text{гар}}_{\text{р}q} = 4$  или  $k_{\text{крат}q} \cdot n^{\text{гар}}_{\text{р}q} + 2$  (где 2 – опорные импульсы, соответствующие значению «нецелого импульса», отбрасываемого аппаратными средствами при оцифровке сигнала;  $k_{\text{крат}q}$  – коэффициент кратности для зазора шлицевого, шпоночного или муфтового соединения; применяется в случае, если значение  $n^{\text{гар}}_{\text{р}q}$  превышает установленное в  $f$  раз).

Определение «лимитирующего шлицевого, шпоночного или муфтового соединения» реализуется аналогично зубчатой передаче, по передаче 9 МТЗ-1221. Согласно результатам, представленным в табл. 2, очевидно, что для «лимитирующего шлицевого, шпоночного или муфтового соединения» количество «опорных» импульсов составляет 2 при 100-процентном износе ( $u_p = 1,666$ ).

Исходя из полученных данных,



можно сделать вывод, что условия 3 и 4 не выполнены. Поиск значения  $Z_{max}$ , которое удовлетворяет условиям 3 и 4,

осуществляется в соответствии со следующим выражением:

$$Z_{maxрасч} = \frac{(k_{кратq} \cdot n_{рq}^{гар} + 2 + k_{крат\Delta q} \cdot n_{р\Delta q} + 2) \cdot \pi \cdot m_{вых}}{\left( \left( (j_q^{гар} + \Delta j_q^{тек}) / r_{шп} \right) \cdot ((z_{шп} \cdot m_{шп}) / 2) \cdot \prod_{M=1}^q \frac{z_{1M}}{z_{2M}} \right) \cdot u_p} \quad (15)$$

Табл. 2. Количество опорных импульсов на один выходной импульс

Индекс передачи $p$ , где находится шлицевой участок вала	1	2
Передаточное число передачи $u_p$	1,666	3,332
Количество импульсов $n_{рq}^{гар}$	2	3

Переопределяя значение  $n_{рq}^{гар}$  (при  $n_{р\Delta q} = k_{крат\Delta q} \cdot n_{р\Delta q} + 2$ ), получаем значение  $Z_{max}$ . При расчете величины  $Z_{max}$  величины  $n_{рq}$  и  $n_{р\Delta q}$  изменяются таким образом, чтобы полученная частота опорных импульсов была кратна количеству зубьев маховика:

$$Z_{maxрасч} / Z_{max} = s_e, \quad (16)$$

где  $s_e$  – целое количество первичных преобразователей возле источника опорного сигнала.

### Заключение

На последнем этапе подготовки диагностических параметров осуществляется сравнение значений  $s_i$  и  $s_e$ :  $s_i < > s_e$ . По результатам сопоставления из  $s_i$  и  $s_e$  выбирается большее значение количества первичных преобразователей. При выполнении условий 1–4 с заданными  $Z_{max}$ ,  $u_p$ ,  $Z_{вых}$ ,  $m_{вых}$ ,  $Z_{1L}$ ,  $Z_{2L}$ ,  $Z_{1M}$ ,  $Z_{2M}$ ,  $j^{гар_k}$ ,  $j^{гар_q}$ ,  $\Delta j^{тек_k}$ ,  $\Delta j^{тек_q}$  перерасчитываются диагностические параметры  $n_{рp}^{гар}$ ,  $n_{рp}^{пред}$ ,  $n_p$ ,  $n_{р\Delta k}$ ,  $n_{р\Delta q}$ ,  $n_{рpk}^{гар}$ ,  $n_{рpq}^{гар}$ ,  $n_{рpk}^{пред}$ ,  $n_{рpq}^{пред}$ ,  $n_{р\Delta k}^{3.к.}$ ,  $n_{р\Delta k}^{ш}$  по каждой

зубчатой передаче кинематической цепи  $p$  объекта наблюдения, а результаты сохраняются в блоке регистрации данных средства диагностирования. При мониторинге отдельных сборочных единиц, входящих в трансмиссию, используется диагностирование для моноблочной схемы, с отличием в том, что расчет данных и параметров осуществляется в пределах диагностируемой сборочной единицы (передний дополнительный редуктор, коробка передач и т. д.) [4]. В случае кинематических цепей  $p$ , обладающих различными  $u_p$  по объекту наблюдения, полученные значения количества датчиков  $s_i$ ,  $s_e$ , количества опорных импульсов  $n_{рp}^{гар}$ ,  $n_{рp}^{пред}$ ,  $n_p$  по каждой кинематической цепи  $p$  сохраняются в блок регистрации данных. Значения  $s_i$  и  $s_e$  сравниваются между собой для каждой кинематической цепи  $p$  с выбором максимального значения  $s$  для всего объекта наблюдения. По полученным значениям  $s$  и  $Z_{max}$  осуществляется расчет диагностических параметров  $n_{рp}^{гар}$ ,  $n_{рp}^{пред}$ ,  $n_p$ ,  $n_{р\Delta k}$ ,  $n_{р\Delta q}$ ,  $n_{рpk}^{гар}$ ,  $n_{рpq}^{гар}$ ,  $n_{рpk}^{пред}$ ,  $n_{рpq}^{пред}$ ,  $n_{р\Delta k}^{3.к.}$ ,  $n_{р\Delta k}^{ш}$  по каждому соединению  $k$  и  $q$ .

$$n_{p\Delta k} + n_{p\Delta q} = \sum_{k=1}^i \left( \frac{\left( (j_k + \Delta j_k) \cdot \prod_{L=1}^k \frac{z_{1L}}{z_{2L}} \right) \cdot z_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{max}} \cdot u_p}{\pi \cdot m_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{ВЫХ}}} \right) +$$

$$+ \sum_{q=1}^e \left( \frac{\left( \left( \frac{j_q + \Delta j_q}{r_{\text{шл/зМ}}} \right) \cdot \left( \frac{z_{\text{шл/зМ}} \cdot m_{\text{шл/зМ}}}{2} \right) \cdot \prod_{M=1}^q \frac{z_{1M}}{z_{2M}} \right) \cdot z_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{max}} \cdot u_p}{\pi \cdot m_{\text{ВЫХ}} \cdot z_{\text{ВЫХ}}} \right), \quad (17)$$

где  $j_k$  – гарантированное значение бокового зазора зубчатого зацепления, мм;  $\Delta j_k$  – текущее значение износа зубчатого зацепления, мм;  $k$  – количество зубчатых зацеплений кинематической цепи;  $j_q$  – гарантированное значение бокового зазора шлицевого соединения, мм;  $\Delta j_q$  – текущее значение износа шлицевого соединения, мм;  $q$  – количество шлицевых соединений кинематической

цепи;  $u_p$  – передаточное число кинематической цепи.

Данные на завершающей стадии формируют набор диагностических параметров, необходимых для контроля механической трансмиссии объекта наблюдения на всех этапах его эксплуатации [6] и прогнозирования остаточного ресурса [2, 10] как отдельных сборочных единиц, так и объекта в целом [5].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипенко, Г. Л. Компьютерная система диагностирования трансмиссий мобильных машин / Г. Л. Антипенко, А. Н. Максименко, Б. М. Моргалек // Потенциал науки – развитию промышленности, экономики, культуры, личности: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5–8 февр. 2004 г. – Минск: БНТУ, 2004. – № 6. – С. 47–50.
2. Альгин, В. Б. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В. Б. Альгин, С. Н. Поддубко. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 548 с.: ил.
3. Зубчатые передачи в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В. Б. Альгин [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 405 с.: ил.
4. Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DADPE polyimide matrix and fillers of tungsten dichalcogenide nanoparticles upon dry sliding friction / A. D. Breki [et al.] // Inorganic Mater.: Appl. Research. – 2016. – № 7 (4). – P. 542–546.
5. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A. D. Breki [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – № 8 (1). – P. 126–129.
6. Breki, A. D. Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces / A. D. Breki, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – Т. 8, № 4. – P. 509–514.
7. Зубчатые передачи: справочник / Под общ. ред. Е. Г. Гинзбурга. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980. – 416 с.: ил.
8. Долгин, В. П. Надежность технических систем: учебное пособие / В. П. Долгин, А. О. Харченко. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 165 с.: ил.
9. Гадзиковский, В. И. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие / В. И. Гадзиковский. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2015. – 765 с.: ил.
10. Зорин, В. А. Надежность технических систем: учебник для студентов, обучающихся по укрупненной группе специальностей 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта» / В. А. Зорин. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 378 с.: ил.



11. **Ионак, В. Ф.** Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак. – Москва: Машиностроение, 1981. – 128 с.

12. Способ диагностирования зубчатых зацеплений механических передач: пат. ВУ 6802 / Г. Л. Антипенко, Д. Г. Антипенко, А. Н. Максименко, Б. М. Моргалик. – Опубл. 30.03.2005.

*Статья сдана в редакцию 20 мая 2019 года*

**Борис Маркович Моргалик**, канд. техн. наук, доц., Могилевский государственный университет продовольствия. E-mail: borismorgalik@gmail.com.

**Игорь Вадимович Лесковец**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: le@bru.by.

**Boris Markovich Morgalik**, PhD (Engineering), Associate Prof., Mogilev State University of Food Technologies. E-mail: borismorgalik@gmail.com.

**Igor Vadimovich Leskovets**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: le@bru.by.

