

УДК 62-50  
МРНТИ 55.69.01

**МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ПУТЕМ УЛУЧШЕНИЯ ЕЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ**

**КУБАЕВ К.Е., БАЙШОЛАНОВА К.С.**

*Казахский Национальный университет им. аль-Фараби*

**Аннотация:** Выявлены и проанализированы факторы, наряду с ремонтпригодностью, определяющие надежность технической системы. Исследовано влияние ремонтпригодности на надежность технической системы. Невысокая ремонтпригодность является одной из причин того, что поступающие в подразделения и участки машины требуют частых остановок для замены недолговечных элементов, регулировки и устранения отказов. Разработана методика управления надежностью технических систем путем улучшения ее ремонтпригодности. Проанализированы существующие методы оценки ремонтпригодности систем и предложена усовершенствованная методика управления надежностью технических систем путем улучшения ее ремонтпригодности, используя теорию графа. Получен и введен показатель  $\epsilon$ , названный фактором совершенства.

В процессе использования технической системы потребитель несет большие убытки из-за отказов. Это прежде всего прямые затраты на устранение самого отказа и убытки от простаивающей техники. Надежность системы в общем случае определяется долговечностью, безотказностью, ремонтпригодностью и сохранностью.

Нередко для замены быстро изнашивающегося элемента необходимо почти полностью разбирать систему, нарушая взаимосвязи узлов и деталей. Следовательно, серьезные конструктивные недостатки техники вызывают большие затраты рабочего времени и материальных ресурсов при их использовании потребителями.

В предлагаемой методике учитывается технологическая последовательность разборочных работ при капитальном ремонте, использование утвержденных технических норм времени на разборно-сборочные работы.

Результаты ранних исследований авторов показывают, что технологический процесс разборки систем при разборке на элементы включает в себе 7 уровней доступности, а двигателя на детали – 4. На показатели ремонтпригодности существенное влияние оказывает уровень доступности элементов системы. На основании этого далее предлагается связывать показатель надежности элементов системы с уровнем их доступности.

**Ключевые слова:** ремонтпригодность, теория надежности, теория графов, фактор совершенства, показатели ремонтпригодности

**ТЕХНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ СЕҢІМДІЛІГІН, ОНЫҢ ЖӨНДЕУГЕ  
ЖАРАМДЫЛЫҒЫН АРТТЫРУ АРҚЫЛЫ БАСҚАРУ ӘДІСІ**

**Аңдатпа:** Техникалық жүйенің жөндеу жарамдылығымен қатар сенімділігін анықтайтын факторлар айқындалып, талданды. Техникалық жүйенің сенімділігіне жөндеу жарамдылығының әсері зерттелді. Жөндеуге жарамдылықтың төмендеуі бөлімшелер мен учаскелерге келіп түсетін машиналардың ұзаққа жарамсыз элементтерін ауыстыруды, тоқтап қалуды жоюды реттеу үшін жиі тоқтауды талап ететін себептердің бірі болып

табылады. Техникалық жүйелердің сенімділігін, оның жөндеуге жарамдылығын жақсарту жолдары арқылы басқару әдістемесі әзірленді.

Жүйелердің жөндеу жарамдылығын бағалаудың қазіргі әдістері талданды және техникалық жүйелердің сенімділігін басқаруда оның жөндеу жарамдылығын графтар теориясын жақсарту жолымен жетілдірілген әдістемесі ұсынылды. Жетілдіру факторы деп аталатын  $\varepsilon$  көрсеткіші алынып енгізілді.

Техникалық жүйені пайдалану үрдісінде ақауларға байланысты тұтынушы үлкен шығындарға ұшырайды. Бұл ең алдымен ақаулықты жоюға кеткен шығындар және істен шыққан жабдықтың тоқтап қалуынан болатын шығындар. Жалпы жағдайда, жүйенің сенімділігі ұзақтылыққа, тұрақтылыққа және қауіпсіздікке байланысты болады.

Көбіне тозған элементті ауыстыру үшін компоненттер мен бөлшектердің өзара байланысын бұзып, жүйені толығымен бөлшектеу қажет. Демек, технологиядағы күрделі кемшіліктер тұтынушылар пайдаланған кезде жұмыс уақыты мен материалдық ресурстардың үлкен шығынын тудырады.

Аталған әдістеме күрделі жөндеу кезінде бөлшектеу жұмыстарының технологиялық реттілігін, бөлшектеу және құрастыру уақытына бекітілген техникалық стандарттарды қолдануды ескереді.

Авторлардың алдыңғы зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бөлшектеу кезінде жүйелерді бөлшектеу технологиялық процесі қолжетімділіктің 7 деңгейін, ал бөлшектерге арналған қозғалтқышты – 4 деңгейін қамтиды. Жүйелік элементтердің қолжетімділік деңгейі тұрақтылық көрсеткіштеріне айтарлықтай әсер етеді. Осының негізінде жүйелік элементтердің сенімділік көрсеткіштерін олардың қолжетімділік деңгейімен байланыстыру ұсынылады.

**Түйінді сөздер:** жөндеуге жарамдылық, сенімділік теориясы, графтар теориясы, жетілдіру факторлары, жөндеуге жарамдылық көрсеткіштері

## METHODS OF MANAGEMENT OF TECHNICAL SYSTEMS RELIABILITY BY IMPROVING EFFICIENCY

**Abstract:** Identified and analyzed factors, along with maintainability, determining the reliability of the technical system. The influence of maintainability on the reliability of a technical system is investigated. Low maintainability is one of the reasons that entering the units and sections of the machine require frequent stops to replace short-lived elements, adjust and eliminate failures.

A technique for managing the reliability of technical systems by improving its maintainability has been developed. The existing methods for evaluating the maintainability of systems are analyzed and an improved technique for managing the reliability of technical systems by improving its maintainability using the graph theory is proposed. The indicator  $\varepsilon$ , called the perfection factor, is obtained and introduced.

In the process of using the technical system, the consumer suffers large losses due to failures. This is primarily the direct costs of eliminating the failure itself and losses from the downtime of the failed equipment. The reliability of the system in the general case is determined by the durability, reliability, maintainability and safety.

Often, to replace a wearing element, it is necessary to almost completely disassemble the system, disrupting the relationships of components and parts. Consequently, serious design flaws in technology cause a large expenditure of working time and material resources when used by consumers. The proposed methodology takes into account the technological sequence of dismantling work during overhaul, the use of approved technical standards for time for dismantling and assembling.

*The results of early research by the authors show that the technological process of disassembling systems when disassembling into elements comprises 7 levels of accessibility, and the engine for parts - 4. The level of accessibility of system elements has a significant impact on maintainability indicators. Based on this, it is further proposed to interlink the reliability indicator of system elements with the level of their availability.*

**Key words:** *maintainability, reliability theory, graph theory, perfection factor, maintainability indicators.*

### **Введение**

Теория надежности дает нам методы не простой констатации поломок, сборе материалов об отказах, а систематизации этих фактов, прогнозировать и управлять возможными неисправностями. В общем случае появление отказов как событие носит случайный характер. В своей практической деятельности каждый инженерно-технический работник сталкивается с той или иной поломкой. И особенно большие организационные трудности появляются, если выходят из строя те детали и узлы, заменить которые трудоемко. Но, применяя методы теории надежности, можно прогнозировать и уменьшить их трудоемкость.

Техническое средство состоит из множества элементов, каждый из которых таит в себе опасность поломки, приводящий к отказу всей системы. Кроме того, различные детали не одинаковы по стоимости в соответствии с трудоемкостью их изготовления, применяемые материалы и другие факторы. В этом и нужно искать причины условного деления элементов системы на «ответственные» и «неответственные» хотя, с точки зрения надежности, при поломке и тех, и других мы имеем дело с отказом. Это свидетельствует о высокой ответственности каждого элемента.

Система в теории надежности позволяет совместное действие объектов, предназначенных для самостоятельного выполнения заданных функций. В надежном отношении конструкцию изделия как систему следует представить в виде блок-схемы. Причем соединение отдельных элементов системы может быть последовательным или параллельным \`vv.

При конструировании технической системы взаимное влияние элементов системы с разными ресурсами и трудоемкостями их замены на их доступность определяет надежность системы в целом.

Не в меньшей степени определяющими надежность современной технической системы являются ее ремонтпригодность. В связи с этим нами поставлена цель на увеличение надежности технической системы путем улучшения ее ремонтпригодности. Исходя из поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 1) проанализировать факторы, наряду с ремонтпригодностью, влияющие на надежность технической системы;
- 2) исследовать влияние ремонтпригодности на надежность технической системы;
- 3) разработать методику управления надежностью технических систем путем улучшения ее ремонтпригодности.

Актуальность и изученность вопроса. Повышение надежности технических систем актуально всегда. Этой проблеме посвящено много работ исследователей [1-12 и др.]. Анализируя данные и другие работы, рост надежности систем является одной из ведущих задач индустрии. В связи с ростом автомобильного транспорта для этой отрасли вопрос надежности наиболее важен. Увеличение значения надежности машин при их проектировании и изготовлении говорит о статистических данных, где расходы на поддержание их в работоспособном состоянии непрерывно растут. Ежегодные потери экономики, связанные с обслуживанием и ремонтом технических средств за период

эксплуатации, в несколько раз превышают их первоначальную стоимость. Низкий уровень надежности транспортных средств существенно снижает их производительность из-за простоев в ремонте. Компьютеризация конструкций систем и усиление требований к ним привели к тому, что проблема повышения их надежности приобрела большое значение. Анализ характера и причин отказов базируется на глубоких знаниях физической природы их возникновения и развития, т.е. знаний инженерно-физических основ надежности. Процессы, приводящие к потере системы рабочего состояния, включают в себя усталостное разрушение, изнашивание конструкционных материалов, коррозию и старение. При эксплуатации технических систем подавляющее большинство деталей достигают предельного состояния из-за износа. Обработка такой информации позволяет оценить уровень фактической надежности той или иной модели технической системы, агрегата, узла, детали, выявить слабые места в конструкции, разработать конкретные мероприятия по повышению надежности и опти-

мизации системы поддержания технических средств в рабочем состоянии. Информация о надежности обрабатывается методами математической статистики по показателям, оценивающим отдельные свойства надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость) и системными показателями, оценивающими несколько ее свойств одновременно. Обеспечение необходимого уровня надежности является одной из основных задач технических систем важной составляющей общей системы обеспечения надежности.

Анализ факторов, наряду с ремонтпригодностью, влияющих на надежность технической системы

В процессе использования систем потребитель несет большие убытки из-за отказов. Это прежде всего прямые затраты на устранение самого отказа и убытки от простоя отказавшей системы. Надежность в общем случае определяется долговечностью, безотказностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью (рис. 1).



Рис. 1 – Составляющие надежности

Количественно ремонтпригодность оценивается рядом комплексных и частных показателей и коэффициентов, которые будут рассмотрены ниже. Следует подчеркнуть ошибочность отождествления надежности с безотказностью. Ибо систему, безотказно работающую в течение небольшого промежутка времени, нельзя назвать надежной, так как не обеспечивается другой показатель – долговечность. Такое положение, видимо, взято из других отраслей техники, где имеются невосстанавливаемые системы, когда первый отказ означает конец. Количественная оценка

долговечности машины выражается в техническом ресурсе или сроке службы. Часто эти понятия смешивают, что недопустимо. Технический ресурс машины, узла и агрегата – сумма интервалов времени безотказной работы за весь период эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния. Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации машины до того же состояния. Отсюда следует, что две машины, имеющие одинаковый технический ресурс при разной годовой загрузке, будут иметь различные сроки службы.

### Ремонтопригодность технических систем

При проектировании системы конструкторы зачастую стремятся только к обеспечению работоспособности и выполнения заданной технологии работы технической системы. При этом мало уделяется внимания удобству эксплуатации, приспособленности к техническому обслуживанию и ремонту. В связи с чем системы длительное время простаивают. Величина простоев по техническим причинам велика и достигает в настоящее время 25-35%, а с учетом времени ремонтов – 40-60% рабочего времени [2-9].

Невысокая ремонтопригодность является одной из причин того, что поступающие в подразделения и участки системы требуют частых остановок для замены недолговечных элементов, смазки, регулировки устранения отказов. Нередко для замены быстроизнашиванию элемента необходимо почти полностью разбирать систему, нарушая взаимосвязи узлов и деталей. Следовательно, серьезные конструктивные недостатки системы вызывают большие затраты рабочего времени и материальных ресурсов при их использовании потребителями.

Ремонтопригодность системы – понятие широкое. Оно предусматривает их приспособленность к предупреждению, нахождению и устранению рабочим каких-либо неисправностей. С этой целью в конструкции машин необходимо вводить элементы постоянного диагностирования технического состояния всех систем, такие например, как указатели датчиков, температур масла и воды, давления и подобные устройства особенно важны для новых систем.

#### Показатели ремонтопригодности

Существует следующая зависимость для оценки приспособленности системы к техническому обслуживанию:

$$T' = \frac{T}{W} \quad (9)$$

где  $T'$  – показатель приспособленности системы к техническому обслуживанию;

$T$  – общая трудоемкость технического обслуживания;

$W$  – наработка за цикл обслуживания.

Наиболее распространенными показателями ремонтопригодности являются: среднее время восстановления коэффициента готовности и коэффициента технического использования. Они сравнительно легко определяются и наглядны.

Среднее время восстановления ( $T_B$ ) можно определить на основе статистических данных наблюдений:

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{Bi}; \quad (10)$$

где  $n$  – количество обнаруженных и устраненных наблюдений отказов;

$T_{Bi}$  – время, затраченное на отыскание и устранение  $i$ -го отказа.

Для получения достаточной достоверности значения рекомендуется провести несколько наблюдений, так как факторы организационно-технического характера вносят существенное рассеивание в результаты наблюдений. Количественно величину рассеивания определяемого показателя можно оценить его дисперсией и средним квадратичным отклонением.

Согласно ГОСТа коэффициент готовности ( $K_r$ ) определяет вероятность того, что система или его элементы будет работоспособны в произвольно выбранный момент в промежутках между плановыми техническими обслуживаниями [10]. Значение  $K_r$  при установившемся режиме работы определяют из следующего выражения:

$$K_z = \frac{T}{T+T_B}; \quad (11)$$

где  $T$  – наработка на отказ.

Нарработка на отказ устанавливает долю времени безотказной работы машины в суммарном времени исправной работы и устранения отказов. Этот показатель, являясь обобщенным показателем надежности, кроме того, оценивает ремонтопригодность – приспособленность машин к отысканию и устранению отказов.

Коэффициент технического использования ( $K_t$ ) является наиболее полным показателем ремонтопригодности. Количественно он определяется отношением суммарной наработки машины в единицах времени за рассма-

триваемый период эксплуатации к сумме этой наработки времени простоев на техническом обслуживании и ремонте (с учетом устранения отказов):

$$K_m = \frac{t_{c,um}}{t_{c,um} + t_{mo} + t_{p,m}}; \quad (12)$$

где  $t_{c,um}$  – суммарная наработка изделия за период наблюдения в часах;

$t_{to}$  – время простоев на технических обслуживаниях в часах;

$t_{рем}$  – время простоев на ремонте.

Величина коэффициента  $K_T$  зависит от показателей среднего времени восстановления  $T_B$  и коэффициента готовности  $K_T$ .

Методика управления надежностью технических систем путем улучшения ее ремонтпригодности

Анализ известных методик. При ремонте и замене недолговечных элементов машины неизбежны некоторые балластные работы: частичная разборка системы с нарушением взаиморасположения и регулировки снимаемых узлов; промывка детали, замена недолговечного элемента, сборка заново и восстановление нарушенной регулировки, смазка сопряжений различных деталей.

Как видим, из перечисленных операций только третья – непосредственная замена недолговечного элемента оправдана. Остальные представляют собой так называемый объем балластных работ, в значительной степени зависящий от компоновки узлов в машине и деталей в узлах, то есть их доступности. Элементы в машине имеют различную доступность. Замена одних – нетрудоемка, других – требует много дополнительных действий, непосредственно не связанных с заменой отказавшей детали или узла.

Следовательно, детали в узлах, а узлы в машине имеют различный уровень доступа в зависимости оттого, какой объем предварительных работ можно рассчитать по трем вариантам.

Первый вариант [11]:

$$F_p = \frac{\sum_j Q_j^{cp}}{\sum_j Q_j^{cp} + q_6^{cf}} \quad (13)$$

где  $Q_j^{cp}$  – среднее значение стоимости, соответствующее затратам труда, энергии и материалов, требующихся для введения в систему сменяемых конструктивных и возобновляемых неконструктивных элементов;

$q_6^{cf}$  – среднее значение стоимости, соответствующее объему балластных работ при техническом обслуживании, ремонте или замене недолговечных конструктивных элементов;

$F_p$  – коэффициент ремонтпригодности.

Второй вариант [12]: – по частному коэффициенту ремонтпригодности внешнего доступа:

$$K_{ed} = \frac{\overline{t_{np}} + \overline{t_{zc}}}{\overline{t_{sp}}} \quad (14)$$

где  $K_{ed}$  – коэффициент внешнего доступа;

$\overline{t_{np}}$  – среднее время, затрачиваемое на снятие деталей и узлов, закрывающих доступ к узлу с отказом (предварительная разборка), мин;

$\overline{t_{zc}}$  – среднее время, затрачиваемое на постановку деталей и узлов, закрывающих доступ к узлу с отказом (заключительная сборка), мин;

$\overline{t_{sp}}$  – среднее время устранения отказа, мин.

Преобразовав первую формулу путем деления числителя и знаменателя на величину  $Q_j^{cp}$ , получим третий вариант оценки системы по ремонтпригодности:

$$F_p' = \frac{1}{1 + \sum_j \overline{q_{j6}^{cf}}} \quad (15)$$

где  $\overline{q_{j6}^{cf}}$  – приведенная величина балластных работ.

Предлагаемая методика. Здесь учитывается технологическая последовательность разборочных работ при капитальном ремонте, использование утвержденных технических норм времени на разборно-сборочные работы.

Результаты наших ранних исследований [5,6] показывают, что технологический процесс разборки систем при разборке на элементы включает в себе 7 уровней доступности, а двигателя на детали – 4. На показатели ремонтпригодности существенное влияние

оказывает уровень доступности элементов системы. Причем показатель ремонтпригодности ухудшается с ростом уровня доступа. На основании этого далее предлагается взаимно увязать показатель надежности элементов системы с уровнем их доступности.

Для оценки совершенства конструкции системы при проектировании или доработ-

ке конструкции ее элементов следует взаимно увязать факторы, влияющие на ремонтпригодность системы. Здесь сделана попытка связать уровень их надежности с уровнем доступа, ресурсом и трудоемкости замены элементов системы, влияющих на ремонтпригодность (табл. 2).

**Таблица 2 – Взаимосвязь доступности, ресурсов и трудоемкости замены элементов системы**

Уровень доступности элементов системы, I- V	Технический ресурс элементов системы, тех-час	Трудоемкость замены элемента системы, чел-час
I	MP <sub>I</sub>	T <sub>I</sub>
II	MP <sub>II</sub>	T <sub>II</sub>
III	MP <sub>III</sub>	T <sub>III</sub>
IV	MP <sub>IV</sub>	I <sub>IV</sub>
V	MP <sub>V</sub>	T <sub>V</sub>

Методика предусматривает «разместить» элементы системы по уровням доступности (I-V) с учетом ресурсов (MP-моточас) и трудоемкости замены (T<sub>i</sub>). Как показали наши исследования, эту проблему можно решить с помощью теории графов.

Основоположником теории графов является математик Леонард Эйлер (1707-1783). Согласно свободной энциклопедии Википедии, теория графов – раздел дискретной математики, изучающий свойства графов. В общем смысле граф представляется как множество вершин (узлов), соединённых рёбрами. Теория графов находит применение, например, в геоинформационных системах (ГИС). Существующие или вновь проектируемые дома, сооружения, кварталы и т.п. рассматриваются как вершины, а соединяющие их дороги, инженерные сети, линии электропередачи и т.п. – как рёбра. Применение различных вычислений, производимых на таком графе, позволяет, например, найти кратчайший объездной путь или ближайший продуктовый магазин, спланировать оптимальный маршрут.

Согласно данной методике, наиболее

совершенным будет считаться такое расположение узлов в машине и деталей в узлах, при котором замена быстроизнашивающегося элемента не повлечет за собой разборку и сборку других с высокой надежностью или во всяком случае, большей, чем у рассматриваемого узла или детали.

Для количественной оценки совершенства компоновки отдельного элемента предлагается показатель  $\varepsilon$ , названный фактором совершенства:

$$\varepsilon_i = \frac{Ax_i - y_i}{\cos\varphi \cdot \sqrt{A^2 + 1}}, \quad (16)$$

для всей системы:  $\varepsilon = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$ ,

где n – количество узлов.

Анализируя приведенную методику, можно видеть, что при  $\varepsilon_i < 0$  надежность этого элемента недостаточна, а  $\varepsilon_i > 0$ , тогда надежность академически неоправдана. Наиболее совершенной будет машина с  $\varepsilon_i = 0$ .

Используя эту методику, можно количественно определить, насколько надо повысить надежность конструкции. Данная методика оценки совершенства конструкции

позволяет выявить элементы (детали, узлы) систем, требующие первоочередного повышения их уровня надежности. Здесь можно видеть, что по причине недостаточной долговечности каких-либо именно деталей узлов растут балластные работы, а следовательно, эксплуатационные расходы. Кроме того, этот принцип с определенной точностью позволяет прогнозировать надежность элементов скомпонованной машины на стадии ее проектирования.

### Выводы

1. Выявлены и проанализированы факторы, наряду с ремонтпригодностью, на надежность технической системы. В процессе использования технической системы потребитель несет большие убытки из-за отказов. Это прежде всего прямые затраты на устранение самого отказа и убытки от простоя отказавшей техники. Надежность системы в общем случае определяется долговечностью, безотказностью, ремонтпригодностью и сохранностью.

2. Исследовано влияние ремонтпригодности на надежность технической системы. Невысокая ремонтпригодность является одной из причин того, что поступающие в под-

разделения, требуют частых остановок для замены недолговечных элементов, регулировки устранения отказов. Нередко для замены быстроизнашивающегося элемента необходимо почти полностью разбирать систему, нарушая взаимосвязи узлов и деталей. Следовательно, серьезные конструктивные недостатки машин вызывают большие затраты рабочего времени и материальных ресурсов при их использовании потребителями.

3. Разработана методика моделирования управления надежностью технических систем путем улучшения ее ремонтпригодности. Проанализированы существующие методы оценки ремонтпригодности технической системы и предложена усовершенствованная методика управления надежностью технических систем путем улучшения ее ремонтпригодности. Получен и введен показатель  $\varepsilon_r$ , названный фактором совершенства.

4. Поднимается вопрос проектной геометрии технической системы.

5. Технические системы будущего должны быть максимально приспособленными к условиям эксплуатации с минимальными издержками, оптимальной долговечностью, и ремонтпригодностью малошумными и безотказными.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wu-Lin Chen. System reliability analysis of retrieval machine repair systems with warm standbys and a single server of working breakdown and recovery policy. *System Engineering*. 2018;21:59–69. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/sys.21420>
2. Nikhil Dev, Samsher, S.S. Kachhwaha, Rajesh Attri. Development of reliability index for combined cycle power plant using graph theoretic approach. *Ain Shams Engineering Journal* (2014) 5, 193–203. [https://ac.els-cdn.com/S2090447913000968/1-s2.0-S2090447913000968-main.pdf?\\_tid=6aea2ee8-c9c3-4ae2-abd0-d550f637facd&acdnat=1538288547\\_37cf7ab6141ea3bec9453cfdd186ada2](https://ac.els-cdn.com/S2090447913000968/1-s2.0-S2090447913000968-main.pdf?_tid=6aea2ee8-c9c3-4ae2-abd0-d550f637facd&acdnat=1538288547_37cf7ab6141ea3bec9453cfdd186ada2)
3. Lei Liu, Xintian Liu, Xiaolan Wang, Yansong Wang, Chuanchang Li. Reliability analysis and evaluation of a brake system based on competing risk. *Journal of Engineering Research*. Vol. 5 No. (3) September 2017 pp. 150-161 <http://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/1958>
4. Chen, T., Zheng, S.L., Luo, H.W., Liu, X.T. & Feng, J.Z. Reliability analysis of multiple causes of failure in presence of independent competing risks. *Quality and Reliability Engineering International* 32(2) 2016, pp. 363-372. <https://dissem.in/p/75697220/reliability-analysis-of-multiple-causes-of-failure-in-presence-of-independent-competing-risks-reliability-analysis-in-presence-of-independent-competing-risks>

5. Kubaev K.E., Butabaev M.Kh. Prediction of the reliability of structural elements of reclamation machines, taking into account their ability to rotate. Bulletin of agricultural science of Kazakhstan, 1975, №11, pp.10-17 c.(in Russ.)
6. Kubaev K.E. Features of the operation of machines in water construction. - Almaty, Kaynar, 1977, 144 p. (in Russ.)
7. Maintainability machines. // Ed. prof. N.P. Volkova.- M.: Mechanical Engineering, 1975.- 368 p. (in Russ.)
8. Reliability of machines and mechanisms [Electronic resource] / V.A. Cherkasov, B.A. Kaitukov, P.D. Kapyrin, V.I. Skel, M.A. Stepanov - M.: MISSU Publishing House - MGSU, 2017-273 p. (in Russ.) <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785726416519.html>
9. Solomkin A. P. Assessment of the machine's adaptability to maintenance. Works of GOSNITI, t.25, 1971. (in Russ.)
10. GOST 13377-75. Reliability in engineering. Terms and Definitions <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293833/4293833240.htm>(in Russ.)
11. Selivanov A.I. Fundamentals of the theory of aging machines. - M.: Mashinostroenie, 1971.-408 c. <https://lib-bkm.ru/13158>
12. Ivashchenko N.I., Tyutin V.A. Criteria for assessing the maintainability of automobiles. Automotive Industry, 1971, No. 8.– pp. 23-26(in Russ.)