

# МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА ЗЕРНО- И КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ С ОБОСНОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ ИХ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ

## METHOD FOR PREDICTING THE TECHNICAL APPEARANCE OF GRAIN AND FORAGE HARVESTERS OF NEW GENERATIONS WITH A SUBSTANTIATION OF THE STRUCTURE OF THEIR VIBRATION PROTECTION SYSTEM

**П.В. СИРОТИН**, к.т.н.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия, spv\_61@mail.ru

**P.V. SIROTIN**, PhD in Engineering

Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia, spv\_61@mail.ru

Работа посвящена разработке метода прогнозирования технического прогресса самоходных зерно- и кормоуборочных комбайнов и обоснованию систем для их реализации. Обоснована необходимость совершенствования существующих и разработки новых методов прогнозирования свойств машин с учетом сложившихся особенностей функционирования предприятий агропромышленного комплекса. Предложена новая методика синтеза технического облика изделий с возможностью выделения номенклатуры определяющих параметров на основе фактического изменения их значений, ранжирования показателей с выделением наиболее важных из них для каждой категории хозяйствующих субъектов, прогнозирования методами нечеткой логики, а также обоснования требуемых систем машин новых поколений с помощью методов объектно-ориентированного проектирования. Приведено описание каждого из этапов процесса прогнозирования. На основе серийно производимых в России зерно- и кормоуборочных комбайнов проведен анализ их конструктивной эволюции с выделением устойчивых и наследуемых критериев развития. Показан сравнительный анализ фактического изменения определяющих параметров для машин текущего и предыдущего поколений. Приведены методика и результаты прогнозирования выделенных определяющих параметров. Показано, что прогнозируемый уровень свойств формирует разнонаправленные требования, которые с точки зрения реализации на основе существующих подходов конструирования противоречивы, а с учетом имеющихся проблем динамики движения и вибрационной нагруженности рабочего места операторов машин текущего поколения – недостижимы. С помощью методов объектно-ориентированного анализа составлена объектно-целевая диаграмма классов возможных вариантов построения виброзащитной системы машин нового поколения. Определены отношения наследования, установившие иерархическую декомпозицию целей. На основе проведенного анализа показано, что управление выделенными вибрационными процессами комбайнов без существенных изменений их конструкции и компоновки целесообразнее вести посредством систем динамической стабилизации корпуса и виброизоляции рабочего места оператора.

**Ключевые слова:** комбайн, эволюция, прогнозирование, определяющий параметр, метод Мамдами, метод Сати, алгоритм, объектно-целевой анализ, виброзащитная система.

**Для цитирования:** Сиротин П.В. Метод прогнозирования технического облика зерно- и кормоуборочных комбайнов новых поколений с обоснованием структуры их виброзащитной системы // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 6. С. 15–28. DOI: 10.17816/0321-4443-2021-6-15-28

The work is devoted to the development of a method for predicting the technical progress of self-propelled grain and forage harvesters and the substantiation of systems for their implementation. The necessity of improving the existing and developing new methods for predicting the properties of machinery, taking into account the existing features of the agro-industrial enterprises operation, were substantiated. A new technique for the synthesis of the technical appearance of products is proposed with the possibility of identifying the nomenclature of defining parameters based on the actual change in their values, ranking indicators with highlighting the most important of them for each category of business entities, forecasting using fuzzy logic methods, as well as justification of required machine systems of new generations using object-oriented design methods. A description of each of the stages of the forecasting process is given. On the basis of mass-produced grain and forage harvesters in Russia, an analysis of their constructive evolution with the allocation of stable and inherited development criteria has been carried out. A comparative analysis of the actual change in the defining parameters for machinery of the current and previous generations is shown. The technique and the results of forecasting the selected defining parameters are presented. It is shown that the

predicted level of properties forms multidirectional requirements, which, from the point of view of implementation on the basis of existing design approaches, are contradictory. Taking into account the existing problems of motion dynamics and vibration loading of the workplace of operators of machinery of the current generation, it is stated that those multidirectional requirements are unattainable. Using the methods of object-oriented analysis, an object-target diagram of classes of possible options for constructing a vibration protection system for machinery of a new generation has been compiled. The relations of inheritance, which established the hierarchical decomposition of goals, were determined. It is shown that it is more expedient to control the selected vibration processes of combines without significant changes in their design and layout by means of systems for dynamic stabilization of the body and vibration isolation of the operator's workplace.

**Keywords:** harvester, evolution, forecasting, determining parameter, Mamdani method, Saati method, algorithm, object-target analysis, vibration protection system.

**Cite as:** Sirotin P.V. Method for predicting the technical appearance of grain and forage harvesters of new generations with a substantiation of the structure of their vibration protection system. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 6, pp. 15–28 (in Russ.). DOI: 10.17816/0321-4443-2021-6-15-28

## Введение

В настоящее время зерноуборочные (ЗУК) и кормоуборочные комбайны (КУК), являясь наиболее энергоемкими машинами растениеводства, во многом определяют возможность ведения эффективного и экологически чистого агрохозяйства, а также обеспечивают технический аспект преобразования агропромышленного комплекса (АПК) в передовой сектор промышленности. Действующие в России стратегические документы [1] предполагают развитие и укрепление отрасли сельхозмашиностроения с целью обеспечения производственными средствами механизации АПК страны и реализации продукции на мировом рынке. В последнее время создание новых образцов техники российскими предприятиями предполагало использование наработок мировых лидеров в соответствующей отрасли, что в большей степени обусловлено несопоставимыми объемами финансирования новых разработок. Такой подход не только затрудняет создание российскими предприятиями изделий с конкурентоспособным уровнем свойств на глобальном рынке, но и предполагает создание образцов техники и оборудования, технический облик которых не всегда соответствует требованиям отечественных субъектов АПК. В связи с чем возникает задача разработки методологической основы формирования технического облика изделий для соответствующих рынков сбыта.

Как показывают сравнительные испытания [2–4], при сопоставимых энергосиловых параметрах отечественные машины существенно уступают импортным аналогам в части экологической безопасности и условий труда, что связано с особенностями действующих динамических нагрузок при эксплуатации.

Вместе с тем, многими государствами через нормативно-правовую систему вводятся ограничения по параметрам экологической безопасности, которые выступают барьером к рынкам сбыта российской продукции сельхозмашиностроения.

Таким образом, в настоящее время особую актуальность приобретают разработки, направленные на формирование методологической основы прогнозирования свойств машин и оборудования, а также обоснования систем для их реализации.

## Цель исследований

Разработка метода прогнозирования технического облика машин и оборудования новых поколений и обоснование структуры базового инварианта системы снижения динамической нагруженности конструкции и рабочего места операторов самоходных ЗУК и КУК.

## Материалы и методы

Разработанная методика предусматривает последовательное выполнение следующих этапов: выделение критериев развития, описание и анализ конструктивной эволюции ЗУК и КУК на основе положений работы [5]; определение номенклатуры определяющих параметров и их ранжирование методом Саати [6]; прогнозирование уровней определяющих параметров для ЗУК и КУК новых поколений на основе методов нечеткой логики [7–9]; определение базового инварианта структуры ЗУК и КУК на основе унифицированного языка моделирования (Unified Modeling Language, UML) [10] и концептуального проектирования [11].

Первый этап заключается в проведении описания и анализа конструктивной эволюции

ЗУК и КУК в выявлении устойчивых (постоянно действующих) критериев развития, определении закономерностей строения и развития технических объектов, установлении закономерности периодичности смены поколений, а также формировании правил или приемов получения улучшенных технических решений путем преобразования прототипа. Методика выполнения такого анализа подробно изложена в работе [5].

Второй этап посвящен ранжированию выделенных показателей развития по степени важности [12]. Поскольку оценивать какое-либо свойство лишь на качественном уровне достаточно сложно, то целесообразно применять попарное сравнение рассматриваемых параметров с помощью экспертов с последующей обработкой данных в соответствии с методикой, приведенной в работе [13]. В работе использован метод парных сравнений, разработанный профессором Саати [6].

Третий этап посвящен прогнозированию определяющих параметров новых поколений ЗУК и КУК на перспективу или период существования комбайнов нового поколения. В соответствии с работой [12] для прогнозирования роста конкретного определяющего параметра на основе его фактического изменения строится функция принадлежности «Интенсивность роста параметра», а на основе опроса экспертов – функция принадлежности «Степень соответствия достигнутого уровня идеальному значению». Затем на основе полученных функций принадлежности процесс нечеткого логического вывода реализован на базе алгоритма Мамдами [7], с последующей фаззификацией входных лингвистических переменных. На основании заданных нечетких правил, приведенных в работах [9, 12], для прогнозирования значения определяющего параметра, используя операции импликации и агрегирования, определены значения выходных лингвистических переменных.

Четвертый этап заключается в проведении целевого анализа, обеспечивающего возможность формирования структуры исходя из обозначенной цели существования и функционального назначения проектируемого объекта. На данном этапе принцип функционально-ориентированного анализа реализуется через методы UML, который предполагает последовательную декомпозицию цели и описание технических объектов с помощью трех типов

моделирующих блоков: сущность, отношение и диаграммы [10].

## Результаты и обсуждение

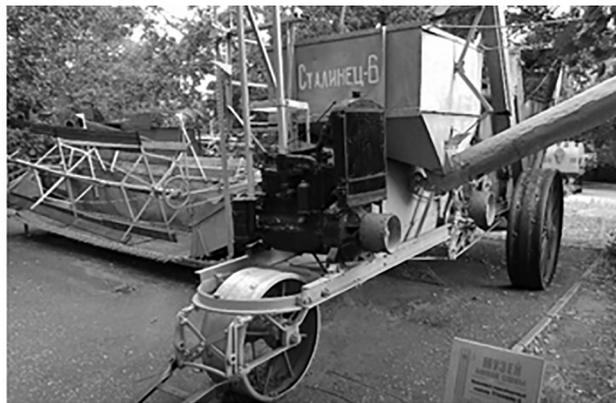
В соответствии с методикой [5] проведен анализ эволюционного развития ЗУК (рис. 1) и КУК (рис. 2) с момента их начала производства в России и до настоящего времени. С учетом закономерности циклического изменения производства техники построено распределение выпускаемой техники и установлено, что примерно каждые 28–30 лет происходит смена поколений машин. На основе закономерности приобретения новых функциональных свойств [5] выделено три поколения каждого из анализируемых типов машин. Машины первого поколения характеризуются возможностью реализации только технологической и энергетической функции (рис. 1, а, б и рис. 2, а, б): при этом они являются прицепными и не имеют конструктивно выделенных рабочих мест. В следующем (втором) поколении ЗУК и КУК развита технологическая функция как основной устойчивый параметр развития, а также приобретены две дополнительные функции: мобильности и комфортности рабочего места оператора (рис. 1, б, в и рис. 2, б, в). В полном соответствии с [5] в конструкции машин третьего поколения выделенные функции получили дальнейшее развитие, а отличия от машин второго поколения заключаются в расширении функции экологической безопасности и применении новых систем автоматизации технологического процесса, которые в целом закономерно отражают приобретение машинами функции автоматизации [5].

Таким образом, выделено три поколения ЗУК: первое представлено прицепными установками типа «Колхоз» и «Сталинец», производимыми с 1930 г.; второе – самоходными комбайнами (СК) типа СК 3 и СК 5, производимыми с 1958 г.; третье – машинами типа «ДОН 1500» и др., производимыми с 1986 г. В настоящее время в России производятся ЗУК третьего и седьмого классов, которые в контексте данной работы принято обозначать как ЗУК базовой производительности (ЗУКбп) и ЗУК повышенной производительности (ЗУКпп).

Аналогично проведено деление и для КУК: так, первое поколение представлено прицепными установками типа СК 2,6 и КСГ 2,6, производимыми с 1954 г. (рис. 2, а, б); второе – самоходными машинами типа КСГ 3,2 и КСК 100,



а



б



в



г



д



е

**Рис. 1. Произведенные в России ЗУК:**

а – «Колхоз»; б – «Сталинец 6»; в – СК 3; г – СК 5; д – «ДОН 1500»; е – РСМ 161

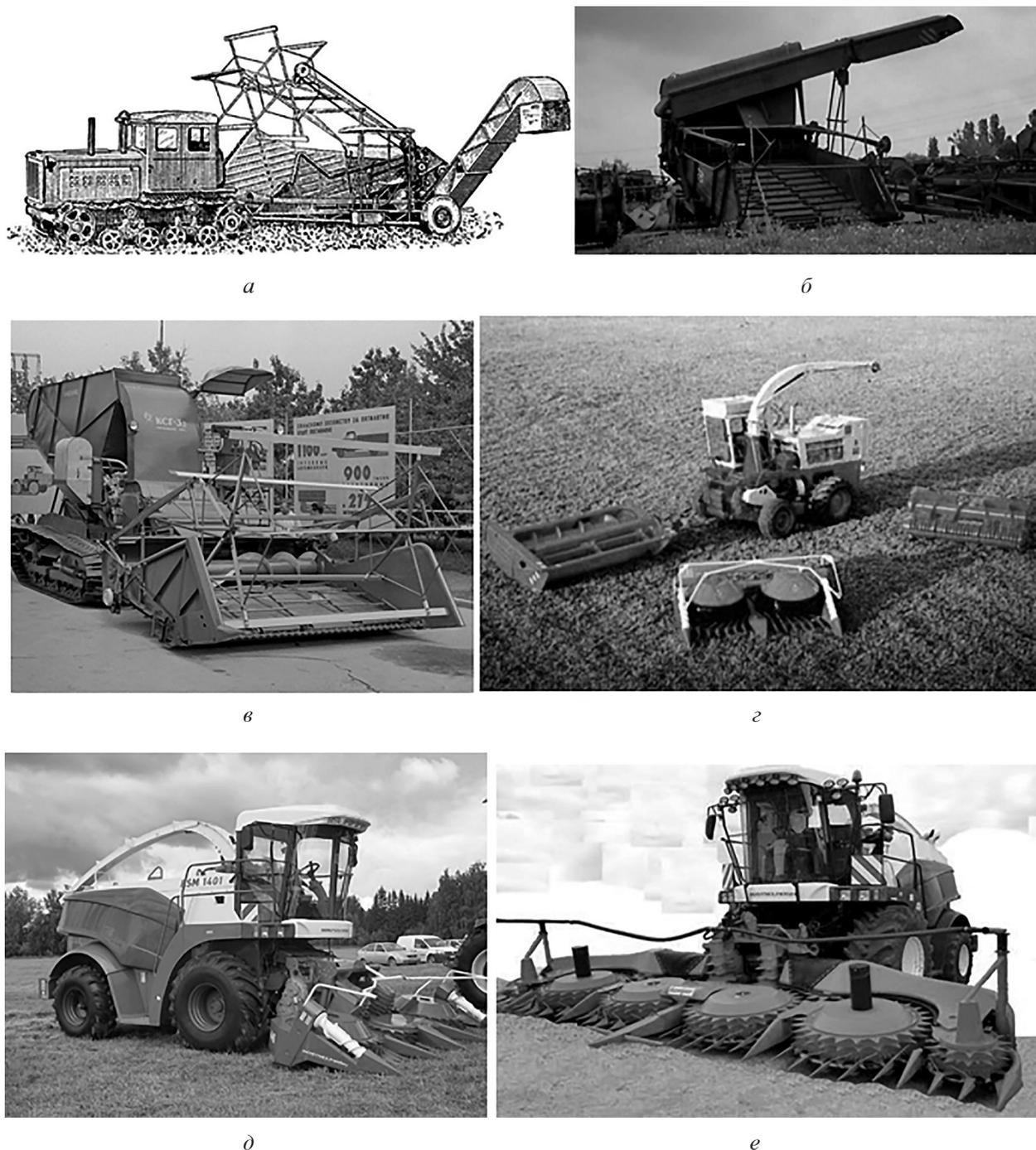
*Fig. 1. Grain harvesters (ZUK) made in Russia:*

*a – Kolkhoz; b – Stalinets 6; c – SK 3; d – SK 5; e – DON 1500; f – RSM 161*

производимыми с 1973 г. (рис. 2, в, г); третье – самоходными машинами типа РСМ 1401 (рис. 2, д, е), производство которых осуществляется с 2010 г. до нашего времени.

Ввиду меньшей распространенности и применения КУК достаточно узким сегментом потребителей такие машины имели меньшую сегрегацию параметров и количество модификаций. Анализ модельных рядов различных производителей КУК позволил установить, что к концу XX века большинство произво-

дителей стали выпускать КУК с четким разделением по производительности. В настоящее время в России производят КУК «ДОН 680» и RSM 2650, которые по определенным выше критериям можно отнести, соответственно, к КУК базовой производительности (КУКбп) и КУК повышенной производительности (КУКпп). Аналогичное деление можно выявить в моделях комбайнового завода «Гомсельмаш» (Беларусь), а также других производителей этих самоходных комбайнов.



**Рис. 2. Произведенные в России КУК:**  
 а – СК 2,6; б – КСГ 2,6; в – КСГ 3,2; г – КСК 100; д – РСМ 1401; е – РСМ 2650  
 Fig. 2. Forage harvesters (KUK) made in Russia:  
 а – SK 2,6; б – KSG 2,6; в – KSG 3,2; д – KSG 100; е – RSM 1401, ф – RSM 2650

Таким образом, проведенный анализ позволил для каждого поколения машин выделить наследуемые и развиваемые функции, а также определить устойчивые критерии развития, заключающиеся в непрерывном повышении производительности, улучшении транспортных свойств, а также комфортности рабочего места оператора и экологической безопасности. В со-

ответствии с выделенными критериями развития и развиваемыми функциями для проведения процедуры прогнозирования выделен набор определяющих параметров ЗУК и КУК: производительность, качественные показатели, топливная экономичность, транспортная скорость, маневренность, габаритные размеры, масса и комфортность на рабочем месте.

С целью проведения прогнозирования на основе официальных изданий и публикуемых результатов сравнительных испытаний [14–21] проведена оценка фактического изменения выделенных определяющих параметров от предыдущего к текущему поколению машин (табл. 1 и 2). Для учета фактического изменения комфортности на рабочем месте использован метод экспертных оценок путем ранжирования по 10-балльной шкале. Как видно из табл. 1 и 2, при смене поколений ЗУК и КУК наибольшее развитие получили такие определяющие параметры, как «производительность» и «масса», которые имеют корреляцию между собой из-за сформировавшихся способов модульного проектирования машин. Определяющий параметр «качество технологического процесса» изменился несущественно, поскольку его предельный уровень регламентирован

стандартами. По параметру «Расход топлива» ЗУК имели некоторое снижение из-за внедрения автоматизации отдельных технологических подсистем. Все анализируемые параметры, определяющие транспортные свойства, улучшались. Во всех случаях отмечено увеличение длины машин, уменьшение ширины и высоты, что обусловлено требованиями и условиями передвижения и транспортировки по дорогам общего пользования. Комфортность рабочего места по 10-балльной шкале улучшилась на 2–3 балла.

Динамика основных определяющих параметров КУК изменялась аналогично ЗУК, однако отмечено, что определяющий параметр «расход топлива в рабочем режиме» у машин текущего поколения выше, чем у предыдущего, что обусловлено увеличением массы и, соответственно, повышением энергозатрат

Таблица 1

**Динамика изменения определяющих параметров ЗУК [14–18]**

*Table 1. Dynamics of changes in defining parameters of grain harvesters [14–18]*

№	Наименование определяющего параметра	ЗУКбп		ЗУКпп		
		СК 5	S 300	«ДОН 1500»	RSM 161	Torum 760
1	Производительность, т/ч	7,2	13,22	14	20,23	23,3
2	Качество тех. процесса, %	1,33	1,06	2	1,69	1,79
3	Расход топлива, л/ч (кг/т)	25	22	(3,1)	(2,81)	(2,6)
4	Транспортная скорость, км/ч	18,7	20 (25)*	20	20	20 (25)*
5	Маневренность, м	7,5 м	7,25 м	8,9 м	8,5	8,5
6	Габаритные размеры Д/Ш/В, м	7607/ 3930/ 4020	7910/ 3530/ 3880	7540/ 4400/ 3980	9520/ 3980/ 3860	9780/ 3945/ 3870
7	Масса, кг	7400	11800	13283	18200	20587
8	Комфортность	3	5	4	7	7

\* – заявленный уровень для ЗУК «Клаас Тукано 320» (ClaasTucano 320) и «Енисей 5000».

Таблица 2

**Динамика изменения определяющих параметров КУК [19–21]**

*Table 2. Dynamics of changes in defining parameters of forage harvesters [19–21]*

№	Наименование определяющего параметра	КУКбп		КУКпп
		«ДОН 680»	PCM 1401	RSM 2650
1	Производительность, т/ч	52	75,5	93,46
2	Качество тех. процесса, %	1,0	0,8	0,56
3	Расход топлива, кг/т	0,44	0,59–0,84	0,66
4	Транспортная скорость, км/ч	20	20	25 (40)*
5	Маневренность	6,7	6,2	6,5
6	Габаритные размеры Д/Ш/В	6192/3880/3940	6170/3250/3800	6825/3375/3905
7	Масса с адаптером, кг	11686	12570	20500
8	Комфортность на рабочем месте	3	5	6

\* – заявленный уровень для ЗУК «Клаас Ягуар» (Claas Jaguar).

на самопередвижение, а также увеличением энергозатрат на получивший распространение гидравлический привод технологического оборудования. Среди транспортных свойств КУК наибольшее увеличение отмечено по параметру «транспортная скорость», который в современных моделях машин достигает 40 км/ч.

На следующем этапе проведен опрос экспертов, представляющих органы государственной власти, академического сообщества, а также представителей основных хозяйствующих субъектов АПК: индивидуальных предпринимателей и руководителей КФХ, колхозов, а также крупнейших агрохолдингов России. На основе метода парных сравнений Саати показано, что для каждой формы субъекта АПК важность отдельных параметров отлична, а удовлетворение разнонаправленных требований целесообразно вести через создание ЗУК и КУК двух основных моделей – базовой и повышенной производительности (далее ЗУКбп, ЗУКпп, КУКбп, КУКпп), а за счет опционального наращивания доводить базовые инварианты до индивидуальных требований заказчика.

Прогнозирование проводили с помощью методов нечеткой логики в соответствии с методикой, приведенной в работах [9, 12]. Для расчета по выделенным в табл. 1 и 2 определяющим параметрам были построены функции принадлежности переменной  $X1$  «тенденция роста параметра» (рис. 3, а) с термами «низкий», «ниже среднего», «средний», «выше среднего» и «высокий» и  $X2$  «степень приближения образцов текущего поколения к идеальному значению» (рис. 3, б) с термами «худшие образцы», «образцы среднего уровня», «лучшие образцы», а процесс нечеткого логического вывода и построения функции принадлежности  $Y$  «прогноз роста» (рис. 3, в) был реализован на базе алгоритма Мамдами в соответствии с методикой, приведенной в работах [9, 12]. Расчет проведен в соответствии с методикой, приведенной в работе [12]. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Проведение процедуры дефаззификации прогноза реализовано по обобщенной функции принадлежности выходной переменной  $Y$  (рис. 3, в) и выполнено по методу центраида [7], что позво-

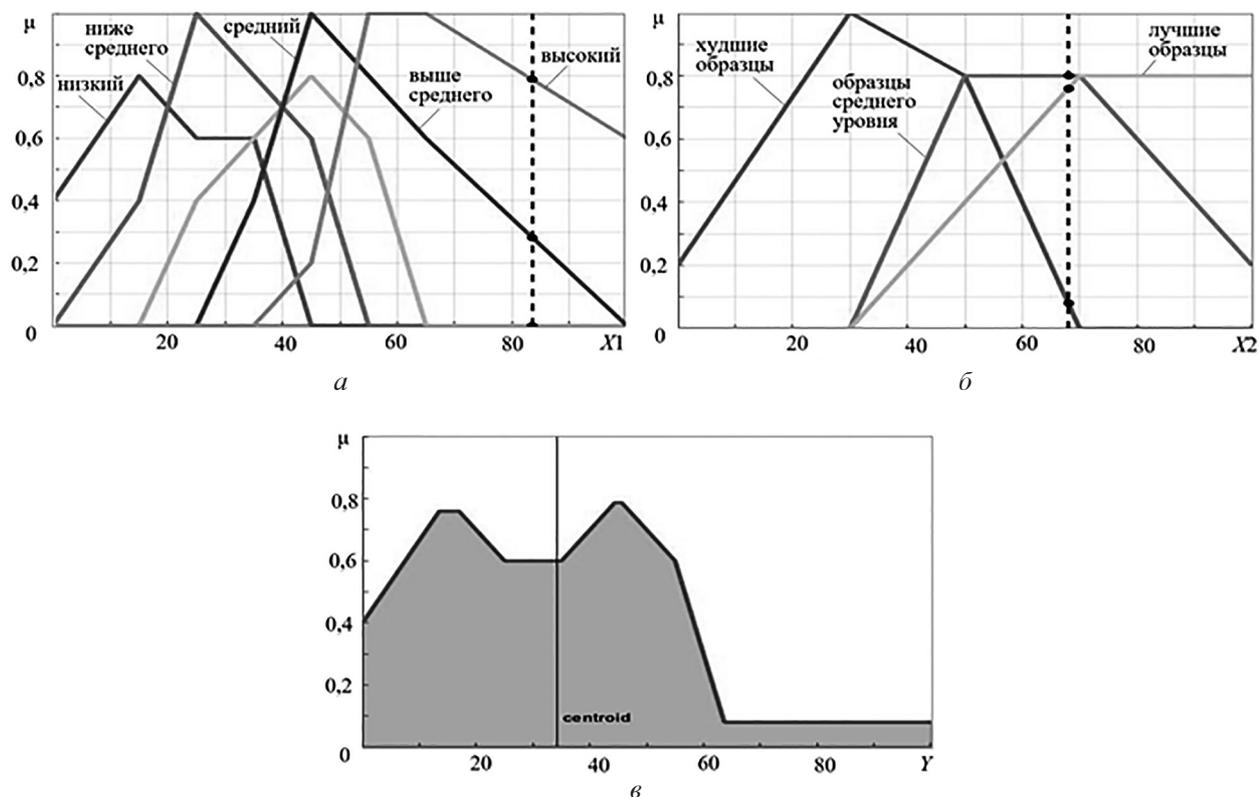


Рис. 3. Функции принадлежности входных переменных  $X1$  (а),  $X2$  (б) и выходной определяющего параметра «производительность» ЗУКбп переменной  $Y$  (в)

Fig. 3. Membership functions of the input variable  $X1$  (a),  $X2$  (b) and the output defining Performance parameter of grain harvester variable  $Y$  (c)

лило определить относительный рост определяющего параметра относительно фактического уровня машины текущего поколения (рис. 4). Аналогично были проведены расчеты по другим определяющим параметрам остальных анализируемых в данной работе типов машин. На рис. 4 показано сопоставление относительных уровней определяющих параметров для машин предыдущего поколения (рис. 1, в, г и рис. 2, в, г), текущего поколения (рис. 1, д, е и рис. 3, д, е), а также нового поколения. Как видно из рис. 4, машины нового поколения в зависимости от модификаций должны получить: увеличение производительности на 25–60,8 %; улучшение качества обработки технологической массы на 20,6–29,6 %, улучшение топливной экономичности на 17,5–29,2 %; повышение транспортной скорости на 25,5–41,4 %; улучшение маневренности на 6,44–8,08 %; уменьшение габаритных размеров на 15–25 %;

увеличение массы не более чем на 2–10 % и повышение комфортности на 32,4–42,1 % (рис. 4). Для автоматизации расчетов по предложенной методике с помощью программного комплекса MATLAB-Simulink разработаны соответствующий алгоритм и симуляционная модель [22].

Спрогнозированный уровень свойств формирует разнонаправленные изменения, которые с точки зрения реализации на основе существующих подходов конструирования противоречивы, а с учетом выявленных проблем [2–4] динамики движения и вибрационной нагруженности рабочего места машин текущего поколения недостижимы без применения соответствующих виброзащитных подсистем. Для реализации поставленной цели на основе методов UML анализа составлена объектно-целевая диаграмма классов возможных вариантов построения виброзащитной системы ЗУК и КУК новых поколений (рис. 5).

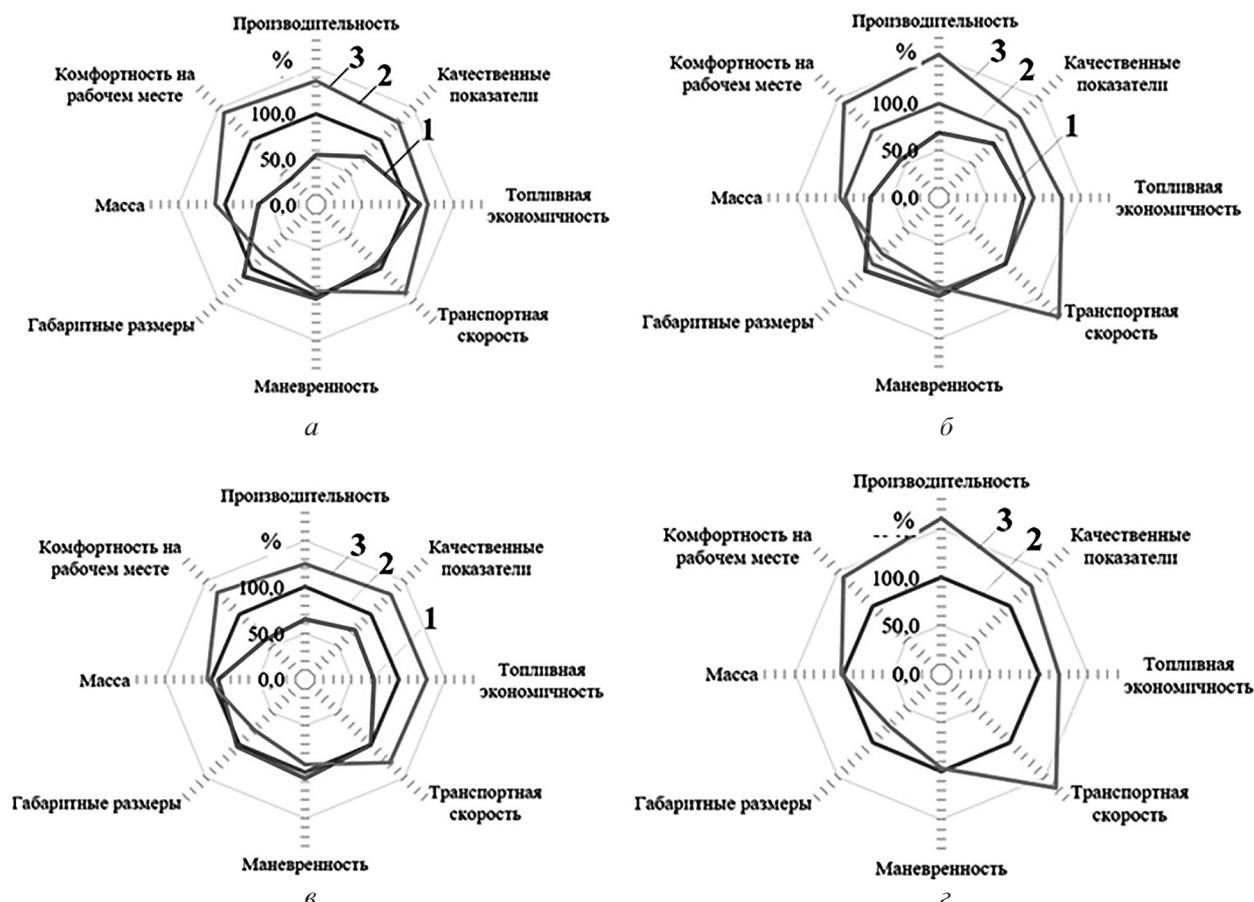


Рис. 4. Уровни определяющих параметров ЗУКbp (а), ЗУКpp (б), КУКbp (в), КУКpp (г):  
1 – соотношение предыдущего поколения к текущему; 2 – текущего поколения;  
3 – соотношение нового поколения к текущему

Fig. 4. Levels of defining parameters ZUKbp (a), ZUKpp (b), KUKbp (c), KUKpp (d):  
1 – ratio of the previous generation to the current one; 2 – current generation;  
3 – ratio of the new generation to the current one

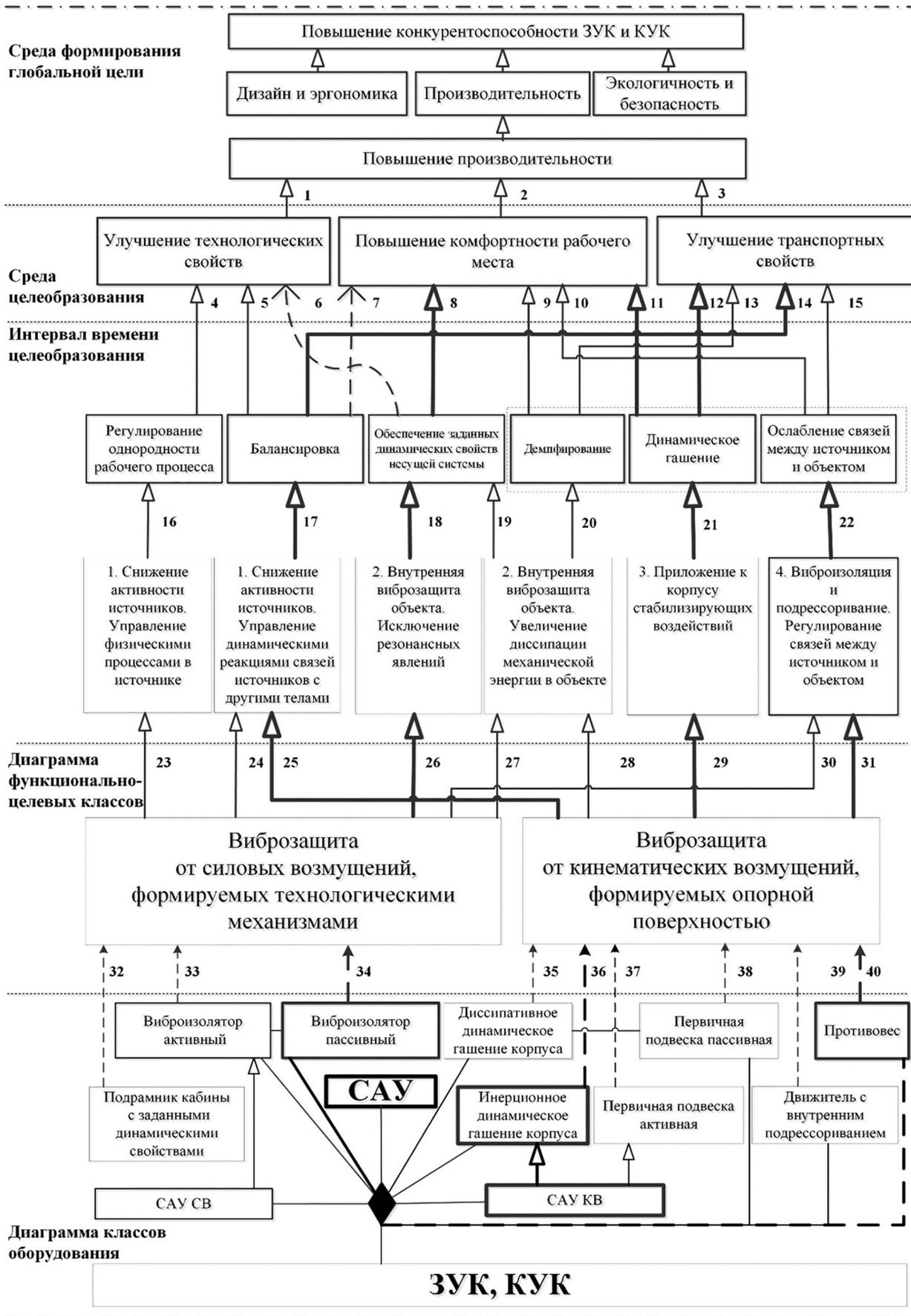


Рис. 5. Объектно-целевая диаграмма классов ЗУК и КУК на основе UML-анализа

Fig. 5. Object-target diagram of grain harvesters and forage harvesters classes based on UML analysis

На основе объектно-целевой диаграммы составлены отношения наследования, установившие иерархическую декомпозицию целей. В соответствии с методикой [11, 23], среда формирования глобальной цели, определяется декомпозированными элементами интегрального показателя «повышение конкурентоспособности ЗУК и КУК» и сводится к «повышению производительности исследуемого класса машин». Среда целеобразования как признак пространства инициирования целей позволяет дифференцировать цели в соответствии с формируемыми требованиями или накладываемыми ограничениями среды, взаимосвязанной с исследуемой системой [11, 23]. В рассматриваемом случае на уровне среды целеобразования выделены следующие направления: улучшение технологических свойств; повышение комфортности рабочего места; улучшение транспортных свойств. Выделенные свойства увязаны с глобальной целью связями 1–3 (рис. 5).

Следующий уровень иерархии в дереве целей определяется в соответствии с различными представлениями жизненного цикла (интервал времени целеобразования) и для рассматриваемого случая имеет два подуровня, верхний из которых включает подцели: регулирование однородности рабочего процесса, балансировки, обеспечение заданных динамических свойств несущей системы, демпфирование, динамическое гашение и ослабление связей между источником и объектом, которые со свойствами целеобразования имеют связи 4–15 (рис. 5). Как видно из диаграммы подцелей, балансировка, демпфирование, динамическое гашение и ослабление связей между источником и объектом имеют перекрещивающиеся связи с целями предыдущего более высокого уровня (рис. 5), что позволяет их выделить среди остальных.

Нижний уровень интервала времени целеобразования сформирован на основе фундаментальных принципов построения виброзащитных систем в технике, заложенных в работе [24]. На основе подцели верхнего уровня сигналы систем виброзащиты силовых и кинематических возмущений декомпозированы на снижение активности источников через управление физическими процессами в источнике и управление динамическими реакциями связей источников с упругими телами, внутреннюю виброзащиту объекта через исключение

резонансных явлений и увеличение диссипации механической энергии в объекте, приложение к корпусу стабилизирующих воздействий, а также виброизоляцию через регулирование связей между источником и объектом. Выделенные подцели верхнего и нижнего уровня имеют связи наследования 23–31 (рис. 5).

Используемый на следующем уровне признак ветвления в дереве целей связан с реализуемостью (состав и взаимосвязи элементов системы), обеспечивающей достижение подцелей предыдущего уровня. Поэтому в дальнейшем на указанных уровнях иерархии целесообразно оперировать не термином «подцель», а термином «функция», и считать, что «дерево целей» перерастает в «дерево функций» [10]. Такой подход позволяет сформировать диаграмму функционально-целевых классов виброзащиты машин от выявленных силовых и кинематических возмущений [2, 3] и имеющих с вышестоящими подцелями связи 23–31 (рис. 5).

Таким образом, в результате проведенного ветвления подцели четвертого уровня получили ярко выраженный функциональный аспект (т.е. по [25] переросли в «дерево функций»), что позволяет в соответствии с методикой [23] осуществить выбор оборудования, способного реализовать полученные функциональные требования. Это осуществляется посредством перехода от промежуточной диаграммы функционально-целевых классов к построению диаграммы классов оборудования.

С учетом выявленных особенностей вибрационного состояния исследуемого класса машин [2–4], имеющих наработок в области создания виброзащитных систем бесподвесочных колесных машин [26], а также перспективных разработок [25] и декларируемых мировыми лидерами тракторо- и комбайностроения разработок сформирован класс виброзащитного оборудования ЗУК и КУК новых поколений. Выделенные классы оборудования связаны с диаграммой функционально-целевых классов связями 32–40 (рис. 5). При этом некоторые требуют совместного применения с системой автоматического управления (САУ).

Как видно из диаграммы, система виброакустической защиты машины и оператора может предполагать управление динамическими свойствами подрамника кабины, использование эффективных виброизоляторов кабины, динамическое гашение корпуса подвижностью адаптера, первичным подрессори-

ванием, а также использованием двигателей с внутренним подрессориванием и противовесов корпуса. Отношения наследования между целевыми классами дополнены отношениями, связанными с зависимостью разных целевых функций от одного и того же технологического параметра, что позволило наложить ограничения на их решение и выявить параметрические противоречия в отношении целевой функции.

Представленный концептуальный анализ позволяет определить базовый инвариант виброзащитных систем комбайнов для конкретных режимов и условий эксплуатации, формы и особенностей хозяйствующих субъектов и др. факторов. Вместе с тем в последующих работах требуется определить потенциальную эффективность каждого из представленных виброзащитных элементов и устройств, а также их сочетаний, обосновать методы их проектирования и адаптации для конкретных условий эксплуатации.

С учетом закономерностей строения и развития технических ЗУК и КУК, а также сформированных правил и приемов улучшения технических решений в транспортном машиностроении и комбайностроении основными техническими виброзащитными средствами ЗУК и КУК новых поколений должны стать системы динамической стабилизации и виброизоляции кабины, поскольку их реализация не требует существенного изменения технического облика исследуемого класса машин.

## Выводы

1. Установлено, что конструктивная эволюция ЗУК и КУК подчинена закономерности стадийного развития с периодичностью смены поколений каждые 28–30 лет; при этом для каждого последующего поколения наследуются и улучшаются устойчивые критерии развития технологических и транспортных свойств, а также комфортности оператора. В настоящее время в комбайностроении происходит смена поколений в сторону машин высокого уровня автоматизации, для которых присутствие оператора является обязательным условием, а системы обеспечения обитаемости и комфорта – обязательными элементами конструкции, требования к которым будут ужесточаться.

2. Для ЗУК и КУК, в зависимости от модификаций, на перспективу 25–30 лет спрогнозировано: увеличение производительности

на 25–60,8 %; улучшение качества обработки технологической массы на 20,6–29,6 %, улучшение топливной экономичности на 17,5–29,2 %; повышение транспортной скорости на 25,5–41,4 %; улучшение маневренности на 6,44–8,08 %; уменьшение габаритных размеров на 15–25 %; увеличение массы не более чем на 2–10 % и повышение комфортности на 32,4–42,1 %. Спрогнозированный уровень свойств формирует разнонаправленные изменения, которые с точки зрения реализации на основе существующих подходов конструирования противоречивы, а с учетом выявленных проблем в части динамики движения и вибрационной нагруженности рабочего места недостижимы. Требуется изменение подходов к проектированию машин, либо внедрение в конструкцию дополнительных виброзащитных систем.

3. С помощью методов концептуального анализа UML получена модель в виде тернарной объектно-целевой диаграммы, устанавливающей зависимости целей с методами и конструктивными устройствами снижения динамической нагруженности машины и оператора от силовых и кинематических возмущений. Синтезирован базовый инвариант структуры систем снижения динамической нагруженности ЗУК и КУК, включающий ряд технических решений, основанных на фундаментальных принципах построения виброзащитных систем, эффективность и работоспособность каждой из которых следует оценить в последующих работах.

## Литература

1. Об утверждении Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 07.07.2017 № 1455-р.
2. Сиротин П.В., Лебединский И.Ю., Кравченко В.В. Анализ виброакустической нагруженности рабочего места операторов зерноуборочных комбайнов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. № 1 (53). С. 113–121.
3. Сиротин П.В., Сапегин А.Г., Зленко С.В. Экспериментальная оценка плавности хода самоходного кормоуборочного комбайна // Труды НАМИ. 2017. № 4 (271). С. 67–74.
4. Sirotin P.V., Sapegin A.G., Zlenko S.V. Experimental studies of ride quality of self-propelled combine harvester // XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems”

- (DTS-2018). September 12–14, 2018. Rostov-on-Don, Russian Federation: MATEC Web of Conferences Volume 226 (2018), 2018.
5. Половинкин А.И. Теории проектирования новой техники: закономерности техники и их применение. М.: Информэлектрон. 1991. 101 с.
  6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
  7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
  8. Коньшева Л.К. Основы теории нечетких множеств: учебное пособие. СПб.: Питер, 2011. 192 с.
  9. Жилейкин М.М., Калимулин М.Р., Мирошниченко А.В. Прогнозирование значений определяющих показателей при формировании технического облика особо легких высокоподвижных колесных транспортных средств // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10 (10). С. 24.
  10. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / пер. с англ. под ред. И. Романовского и Ф. Андреева. 2-е изд. М.: Вино; СПб.: Нев. диалект, 1998. 558 с.
  11. Максимов В.П., Ушаков А.Е. Концептуальное конструирование орудий для основной обработки склоновых земель // Вестник аграрной науки Дона. Зерноград. № 1 (49). 2020. С. 53–59.
  12. Калимулин М.Р. Метод формирования технического облика особо легких высокоподвижных колесных транспортных средств для горных условий эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Москва, 2013. 16 с.
  13. Плиев И.А. Автомобили многоцелевого назначения. Формирование технического облика АМН в составе семейств: монография. М.: МГИУ, 2011. 262 с.
  14. Шаткус Д.И. Справочник по комбайнам Нива и Колос. М., Колос, 1976. 208 с.
  15. Протокол испытаний № 14–41–2017 (2060022) комбайна зерноуборочного самоходного S300 «NOVA» в комплекте с адаптерами / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». 2017. 5 с.
  16. Комбайны зерноуборочные самоходные «Дон-1500Б» и «Дон-1200Б»: инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию / учебный центр АО «Ростсельмаш». 468 с.
  17. Протокол испытаний № 07–41–2017 (5060322) комбайна зерноуборочного РСМ-161 / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Кубанская государственная зональная машиноиспытательная станция». 5 с.
  18. Отчет № 11–23–14 (4060252) от 18 ноября 2014 г. по результатам базовых испытаний сельскохозяйственной машины комбайна зерноуборочного РСМ-181 «TORUM-760» / ФГБОУ Сев.-Кав. гос. зональная МИС. Зерноград. 2014. 24 с.
  19. Отчет о выполнении информационной услуги по результатам испытаний комбайна кормоуборочного самоходного РСМ-100 «ДОН-680М» в комплекте с адаптерами (на основании протокола № 11–15–16, шифр 1130082 от 14 ноября 2016 г.). Зерноград. 2016. 20 с.
  20. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». URL: <http://chmis.ru/ispytaniya/94-2018/261-kultivator-navesnoj-dlya-vysokostebelnykh-kulturnv-5-6-50> (дата обращения 12.12.2019).
  21. Комбайн кормоуборочный самоходный РСМ-1401: инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. Выпуск 5. Изд. Ростсельмаш, 2010. 65 с.
  22. Сиротин П.В., Дробязко Н.С., Жилейкин М.М. Программа прогнозирования уровней определяющих параметров технических объектов новых поколений (DSJ): свидетельство о гос. рег. программы ЭВМ № 2021613297; № 2021612389; заявл. 25.02.2021; опублик. 04.03.2021 г.
  23. Максимов В.П. Концептуальная методология построения технологий и агрегатов мелиоративной обработки солонцовых почв с улучшенными показателями качества технологических процессов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Азово-Черноморск. гос. агроинженер. акад. Зерноград, 2006. 45 с.
  24. Челомей В.М. Вибрация в технике // Справочник. В 6 т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. 1981, 456 с.
  25. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ: учебник для академического бакалавриата. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2014. 616 с.
  26. Корчагин П.В., Корчагина Е.А., Чакурин И.А. Снижение динамических воздействий на оператора автогрейдера в транспортном режиме: монография. Омск: СибАДИ, 2009. 195 с.

## References

1. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 07.07.2017 No 1455-r «Ob utverzhdenii Strategii razviti-

- ya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroyeniya Rossii na period do 2030 goda».
2. Sirotin P.V., Lebedinskiy I.Yu., Kravchenko V.V. Analysis of vibroacoustic loading of the workplace of operators of combine harvesters. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Regional'noye prilozheniye*. 2018. No 1 (53), pp. 113–121 (in Russ.).
  3. Sirotin P.V., Sapegin A.G., Zlenko S.V. Experimental evaluation of the smooth running of a self-propelled forage harvester. *Trudy NAMI*. 2017. No 4 (271), pp. 67–74 (in Russ.).
  4. Sirotin P.V., Sapegin A.G., Zlenko S.V. Experimental studies of ride quality of self-propelled combine harvester. XIV International Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2018). September 12-14, 2018. Rostov-on-Don, Russian Federation: MATEC Web of Conferences Volume 226 (2018), 2018.
  5. Polovinkin A.I. *Teorii proyektirovaniya novoy tekhniki: zakonomernosti tekhniki i ikh primeneniye* [Design theories of new technology: patterns of technology and their application]. Moscow: Inform-ekstro Publ. 1991. 101 p.
  6. Saati T. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy* [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 278 p.
  7. Shtovba S.D. *Proyektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Designing fuzzy systems using MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2007. 288 p.
  8. Konysheva L.K. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of fuzzy set theory]: Uchebnoye posobiye. SPb.: Piter Publ., 2011. 192 p.
  9. Zhileykin M.M., Kalimulin M.R., Miroshnichenk A.V. Prediction of the values of defining indicators in the formation of the technical appearance of especially light highly mobile wheeled vehicles. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman*. 2012. No 10 (10), pp. 24 (in Russ.).
  10. Buch G. *Ob'yektno-orientirovanny analiz i proyektirovaniye s primerami prilozheniy na C++* [Object oriented analysis and design with examples of C ++ applications]. Per. s angl. pod red. I. Romanovskogo i F. Andreyeva. 2. izd. Moscow: Binom; SPb.: Nev. Dialect Publ., 1998. 558 p.
  11. Maksimov V.P., Ushakov A.E. Conceptual design of tools for basic slope cultivation. *Vestnik agrarnoy nauki Dona. Zernograd*. 2020. No 1 (49), pp. 53–59 (in Russ.).
  12. Kalimulin M.R. *Metod formirovaniya tekhnicheskogo oblika osobo legkikh vysokopodvizhnykh kolesnykh transportnykh sredstv dlya gornykh usloviy ekspluatatsii: avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [The method of forming the technical appearance of especially light highly mobile wheeled vehicles for mountainous operating conditions: Abstract to Dissertation for degree of PhD in Engineering]: 05.05.03. Moscow, 2013. 16 p.
  13. Pliyev I.A. *Avtomobili mnogotselovogo naznacheniya. Formirovaniye tekhnicheskogo oblika AMN v sostave semeystv* [Multipurpose vehicles. Formation of the technical appearance of multipurpose vehicles]: Monografiya. Moscow: MGIU Publ., 2011. 262 p.
  14. Shatkus D.I. *Spravochnik po kombaynam Niva i Kolos* [Handbook on combines Niva and Kolos]. Moscow, «KoloS» Publ., 1976. 208 p.
  15. *Protokol ispytaniy No 14–41–2017 (2060022) kombayna zernouborochnogo samokhodnogo S300 «NOVA» v komplekte s adapterami* [Test report No. 14–41–2017 (2060022) self-propelled combine harvester S300 NOVA with adapters]. Federal'noye gosudarstvennoye byudzhethnoye uchrezhdeniye «Tsentral'no-Chernozemnaya gosudarstvennaya zonal'naya mashinoispytatel'naya stantsiya». 2017. 5 p.
  16. *Kombayny zernouborochnyye samokhodnyye «Don-1500B» i «Don-1200B». Instruktsiya po ekspluatatsii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu* [Self-propelled combine harvesters Don-1500B and Don-1200B. Operation and maintenance manual]. Uchebnyy tsentr AO «Rostsel'maSH» Publ. 468 p.
  17. *Protokol ispytaniy No 07–41–2017 (5060322) kombayna zernouborochnogo RSM-161* [Test report No. 07–41–2017 (5060322) of combine harvester RSM-161]. Federal'noye gosudarstvennoye byudzhethnoye uchrezhdeniye “Kubanskaya gosudarstvennaya zonal'naya mashinoispytatel'naya stantsiya”. 5 p.
  18. *Otchet No 11–23–14 (4060252) ot 18 noyabrya 2014 g po rezul'tatam bazovykh ispytaniy sel'skokhozyaystvennoy mashiny kombayna zernouborochnogo RSM-181 «TORUM-760»* [Report No 11–23–14 (4060252) dated November 18, 2014 on the results of basic tests of combine harvester RSM-181 TORUM-760]. FGBOU Sev.-Kav. gos. zonal'naya MIS. Zernograd. 2014. 24 p.
  19. *Otchet o vypolnenii informatsionnoy uslugi po rezul'tatam ispytaniy Kombayna kormouborochnogo samokhodnogo RSM-100 «DON-680M» v komplekte s adapterami (na osnovanii protokola No 11–15–16 shifr 1130082 ot 14 noyabrya 2016 goda)* [Report on the implementation of the in-

- formation service based on the test results of the self-propelled forage harvester RSM-100 DON-680M with adapters (based on protocol No. 11-15-16 code 1130082 dated November 14, 2016)]. Zernograd 2016. 20 p.
20. Federal'noye gosudarstvennoye byudzhethnoye uchrezhdeniye «Tsentral'no-Chernozemnaya gosudarstvennaya zonal'naya mashinoispyatel'naya stantsiya». [Elektronnyy resurs]. URL: <http://chmis.ru/ispytaniya/94-2018/261-kultivator-navesnoj-dlya-vysokostebelnykh-kultur-krnv-5-6-50> (accessed: 12.12.2019).
  21. Kombayn kormouborochnyy samokhodnyy RSM-1401. Instruktsiya po ekspluatatsii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu [Self-propelled forage harvester RSM-1401. Operation and maintenance manual]. Vypusk 5. Izd. Rostsel'mash Publ., 2010. 65 p.
  22. Svidetel'stvo o gos. reg. programmy EVM No 2021613297. Programma prognozirovaniya urovney opredelyayushchikh parametrov tekhnicheskikh ob"yektov novykh pokoleniy (DSJ) [The program for predicting the levels of defining parameters of technical objects of new generations (DSJ)] / Sirotn P.V., Drobyazko N.S., Zhileykin M.M. No 2021612389; zayavl. 25.02.2021; opubl. 04.03.2021 g.
  23. Maksimov V.P. Kontseptual'naya metodologiya postroyeniya tekhnologii i agregatov meliorativnoy obrabotki solontsovykh pochv s uluchshennymi pokazatelyami kachestva tekhnologicheskikh protsessov: avtoreferat dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk [Conceptual methodology for constructing technologies and units for reclamation processing of alkaline soils with improved indicators of the quality of technological processes: Abstract to Dissertation for degree of PhD in Engineering]: 05.20.01 / Azovo-Chernomors. gos. agroinzhener. akad. Zernograd, 2006. 45 p.
  24. Chelomey V.M. Vibratsiya v tekhnike: Spravochnik [Vibration in engineering: Handbook]. V 6 t. / Red. sovet: V.N. Chelomey (pred.). Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1981. T. 6. Zashchita ot vibratsii i udarov. Pod red. K.V. Frolova. 1981, 456 p.
  25. Volkova V.N., Denisov A.A. Teoriya sistem i sistemnyy analiz [Systems theory and systems analysis]: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Yurayt Publ., 2014. 616 p.
  26. Korchagin P.V., Ye.A. Korchagina, I.A. Chakurin. Snizheniye dinamicheskikh vozdeystviy na operatora avtogreydera v transportnom rezhime [Reduction of dynamic impacts on the motor grader operator in transport mode]. Monografiya. Omsk: SiBADI Publ., 2009. 195 p.