

УДК 62:630*3

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕСНЫХ МАШИН

²Тимохова О.М., ¹Кручинин И.Н., ²Тимохов Р.С.¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Екатеринбург;²ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта,

e-mail: chonochka@mail.ru

Механизм лесных машин является системой твердых тел, и поэтому механизмы имеют как весьма простое, так и достаточно сложное и разнообразное строение (структуру). Строением механизма определяются такие его важнейшие характеристики, как виды осуществляемых движений, способы их преобразования, число степеней свободы. Наложение связей сопровождается формированием механизма, то есть позволяет соединить отдельные его части в единую систему. При проектировании нужно из множества разнообразных механизмов выбрать самый подходящий и правильно подобрать его основные структурные элементы. В статье рассмотрен процесс расчета надежности функционирования механических систем несколькими способами. В данном случае в процессе расчета надежности в качестве параметров функционирования, наиболее полно характеризующих процесс перемещения, следует рассматривать функции работы действующих сил по пути перемещения. Проанализированные методы позволяют достаточно просто и принципиально точно оценить надежность функционирования однозвенных пружинно-шарнирных механизмов, замков и толкателей лесных машин. Данный подход позволяет на этапе проектирования определить энергетические параметры привода, обеспечивающие требуемый уровень надежности функционирования систем лесных машин, и тем самым сократить объем конструкторско-доводочных испытаний и затрат на разработку.

Ключевые слова: механизм, твердое тело, надежность, звено, механическая система, аналитический метод, статистический метод

METHODS FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF FUNCTIONING OF SOME MECHANICAL SYSTEMS FOR FOREST MACHINES

²Timokhova O.M., ¹Kruchinin I.N., ²Timokhov R.S.¹Ural State Forestry University, Yekaterinburg;²Ukhta State Technical University, Ukhta, e-mail: chonochka@mail.ru

The mechanism of forest machines is a system of solid bodies and therefore the mechanisms have both a very simple and a rather complex and diverse structure (structure). The structure of the mechanism determines its most important characteristics, such as the types of movements carried out, the methods of their transformation, the number of degrees of freedom. The imposition of links accompanies the formation of the mechanism, that is, it allows you to connect its individual parts into a single system. When designing, it is necessary to choose the most suitable from a variety of different mechanisms and correctly select its main structural elements. The article considers the process of calculating the reliability of the functioning of mechanical systems in several ways. In this case, in the process of calculating reliability, as the parameters of functioning that most fully characterize the process of movement, one should consider the functions of the work of the acting forces along the path of movement. The analyzed methods make it possible to fairly simply and fundamentally accurately assess the reliability of the functioning of single-link spring-hinged mechanisms, locks and pushers of forest machines. This approach allows at the design stage to determine the energy parameters of the drive that provide the required level of reliability of the forest machine systems and thereby reduce the amount of design and development tests and development costs.

Keywords: mechanism, solid, reliability, link, mechanical system, analytical method, statistical method

Любой современный механизм состоит из твердых тел, объединенных в одну общую систему. Главное назначение данной системы – преобразовывать движение одного или нескольких твердых тел в необходимые движения других твердых тел. Строение (структура) механизмов может иметь как простое, так и довольно сложное исполнение. В прямой зависимости от строения (структуры) механизма находятся выполняемые им движения, варианты преобразования этих движений, а также количество степеней свободы. Наложение связей – неотъемлемая часть соединения отдельных звеньев в механизм. От правильного выбора и распределения этих связей зависят надежность и ра-

ботоспособность механизма. В связи с этим фактом очень важно знать основные виды и структуру (закономерности их строения) современных механизмов [1, 2].

Цель исследования – на этапе проектирования определить энергетические параметры привода, обеспечивающие требуемый уровень надежности функционирования систем лесных машин, и тем самым сократить объем конструкторско-доводочных испытаний и затраты на разработку.

Материалы и методы исследования

Наложение связей сопровождается формированием механизма, то есть позволяет соединить отдельные его части в единую

систему. Надежная эксплуатация в значительной степени определяется правильным их распределением в строении механизма. Для этого при проектировании нужно из множества разнообразных механизмов выбрать самый подходящий и правильно подобрать его основные структурные элементы [3, 4].

Изменение взаимного положения в пространстве материальных тел или положение частей данного тела определяется строением механизма. Звенья в механизме соединяются с помощью кинематических пар разного вида в зависимости от числа связей, накладываемых на относительное движение звеньев. Эти варианты анализируются на основе структурной схемы механизма, которая может быть представлена назначением.

Результат срабатывания многих механических систем – перемещение подвижной части из некоторого начального положения в конечное, определяемое конструктивной схемой. Очевидно, достижение подвижной частью заданного конечного положения может служить критерием безотказности функционирования такой системы [5, 6]. В этом случае надежность системы может быть оценена вероятностью выполнения условий срабатывания:

$$H_{\phi} = P\{x = x_k\}.$$

Проведение расчетов по данному соотношению возможно методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) с использованием известных формул математической статистики [7]. Однако применение этого метода для подтверждения вероятности безотказной работы высоконадежных систем требует расчета большого количества реализаций процесса перемещения. Более глубокую информацию о вероятностных свойствах системы можно получить из исследования модели процесса функционирования и выработки соответствующих условий безотказности [8, 9].

Результаты исследования и их обсуждение

Функционирование системы (процесс перемещения ее подвижной части) характеризуется соотношением движущих сил $F_{\partial\partial}(x)$, развиваемых соответствующим приводом, и сил сопротивления движению $F_c(x)$, наличие которых обусловлено конструктивной схемой. При этом часть энергии привода идет на преодоление сил сопротивления на участке перемещения, а ее избыток переходит в кинетическую энергию подвижных частей.

Очевидно, для того чтобы происходил процесс перемещения, достаточно выпол-

нения неравенства $F_{\partial\partial}(x) > F_c(x)$ на всем участке перемещения $[0, x_k]$. Вероятность выполнения этого неравенства может служить оценкой надежности функционирования системы [10]:

$$H_{\phi} = P\{F_{\partial\partial}(x) > F_c(x); 0 \leq x \leq x_k\},$$

где $F_{\partial\partial}(x)$, $F_c(x)$ – случайные функции своего аргумента (в общем случае).

Однако оценка надежности по последней формуле получается заниженной, так как при этом не учитывается возможность перемещения подвижных частей за счет накопленной кинетической энергии даже в случае превышения сил сопротивления над силами привода. По-видимому, при расчете надежности в качестве параметров функционирования, наиболее полно характеризующих процесс перемещения, следует рассматривать функции работы действующих сил по пути перемещения. При этом надежность определяется как вероятность того, что работа движущих сил системы $A_{\partial\partial}(x)$ превысит работу сил сопротивления $A_c(x)$ на всем пути перемещения, т.е.

$$H_{\phi} = P\{A_{\partial\partial}(x) > A_c(x); 0 \leq x \leq x_k\},$$

где

$$A_{\partial\partial}(x) = \int_0^x F_{\partial\partial}(\xi) d\xi;$$

$$A_c(x) = \int_0^x F_c(\xi) d\xi.$$

Для расчета надежности функционирования механических систем можно использовать два метода.

Аналитический метод. Для решения поставленной задачи преобразуем выражение

$$H_{\phi} = P\{A(x) > 0; 0 \leq x \leq x_k\}, \quad (1)$$

где

$$A(x) = \int_0^x F_{\Sigma}(\xi) d\xi; \quad F_{\Sigma}(\xi) = F_{\partial\partial}(\xi) - F_c(\xi).$$

Таким образом, мы пришли к задаче о нахождении вероятности превышения нулевого уровня случайным процессом $A(x)$ на пути $[0, x_k]$. В общем случае эта задача решена в [10]. Согласно этой работе для H_{ϕ} можно записать следующую оценку снизу:

$$H_{\phi} \geq H_0 \left[1 - \int_0^{x_k} v(x) dx \right],$$

где H_0 – вероятность безотказной работы системы в начальный момент движения;

$v(x)$ – математическое ожидание числа пересечений нулевого уровня в единицу времени.

Выражения для H_0 и $v(x)$ в общем случае можно записать следующим образом:

$$H_0 = P\{F_\Sigma(0) > 0\}; \quad (2)$$

$$v(x) = \int_0^\infty A'(x) f[0, A'(x)] d[A'(x)], \quad (3)$$

где $A'(x) = F_\Sigma(x)$ – производная функция работы $A(x)$;

$f(0, A'(x))$ – совместная плотность распределения $A(x)$ и $A'(x)$ в точке $A(x) = 0$.

Как правило, на практике известны вероятностные характеристики процесса $F_\Sigma(x)$: математическое ожидание $m_F(x)$ и корреляционная функция $k_F(x_1, x_2)$. Тогда, согласно [10], соответствующие характеристики для $A(x)$ могут быть определены из выражений

$$m_A(x) = \int_0^x m_F(\xi) d\xi; \quad (4)$$

$$k_A(x_1, x_2) = \int_0^{x_1} \int_0^{x_2} k_{F_\Sigma}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2, \quad (5)$$

а их взаимная корреляционная функция

$$k_{AF}(x_1, x_2) = \frac{\partial}{\partial x_2} k_A(x_1, x_2). \quad (6)$$

В частном случае, когда процесс $F_\Sigma(x)$ стационарен, вместо (5, 6) будем иметь

$$k_A(x_1, x_2) = \int_0^{x_1} \int_0^{x_2} k_{F_\Sigma}(\xi_2 - \xi_1) d\xi_1 d\xi_2; \quad (7)$$

$$k_{AF}(x_1, x_2) = \int_0^{x_2} k_{F_\Sigma}(\xi) d\xi - \int_0^{x_2 - x_1} k_{F_\Sigma}(\xi) d\xi. \quad (8)$$

Полагая в последнем равенстве $x = x_1 = x_2$, получим выражения для дисперсии

$$D_A^2(x) = 2 \int_0^x (x - \xi) k_{F_\Sigma}(\xi) d\xi \quad (9)$$

и взаимного корреляционного момента

$$k_{AF}(x) = \int_0^x k_{F_\Sigma}(\xi) d\xi. \quad (10)$$

По соотношениям (2)–(10) фактически можно решать задачу определения надежности функционирования широкого класса механических систем.

Характер изменения функции $v(x)$, полученный для нормального стационарного процесса с характеристиками $k_{F_\Sigma}(x) = e^{-|x|}$, $m_{F_\Sigma}(x) = 5e^{-x}$, $0 \leq x \leq I$, представлен на рис. 1. Проведенные исследования пока-

зали, что в окрестности нуля $v(x)$ ведет себя как функция $x^{-1/2}$, чем объясняется резкое убывание $v(x)$ в начале координат. Возрастание $v(x)$ при $x > 0,1$ связано с уменьшением избыточности по силе при перемещении подвижной части системы.

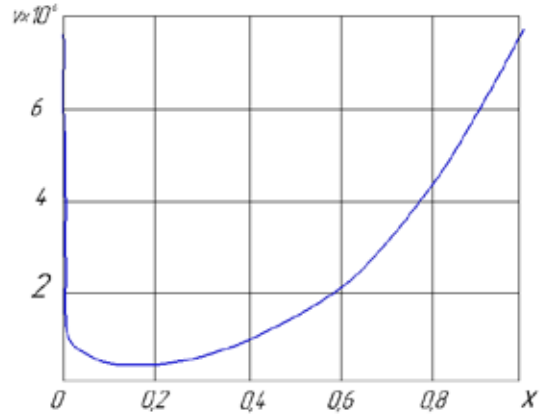


Рис. 1. Изменение функции $v(x)$ при нормальном стационарном процессе

Метод статистического моделирования минимума параметрической функции. Для расчета надежности вторым способом преобразуем выражение (1) к виду

$$H_\phi = P\left\{\frac{A_{\phi\phi}(x)}{A_c(x)} > 1; 0 \leq x \leq x_k\right\} = P\{\eta(x) > 1; 0 \leq x \leq x_k\}, \quad (11)$$

где $\eta(x) = A_{\phi\phi}(x) / A_c(x)$ – коэффициент энергетического запаса системы. Для $\eta(x)$ в точке $x = 0$ получаем

$$\eta(0) = \lim_{x \rightarrow 0} \eta(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{F_{\phi\phi}(x)x}{F_c(x)x} = \frac{F_{\phi\phi}(0)}{F_c(0)}.$$

Таким образом, функция может быть определена на всем участке перемещения $[0; x_k]$.

Событие, состоящее в том, что минимум процесса $\min_x \eta(x)$ на интервале $[0; x_k]$ больше уровня $a = 1$ (рис. 2) эквивалентно событию, заключающемуся в том, что на участке $0 \leq x \leq x_k$ процесс $\eta(x)$ не выйдет за уровень a . Следовательно, соотношение (II) эквивалентно выражению

$$H_\phi = P\{\eta(x) > 1; 0 \leq x \leq x_k\} = P\left\{\min_{0 \leq x \leq x_k} \eta(x) > 1\right\} = \int_1^\infty f_{\min \eta}(y) dy, \quad (12)$$

где $f_{\min \eta}(y)$ – функция плотности распределения случайной величины $\min_x \eta$ [5].

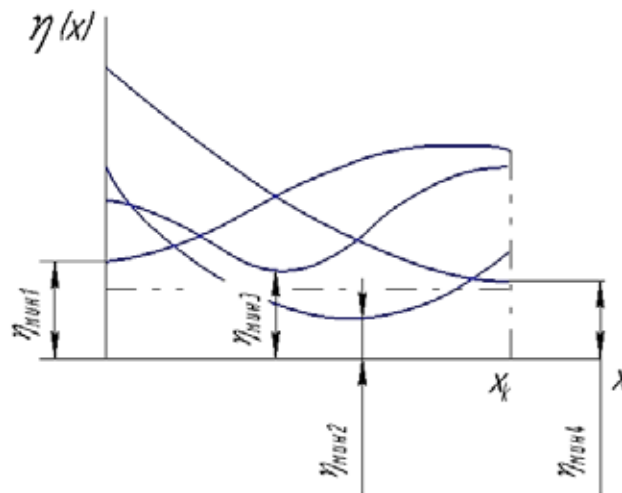


Рис. 2. Зависимость реализации процесса $\eta(x)$ по пути перемещения x

Плотность распределения $f_{\min \eta}(y)$ определяется по выборке значений случайной величины $\min_x \eta$. При этом для каждой реализации возмущающих воздействий $F_{\partial\phi}(x)$ и $F_c(x)$ находятся реализации процесса $\eta(x)$ по пути перемещения x и выбираются соответствующие им значения $\eta_{\min} = \min_x \eta(x)$.

На практике часто встречается случай, когда $F_{\partial\phi}(x)$ является монотонно убывающей случайной функцией x , а $F_c(x)$ – случайной функцией, не зависящей от x . В этом случае надежность функционирования может быть оценена по формуле

$$H_\phi = P\left\{\frac{A_{\partial\phi}(x)}{A_c(x)} > 1\right\}, \quad (13)$$

где

$$A_{\partial\phi}(x_k) = \int_0^{x_k} F_{\partial\phi}(\xi) d\xi;$$

$$A_c(x_k) = \int_0^{x_k} F_c(\xi) d\xi;$$

$F_{\partial\phi}(x) = \varphi(x, b, c, \dots)$, $F_c = d$; b, c, \dots, d – случайные величины, не зависящие от x .

Справедливость выражения (13) подтверждается исследованиями функции $\eta(x)$, которая при принятых условиях является убывающей функцией своего аргумента, достигающей минимума при $x = x_k$. Таким образом, учитывая соотношение (12), получаем

$$H_\phi = P\left\{\min_x \eta(x) > 1\right\} = P\left\{\frac{A_{\partial\phi}(x_k)}{A_c(x_k)} > 1\right\}.$$

Для практических расчетов это выражение целесообразно представить в виде

$$H_\phi = P\{A_{\partial\phi}(x_k) - A_c(x_k) > 0\} = P\{A(x_k) > 0\},$$

где

$$A(x_k) = A_{\partial\phi}(x_k) - A_c(x_k).$$

При нормальном законе распределения случайных величин $A_{\partial\phi}(x_k)$, $A_c(x_k)$

$$H_\phi = F^*\left\{\frac{m_A}{D_A}\right\},$$

где $F^*\left\{\frac{m_A}{D_A}\right\}$ – функция нормированного распределения [6];

$$m_A = m_{A_{\partial\phi}} - m_{A_c};$$

$$D_A = \sqrt{D_{A_{\partial\phi}}^2 + D_{A_c}^2 + 2k_{A_{\partial\phi}A_c}};$$

где $m_{A_{\partial\phi}}$, m_{A_c} , $D_{A_{\partial\phi}}$, D_{A_c} , $k_{A_{\partial\phi}A_c}$ – соответственно математические ожидания, средние квадратические отклонения и взаимный корреляционный момент случайных величин $A_{\partial\phi}(x_k)$, $A_c(x_k)$.

Нетрудно убедиться, что если $F_{\partial\phi}(x)$ – монотонно возрастающая случайная функция, то надежность можно оценить по формуле

$$H_\phi = P\{A_{\partial\phi}(0) - A_c(0) > 0\}$$

Заключение

Рассмотренные методы позволяют достаточно просто и принципиально точно оценить надежность функционирования однозвенных пружинно-шарнирных механизмов, замков и толкателей. При этом возмож-

но уже на этапе проектирования определить энергетические параметры привода, обеспечивающие требуемый уровень надежности функционирования системы и тем самым сократить объем конструкторско-доводочных испытаний и затрат на разработку.

Список литературы

1. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2017. 18 с.
2. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. М.: Стандартинформ, 2002. 29 с.
3. Анцупов В.П., Анцупов А.В., Анцупов А.В. (мл.). Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям // Надежность. 2013. № 3 (46). С. 5–14.
4. Kopp V.Ya. Modeling of automated production systems. Sevastopol: SevNTU, 2012.
5. Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloyev P.A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation // *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy: Engineering Technologies and Systems*. 2020. 30 (1). P. 8–20.
6. Gerasimov Yu.Yu. Sokolov A.P., Syuney V.S. Development Trends and Future Prospects of Cut-to-length Machinery. *Advanced Materials Research*. 2013. Is. 705. P. 468–473.
7. Посметьев В.И., Кадырметов А.М., Никонов В.О. Расчет надежности при конструировании машин и оборудования лесного комплекса: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. 72 с.
8. Заикин А.Н. Определение надежности лесозаготовительных систем // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2008. № 21–2. С. 16–19.
9. Шиловский В.Н., Питухин А.В., Кяльвийнен В.А., Костюкевич В.М. Сравнительная оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2014. 104 с.
10. Лой В.Н., Пищов С.Н. Обеспечение надежности машин и оборудования: учебно-методическое пособие. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2012. 70 с.