

УДК 630*377.44

UDC– 630*377.44

4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. – Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСКОРЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЁЖНОСТЬ НЕСУЩИХ СИСТЕМ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**DETERMINATION OF THE ACCELERATION COEFFICIENT OF TESTS FOR RELIABILITY OF BEARING SYSTEMS OF LOGGING MACHINES**

Алябьев Алексей Федорович

д.т.н., профессор

Scopus Author ID: 57208470075

РИНЦ SPIN-код: 6093-1882

alyabiev@mgul.ac.ru*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1*

Alyabiev Alexey Fedorovich

Doct.Tech.Sci., professor

Scopus Author ID: 57208470075

RSCI SPIN-code: 6093-1882

alyabiev@mgul.ac.ru*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1-ya Institutskaya, 1*

Клубничкин Владислав Евгеньевич

к.т.н., доцент

Scopus Author ID: 57203353572

РИНЦ SPIN-код: 6060-7794

vklubnichkin@mgul.ac.ru*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1*

Klubnichkin Vladislav Evgenievich

Cand.Tech.Sci., assistant professor

Scopus Author ID: 57203353572

RSCI SPIN-code: 6060-7794

vklubnichkin@mgul.ac.ru*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1-ya Institutskaya, 1*

Клубничкин Евгений Евгеньевич

к.т.н., доцент

Scopus Author ID: 57203352852

РИНЦ SPIN-код: 8158-0700

kclubnichkin@mgul.ac.ru*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1*

Klubnichkin Evgeny Evgenievich

Cand.Tech.Sci., assistant professor

Scopus Author ID: 57203352852

RSCI SPIN-code: 8158-0700

kclubnichkin@mgul.ac.ru*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1-ya Institutskaya, 1*

Котов Алексей Александрович

д.т.н., профессор

Scopus Author ID: 57220509462

РИНЦ SPIN-код: 7846-4511

kotov@mgul.ac.ru*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1*

Kotov Alexey Alexandrovich

Dr.Sci.Tech., professor

Scopus Author ID: 57220509462

RSCI SPIN-code: 7846-4511

kotov@mgul.ac.ru*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical University, Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, 1-ya Institutskaya, 1*

В статье представлена методика определения коэффициента ускорения испытаний при испытаниях на надёжность несущих систем лесозаготовительных машин. Ускорение испытаний достигается за счет форсирования деградационных процессов. Потеря работоспособности несущих систем происходит от усталостных разрушений. Нагружение лесных машин представлено в виде регулярно чередующихся групп циклов – блоков. Для определения коэффициента ускорения испытаний используется скорректированная линейная гипотеза усталостного разрушения и уравнение Басквина. Предполагается равенство накопленных

The article presents a method for determining the acceleration coefficient of tests when testing the reliability of bearing systems of logging machines. Acceleration of tests is achieved by forcing degradation processes. The loss of operability of the load-bearing systems occurs from fatigue failures. The loading of forest machines is presented in the form of regularly alternating groups of cycles – blocks. The corrected linear hypothesis of fatigue failure and the Baskwin equation are used to determine the acceleration coefficient of the tests. It is assumed that the accumulated damage during fatigue destruction of the material during operation under operating conditions and during accelerated field tests. The

повреждений при усталостном разрушении материала при работе в условиях эксплуатации и при проведении ускоренных полигонных испытаний. Синхронность (как в эксплуатации) потери работоспособности достигается за счет равенства коэффициентов форсирования испытаний всех блоков спектра нагружения. Приведены условия проведения испытаний необходимые для определения коэффициента ускорения испытаний

Ключевые слова: ИСПЫТАНИЯ НА НАДЁЖНОСТЬ, УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ, БЛОК НАГРУЖЕНИЯ, ВАЛОЧНО-СУЧКОРЕЗНО-РАСКРЯЖЕВОЧНАЯ МАШИНА, ЛЕСНАЯ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНАЯ МАШИНА

synchronicity (as in operation) of the loss of operability is achieved due to the equality of the coefficients of forcing tests of all blocks of the loading spectrum. The article also gives test conditions necessary to determine the test acceleration coefficient

Keywords: RELIABILITY TEST, ACCELERATED TEST, LOAD BLOCK, HARVESTER, FORWARDER

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-194-001>

Одним из наиболее затратных этапов испытаний лесных машин является отработка конструкции машин на надёжность и оценка показателей надёжности. Для сокращения затрат времени и ресурсов проводят ускоренные испытания. Ускорение испытаний достигается за счет уплотнения рабочих циклов и форсирования деградиционных процессов за счет усечения спектра нагрузок, повышения скорости их приложения [1]. Для перехода от значения показателей, полученных при ускоренных испытаниях, к показателям при нормальной эксплуатации используется коэффициент ускорения испытаний [1]. Определение коэффициента ускорения испытаний при форсировании нагрузки является сложной задачей. Рассмотрим определение коэффициента ускорения комплексных испытаний на надёжность валочно-сучкорезно-раскряжёвочной машины (ВСРМ) и лесной погрузочно-транспортной машины (ПТМ).

В состав ВСРМ и ПТМ входят оборудование, узлы и агрегаты, которые выпускаются серийно и для которых производителем определены показатели надёжности. К серийным изделиям относятся технологическое оборудование, двигатель, трансмиссия. Таким образом, комплексные

<http://ej.kubagro.ru/2023/10/pdf/01.pdf>

испытания машин сводятся к испытаниям на надёжность их несущих систем.

Ускоренные испытания проводятся методом моделирования эксплуатационных процессов нагружения с их интенсификацией за счет исключения слабонагруженных режимов работы, увеличения частоты работы манипулятора с повышенными нагрузками, увеличения частоты и величины нагрузок при переезде неровностей путём повышения давления воздуха в шинах и движения по треку с полной загрузкой с повышенными рабочими скоростями первого диапазона трансмиссии. При проведении ускоренных испытаний несущие системы ВСРМ и ПТМ не должны подвергаться нагрузкам, несвойственным им при работе в лесу.

Технологический цикл ВСРМ и ПТМ состоит из отдельных операций с различным уровнем циклических напряжений в несущей системе. Представим нестационарное нагружение в виде регулярно чередующихся групп циклов – блоков нагружения. Циклы с максимальными напряжениями, меньшими предела выносливости, в расчет не принимаем, так как они на общей долговечности не сказываются. Совокупность блоков нагружения будет образовывать спектр нагружения [2].

Для определения внешних воздействующих факторов зададим необходимые параметры машин. ВСРМ оснащена:

- манипулятором KESLA 1809H с вылетом стрелы 8,7 м, с максимальным грузовым моментом 212 кН·м (нетто);
- харвестерной головкой KESLA 28RH II 2WD массой 1380 кг;
- ротатором Indexator G141 массой 56,6 кг.

Грузоподъемность ПТМ 19000 кг. ПТМ оснащена:

- манипулятором KESLA 14F с вылетом стрелы 8,22 м, с максимальным грузовым моментом 120 кН·м (нетто);
- ротатором Indexator G141 массой 56,6 кг;

- грейфером Mesera MF36 массой 205 кг;
- грузовой платформой со средней площадью поперечного сечения $5,74 \text{ м}^2$.

При работе ВСРМ выделим следующие блоки:

1. Захват дерева, спиливание, подтаскивание дерева к месту его обработки, обработка дерева (обрезка сучьев и раскряжёвка). При работе в крупном густом лесу ВСРМ со стрелой вылетом 8,7 м на одной стоянке спиливает порядка 6 деревьев (6 циклов нагружения);
2. Переезд к следующему месту спиливания деревьев.

В первом блоке в несущей системе наибольшие напряжения возникают при подтаскивании дерева к месту обработки. При ускоренных испытаниях первый блок нагружения будет состоять из 6 циклов, состоящих из перемещения груза максимальной массы с одной стороны ВСРМ на другую с фиксацией груза на опорной поверхности и разгрузкой манипулятора. Считаем, что ВСРМ работает в крупном лесу. Диаметр ствола от 32 до 60 см. Принимая среднее значение диаметров равное 46 см за диаметр дерева (сосна), определим его массу m

$$m = m_{\text{хл}} + m_{\text{кр}} = \rho V_{\text{хл}} + 1000k_{\text{кр}} V_{\text{хл}} = 1978 \text{ кг.}$$

где $m_{\text{хл}}$ – масса хлыста, $m_{\text{кр}}$ – масса кроны, $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ – плотность хлыста, $V_{\text{хл}} = 1,75 \text{ м}^3$ – объём хлыста, $k_{\text{кр}} = 0,33$ – массовый коэффициент кроны.

Максимальная масса груза, перемещаемого при испытаниях, равна максимальной грузоподъёмности манипулятора (с учетом массы ротатора и харвестерной головки) при минимальном вылете стрелы (3860 кг). Таким образом, нагрузка по массе при испытаниях будет превышать среднюю в 1,95 раза, а по моменту в 1 – 1,95 раза, минимальное значение превышения будет, если сравнивать с вариантом при обработке дерева на максимальном вылете стрелы. Среднее значение отношения нагрузки по моменту при ускоренных испытаниях p_t к нагрузке в условиях

эксплуатации p равно коэффициенту форсирования испытаний по нагрузке $k_{\text{ВСРМ}}$ и составит

$$k_{\text{ВСРМ}} = \frac{p_t}{p} = 1,475$$

Это значение будем принимать в дальнейших расчетах.

Второй блок нагружения (переезд к следующему месту спиливания деревьев) в расчёт не принимаем, так как рабочая нагрузка отсутствует, скорость и расстояние переезда минимальные, максимальные напряжения в несущей системе не превышают предел выносливости. Однако, при испытаниях этот блок необходим, так как накопление усталостных повреждений, согласно скорректированной линейной гипотезе Когаева, зависит от характера чередования нагрузочных блоков [2].

При работе ПТМ выделим следующие блоки:

1. Погрузка ПТМ;
2. Перевозка груза;
3. Разгрузка ПТМ;
4. Холостой ход.

Испытания ПТМ проводятся в форсированном режиме и у нас четыре блока нагружения. Для обеспечения синхронности потери работоспособности (соблюдения принципа автомодельности) [1] необходимо обеспечить равенство значений коэффициентов ускорения испытаний всех блоков спектра нагружения. Так как во всех блоках нагружения разрушение происходит от усталости, то обеспечивается сочетаемость принципов ускоренных испытаний [1].

Первый блок нагружения. Средняя площадь поперечного сечения грузового отсека $5,78 \text{ м}^2$, при среднем диаметре 46 см и коэффициенте полнодревесности лесоматериалов 0,6 на грузовую платформу помещаются 9 сортиментов длиной 6,5 м. Масса одного сортимента 1978 кг. При погрузке и разгрузке оператор грузит по одному сортименту.

Максимальная грузоподъемность манипулятора при минимальном вылете (с учетом массы ротатора и грейфера) 4008 кг на вылете стрелы 3 м (рис. 1). Таким образом, нагрузка по массе при испытаниях будет превышать среднюю в 2,026 раза, а по моменту в 1 – 2,026 раза, минимальное значение превышения будет, если сравнивать с вариантом при обработке дерева на максимальном вылете стрелы. Среднее значение отношения нагрузки по моменту при ускоренных испытаниях p_{t1} к нагрузке в условиях эксплуатации p_1 равно коэффициенту форсирования испытаний по нагрузке $k_{ПТМ1}$ и составит

$$k_{ПТМ1} = \frac{p_{t1}}{p_1} = 1,513$$

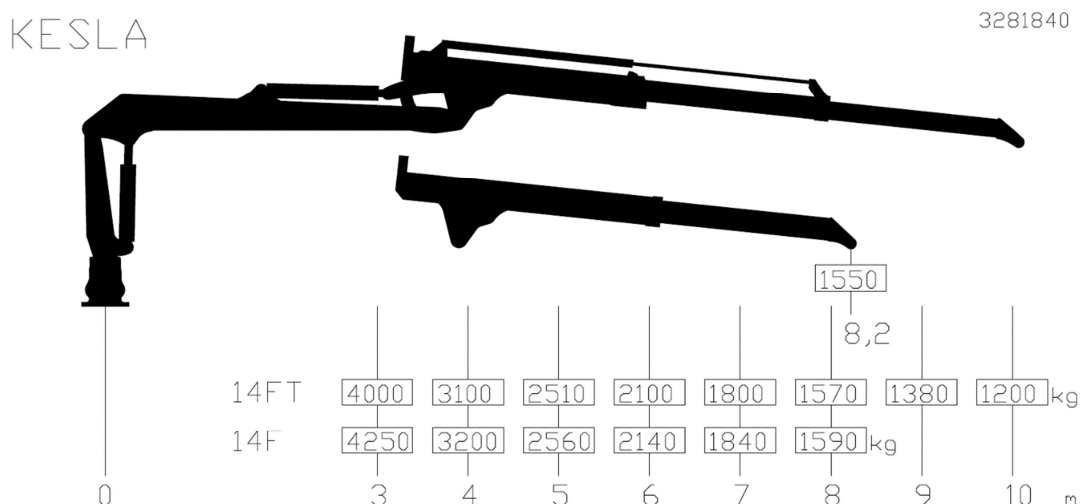


Рисунок 1 – Грузовые характеристики манипулятора Kesla 14F 8.2

Количество циклов нагружения в блоке примем 9, т.е. число сортиментов на грузовой платформе.

Второй блок нагружения. Так как количество блоков нагружения второго типа равно количеству блоков нагружения первого типа, то для обеспечения соблюдения принципа автотельности необходимо обеспечить равенство коэффициентов форсирования испытаний по нагрузке. ПТМ передвигается по треку (в том числе преодолевая искусственные неровности, подъёмы и спуски) с полной загрузкой (четыре

груза массой 4 т и один груз массой 3 т, всего 19 т) и на повышенных рабочих скоростях первого диапазона трансмиссии. На 200 м волокна приходится в среднем 5 единичных препятствий высотой 0,15 ... 0,25 м. Принимая среднее расстояние трелёвки 300 м, получим, что на треке должно быть 7 – 8 препятствий. Используя рекомендации [1] и изменяя высоту препятствий, скорость движения ПТМ и давление в шинах, получаем коэффициент форсирования испытаний по нагрузке на втором блоке нагружения $k_{\text{ПТМ}2}$ равным коэффициенту форсирования испытаний по нагрузке на первом блоке нагружения $k_{\text{ПТМ}1}$

$$k_{\text{ПТМ}2} = k_{\text{ПТМ}1} = \frac{p_{t2}}{p_2} = 1,513$$

Третий блок нагружения (разгрузка). Количество блоков нагружения третьего типа равно количеству блоков нагружения первого типа. Кроме того, при разгрузке коэффициент форсирования испытаний равен коэффициенту форсирования при погрузке. Таким образом, обеспечивается соблюдение принципа автомодельности.

Четвёртый блок нагружения (холостой ход) в расчёт не принимаем, так как рабочая нагрузка отсутствует, а максимальные напряжения в несущей системе не превышают предел выносливости. Однако, при испытаниях этот блок необходим, так как накопление усталостных повреждений, согласно скорректированной линейной гипотезе Когаева, зависит от характера чередования нагрузочных блоков [2].

Спектры нагружения ВСРМ и ПТМ приведены на рис. 2.

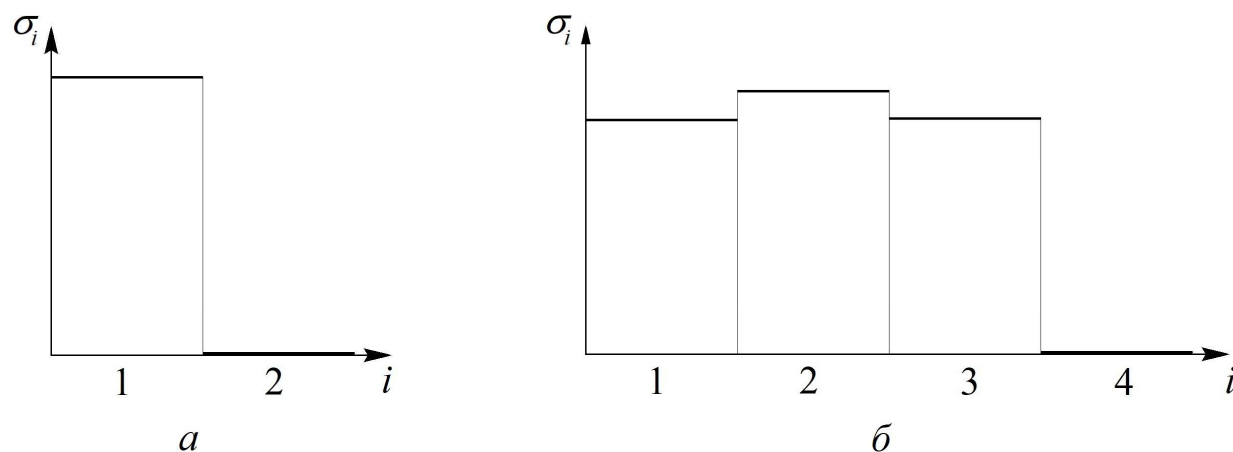


Рисунок 2 – Спектры нагружения: а – ВСРМ, б – ПТМ;

i – номер блока нагружения, σ_i – напряжения в i -м блоке

Для определения коэффициента ускорения испытаний K воспользуемся скорректированной линейной гипотезой В.П. Когаева, согласно которой усталостное разрушение произойдет, если накопленные повреждения достигнут предельного значения a_p , зависящего от формы (характера чередования блоков) спектра нагружения.

$$\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} = a_p$$

где n_i – число i -х блоков при нагружении конструкции полным спектром нагружения в условиях эксплуатации до усталостных разрушений; N_i – число блоков при нагружении конструкции i -м блоком нагружения из спектра полученного в условиях эксплуатации до усталостных повреждений; j – число блоков нагружения в спектре.

При работе в условиях эксплуатации и при проведении ускоренных полигонных испытаний накопленные повреждения должны быть одинаковы при усталостном разрушении материала. Для этого необходимо обеспечить соответствие формы спектра нагружения при проведении испытаний форме спектра нагружения в условиях эксплуатации (рис. 2). В результате получим:

$$\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^j \frac{n_{ti}}{N_{ti}}, \quad (1)$$

где n_{ti} – число i -х блоков при нагружении конструкции полным спектром нагружения в условиях испытаний до усталостных разрушений; N_{ti} – число блоков при нагружении конструкции i -м блоком нагружения из спектра используемого в условиях испытаний до усталостных повреждений.

Так как в спектре нагружения блоки представлены по одному разу, то

$$n_1 = n_2 = \dots = n_i = n, \quad n_{t1} = n_{t2} = \dots = n_{ti} = n_t$$

и соотношение (1) будет иметь следующий вид

$$n \sum_{i=1}^j \frac{1}{N_i} = n_t \sum_{i=1}^j \frac{1}{N_{ti}}, \quad (2)$$

Воспользуемся так же уравнением Басквина:

$$N_i \sigma_i^m = N_{ti} \sigma_{ti}^m.$$

где σ_i – максимальная амплитуда напряжений i -го блока спектра в условиях эксплуатации; σ_{ti} – максимальная амплитуда напряжений i -го блока спектра в условиях испытаний; m – константа кривой усталости.

Будем считать, что материал конструкции работает в области многоциклового усталости, в которой зависимость между напряжениями и деформациями практически линейна. Тогда напряжения пропорциональны нагрузке и уравнение Басквина можно написать в виде

$$N_i = N_{ti} \left(\frac{p_{ti}}{p_i} \right)^m = N_{ti} (k_i)^m, \quad (3)$$

где k_i – коэффициент форсирования испытаний по нагрузке i -го блока спектра.

Определим коэффициент ускорения испытаний K , используя соотношения (2), (3) и равенство коэффициентов форсирования испытаний k_i во всех ненулевых блоках спектра $k_i = k$ при $i = 1, \dots, j$:

$$K = \frac{n}{n_t} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{1}{N_{ti}}}{\sum_{i=1}^j \frac{1}{N_i}} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{1}{N_{ti}}}{\frac{1}{(k)^m} \sum_{i=1}^j \frac{1}{N_{ti}}} = (k)^m,$$

или

$$K = (k)^m. \quad (4)$$

При работе ВСРМ коэффициент ускорения испытаний K будет равен:

$$K_{\text{ВСРМ}} = (k_{\text{ВСРМ}})^m = 1,475^4 = 4,7.$$

При работе ПТМ коэффициент ускорения испытаний K будет равен:

$$K_{\text{ПТМ}} = (k_{\text{ПТМ}})^m = 1,513^4 = 5,2.$$

При расчетах было значение $m = 4$. Оно принято на основании литературных источников [1, 2]. При проведении испытаний значение m уточняется.

Таким образом, соотношение (4) позволят определять коэффициент ускорения испытаний. Оно получено исходя из равенства накопленных повреждений при усталостном разрушении материала при работе в условиях эксплуатации и при проведении ускоренных полигонных испытаний. Соотношение справедливо при соблюдении следующих условий:

- соответствие формы спектра нагружения при проведении испытаний форме спектра нагружения в условиях эксплуатации;
- обеспечение синхронности потери работоспособности (соблюдения принципа автомобильности), для чего необходимо обеспечить равенство значений коэффициентов ускорения испытаний всех ненулевых блоков

спектра нагружения, что возможно при равенстве коэффициентов форсирования испытаний по нагрузке;

- материал конструкции должен работать в области многоциклового усталости, в которой зависимость между напряжениями и деформациями практически линейна.

Литература.

1. Р 50-54-80-88 Рекомендации. Надежность в технике. Комплексные испытания изделий машиностроения на надежность. Общие положения. – М.: ВНИИНМАШ, 1988. 63 с.

2. Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 1 – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.

References

1. R 50-54-80-88 Rekomendacii. Nadezhnost' v tehnike. Kompleksnyye ispytaniya izdelij mashinostroenija na nadezhnost'. Obshhie polozhenija. M.: VNINMASH, 1988. 63 s.

2. Orlov P.I. Osnovy konstruirovaniya: Spravochno-metodicheskoe posobie. V 2-h kn. Kn. 1 – M.: Mashinostroenie, 1988. – 560 s.