

*Д.О. ВОЛОНЦЕВИЧ*, канд. техн. наук, НТУ “ХПИ”,  
*А.А. ГАРКУША*, канд. военн. наук, *А.Д. РУСАВСКИЙ*,  
Харьковский университет воздушных сил им. Кожедуба

## **ОСОБЕННОСТИ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАШИН НАЗЕМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ НА БАЗЕ ТЯГАЧА Т-155**

В статті викладені особливості складання комплексних функціональних математичних моделей колісних землерійно-транспортних машин на базі шарнірно-сполучених колісних машин у порівнянні зі звичайними багатовісними колісними автомобілями, а також наведений приклад структури модульної побудови програмного комплексу, що реалізує математичний апарат згаданої комплексної функціональної математичної моделі.

In a paper features of drawing up of complex functional mathematical models of wheel digging-transport machines are explained on the basis of the hinge-jointed wheel machines in comparison by usual multiaxis wheel automobiles, and the example of structure of modular construction of the program complex realizing the mathematical device of specified complex functional mathematical model is submitted.

**Введение.** Актуальность представленных материалов подтверждается все более широким внедрением в расчетную практику комплексных функциональных математических моделей (КФММ) сложных динамических систем, позволяющих осуществлять рациональный выбор технических параметров систем и достаточно точно оценивать технические характеристики этих систем еще на этапе их проектирования или модернизации.

Машины наземного обеспечения полетов, построенные на базе тягача Т-155, относятся к самоходным колесным землеройно-транспортным машинам (СКЗТМ) на шасси шарнирно-сочлененных колесных машин (ШСКМ).

**Анализ последних достижений и публикаций.** К настоящему моменту в области теории и математического моделирования движения и рабочих процессов СКЗТМ на шасси ШСКМ можно выделить фундаментальные школы, созданные под руководством Ульянова Н.А. и Баловнева В.И. В Украине этими вопросами активно занимаются ученые Киевского инженерно-строительного института, Киевского и Харьковского автомобильно-дорожного университетов.

В этой области наработан мощный теоретический аппарат взаимодействия рабочих органов СКЗТМ с внешней средой [2, 4], взаимодействия пневматического колеса с грунтом [3], моделирования гидродинамических и гидрообъемных трансмиссий, по общим вопросам оценки эффективности и моделирования СКЗТМ [5] и т.д.

Однако везде, даже при моделировании на относительно современных цифровых ЭВМ, в литературе рассматриваются частные модели отдельных

подсистем СКТЗМ или присутствуют попытки создать серьезно упрощенные обобщенные модели машин в целом.

В НТУ “ХПИ” в содружестве с Харьковским государственным автомобильно-дорожным техническим университетом был выработан новый подход к моделированию возмущенного движения многоосных транспортных колесных машин, в результате осуществления которого была разработана обобщенная КФММ движения колесных машин транспортного и специального назначения [1]. Ключевым моментом этого подхода является обязательное присутствие в комплексной модели моделей всех основных подсистем, содержащихся в машине.

**Цель и постановка задачи.** Целью предлагаемой статьи является определение особенностей составления КФММ СКЗТМ на базе ШСКМ по сравнению с обычными многоосными колесными автомобилями и описание структуры модульной организации программного комплекса, реализующего математический аппарат КФММ.

**Основная часть.** Функциональная математическая модель описывает процессы, протекающие в системах машины в период ее работы, и представляет собой систему дифференциальных уравнений. Она предназначена для анализа характерных рабочих процессов и оптимизации как основных параметров подсистем, так и характеристик машины в целом.

При составлении математической модели на первом этапе обычно используется метод декомпозиции общей структуры машины на подсистемы, для каждой из которых разрабатывается своя функциональная математическая модель. Затем с учетом топологии системы они объединяются в КФММ [1].

Первой особенностью СКЗТМ является наличие рабочего землеройного оборудования, которое на определенных режимах непосредственно взаимодействует с местностью, создавая дополнительное сопротивление движению и нагрузку на шасси и колесный движитель.

Второй особенностью СКЗТМ на базе ШСКМ является наличие двух подвижных друг относительно друга фрагментов корпуса, на которых в произвольном сочетании могут размещаться двигатель, трансмиссия, ведущие колеса и рабочее землеройное оборудование.

Общий подход к моделированию движения ШСКМ аналогичен подходу к моделированию движения классических транспортных колесных и гусеничных машин, однако предполагает обязательный учет указанных выше особенностей.

Для ШСКМ также как и для любых наземных машин характерно наличие неголономных (кинематических) связей, осуществляемых элементами движителей и рабочего оборудования между динамическими системами машины и опорной поверхностью (грунтом, дорожным покрытием и т.п.).

Неголономная связь в общем случае осуществляется совокупностью упругого и фрикционного элементов. Уравнение этой связи должно учитывать запаздывание деформации упругого элемента по отношению к скоростям внешних элементов связи, принадлежащих одновременно выделенным под-

системам. Для этого в него вводят скорость деформации упругого элемента неголономной связи. При последовательном расположении упругого и фрикционного элементов, которое характерно для неголономных связей, осуществляемых элементами движителей или рабочего оборудования, реакцию связи представляют функцией деформации и скорости деформации упругого элемента.

При составлении математических моделей еще в большей степени чем для автомобилей, предполагается сочетание теоретического и экспериментального подходов. Дело в том, что математические модели многих подсистем ШСКМ для теоретического описания происходящих в них динамических процессов настолько громоздки, что для подробного рассмотрения требуют анализа не в составе изделия в целом. К таким подсистемам относятся, в частности, двигатель, шина в ее взаимодействии с дорогой (деформируемым грунтом), рабочее землеройное оборудование в его взаимодействии с грунтом и некоторые другие. Для получения их математических моделей с целью упрощения может применяться кибернетический метод "черного ящика" с определенными экспериментально внешними и регуляторными характеристиками, передаточными функциями и т.п. Однако для точного моделирования предпочтение следует отдавать теоретическому подходу с идентификацией модели по результатам экспериментов.

В результате декомпозиции динамической системы [1, 6] ШСКМ можно получить пять основных относительно автономных подсистем:

- двигатель (со всережимным регулятором) – трансмиссия – ведущие колеса;
- остов (головной модуль) – прицеп – подвеска – движитель;
- тормозная система;
- система управления поворотом;
- рабочее землеройное оборудование – грунт (неголономные связи);
- эластичное колесо – грунт (неголономные связи).

Кроме того, необходимо рассматривать внешние, взаимодействующие с автомобилем системы водителя (оператора) и местности (дороги).

Однако подсистемы, выделенные в результате метода декомпозиции, достаточно наглядно отражают процессы взаимодействия как внутри самих подсистем, так и между ними, но плохо пригодны для реализации в качестве структуры программного комплекса.

Поэтому для СКЗТМ на шасси ШСКМ и, в частности, для машин наземного обеспечения полетов на базе тягача Т-155, предлагается следующая структура модульной организации программного комплекса (рис.).

Модуль **“Механик-водитель”** вырабатывает зависящие от времени управляющие сигналы:

- $h_{п}$  – положение педали управления подачей топлива;
- $N_{пер}$  – номер включенной передачи в трансмиссии;
- $g_{сц}$  – положение педали управления сцеплением;
- $g_{горм}$  – положение педали управления тормозом;

- $g_{\text{пов}}$  – угол поворота рулевого колеса;
- $\sum_1^k U_{\text{упр}}$  – положение органов управления землеройным оборудованием.

Это единственный модуль, который в рамках предлагаемого программного комплекса не имеет входных параметров.

Модуль **“Всережимный регулятор”** в качестве входных параметров имеет:

- $h_{\text{п}}$  – положение педали управления подачей топлива, задаваемое модулем “Механик-водитель”;
- $\Phi_{\text{дв}}$  – угловую скорость вращения коленчатого вала двигателя;
- $\dot{h}_p, h_p$  – скорость и перемещение рейки топливного насоса, возвращаемые после интегрирования.

Выходным параметром модуля “Всережимный регулятор” является  $\ddot{h}_p$  – ускорение перемещения рейки топливного насоса двигателя, которое после интегрирования позволяет получить скорость и перемещение рейки топливного насоса.

Модуль **“Дизельный двигатель”** в качестве входных параметров имеет задаваемые модулем “Всережимный регулятор” скорость и перемещение рейки топливного насоса  $\dot{h}_p, h_p$ , и  $\Phi_{\text{дв}}, \varphi_{\text{дв}}$  – угловую скорость и угол поворота коленчатого вала двигателя, возвращаемые после интегрирования из модуля “Трансмиссия”.

Выходными параметрами модуля “Дизельный двигатель” являются:

- $M_{\text{дв}}$  – свободный крутящий момент двигателя, отдаваемый в модуль “Трансмиссия”;
- $\Phi_{\text{дв}}$  – угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя, отдаваемая в модуль “Всережимный регулятор”.

Модуль **“Трансмиссия”** в качестве входных параметров имеет:

- $N_{\text{пер}}$  – номер включенной передачи в трансмиссии, задаваемый модулем “Механик-водитель”;
- $g_{\text{сц}}$  – положение педали управления сцеплением, задаваемое модулем “Механик-водитель”;
- $M_{\text{дв}}$  – свободный крутящий момент двигателя, приходящий от модуля “Дизельный двигатель”;
- $M_{\text{вкт}}, M_{\text{вкп}}$  и  $M_{\text{тр}}$  – моменты нагрузки на ведущих колесах тягача и прицепа и землеройном оборудовании, приходящие соответственно от модулей “Движитель тягача”, “Движитель прицепа” и “Землеройное оборудование”;
- $\Phi_{\text{дв}}, \varphi_{\text{дв}}, \Phi_{\text{вкт}}, \varphi_{\text{вкт}}, \Phi_{\text{вкп}}, \varphi_{\text{вкп}}, \Phi_{\text{тр}}, \varphi_{\text{тр}}$  – возвращаемые после интегрирования угловые скорости и углы поворота входного и выходных валов трансмиссии.

Выходными параметрами модуля “Трансмиссия” являются угловые ускорения, входного  $\ddot{\varphi}_{дв}$  и выходных валов трансмиссии  $\ddot{\varphi}_{вкт}$ ,  $\ddot{\varphi}_{вкп}$ ,  $\ddot{\varphi}_{тр}$ , которые после интегрирования позволяют получить угловую скорость и угол поворота входного вала трансмиссии  $\dot{\varphi}_{дв}$ ,  $\varphi_{дв}$  и угловые скорости и углы поворота выходных валов трансмиссии  $\dot{\varphi}_{вкт}$ ,  $\varphi_{вкт}$ ,  $\dot{\varphi}_{вкп}$ ,  $\varphi_{вкп}$ ,  $\dot{\varphi}_{тр}$ ,  $\varphi_{тр}$ .

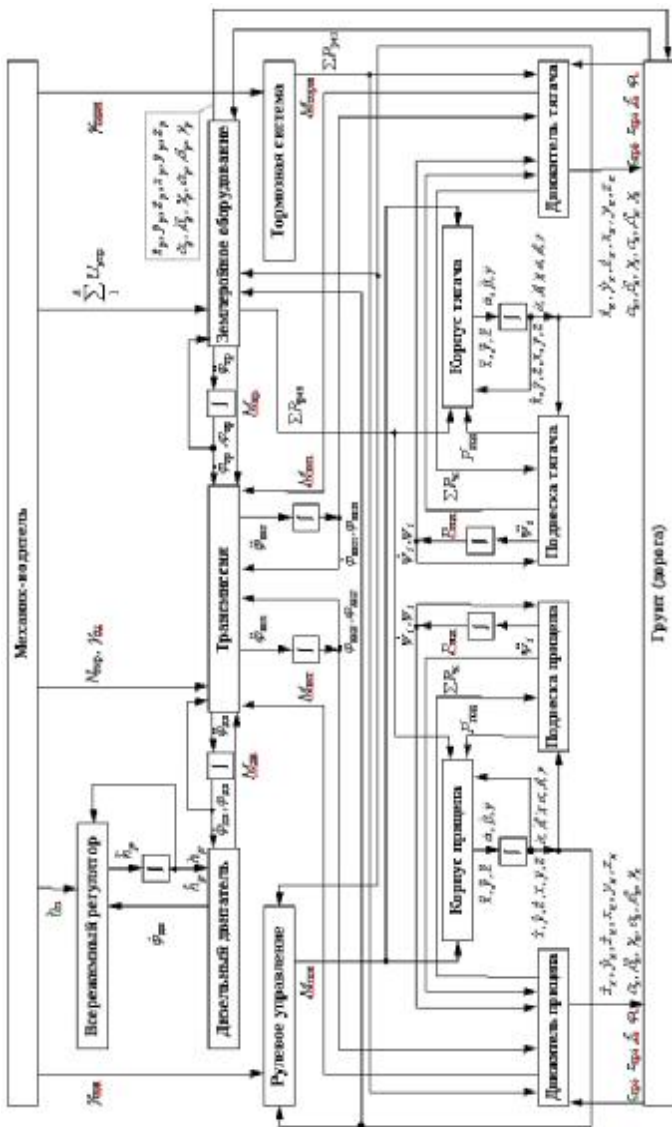


Рис. Модульная структура КФММ машин наземного обеспечения полетов на базе тягача Т-155

Модули “*Двигатель тягача*” и “*Двигатель прицепа*” в качестве входных параметров имеют:

- получаемые после интегрирования от модуля “Трансмиссия” угловые скорости и углы поворота соответствующих выходных валов трансмиссии

$$\omega_{\text{вкт}}, \varphi_{\text{вкт}}, \omega_{\text{вкп}}, \varphi_{\text{вкп}};$$

- получаемые после интегрирования от модулей “Подвеска тягача” и “Подвеска прицепа”  $\psi_i, \psi_i$  соответствующие скорости и перемещения всех обобщенных координат подвески;

- $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  – координаты и скорости перемещений по ним соответствующих корпусов, передаваемые через модули “Подвеска тягача” и “Подвеска прицепа”;

- получаемые от модулей “Подвеска тягача” и “Подвеска прицепа” усилия от упругих и демпфирующих элементов подвески  $P_{\text{под}}$ ;

- получаемые от модуля “Тормозная система” тормозные моменты на колесах  $M_{\text{торм}}$ .

- получаемые от модуля “Грунт (дорога)” коэффициенты сцепления движителя с дорогой под всеми колесами  $\varphi_i$ .

Выходными параметрами модулей “Двигатель тягача” и “Двигатель прицепа” являются:

- $\sum R_k$  – результирующие воздействия от колес, передаваемые в модули соответствующих подвесок;

- $M_{\text{вкт}}$  и  $M_{\text{вкп}}$  – крутящие моменты на ведущих колесах соответственно на тягаче и прицепе, передаваемые в модуль “Трансмиссия”.

Модуль “*Грунт (дорога)*” в качестве входных параметров имеет получаемые от модулей “Двигатель тягача” и “Двигатель прицепа” линейные и угловые скорости и перемещения соответствующих колес

$$x_k, y_k, z_k, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \text{ а также линейные и угловые скорости и перемещения землеройного оборудования } x_p, y_p, z_p, \alpha_p, \beta_p, \gamma_p.$$

Выходными параметрами модуля “Грунт (дорога)” являются коэффициенты сопротивления качению  $f_i$  и сцепления движителя с дорогой  $\varphi_i$ , приведенной жесткости грунта  $c_{\text{гп}}$  и высоты профиля  $z_{\text{гп}}$  под всеми колесами, передаваемые в модули “Двигатель тягача” и “Двигатель прицепа”, а также  $\sum P_{\text{рез}}$  – суммарная сила резания, передаваемая в модуль “Землеройное оборудование”.

Модули “*Подвеска тягача*” и “*Подвеска прицепа*” в качестве входных параметров имеют:

- $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  – линейные и угловые скорости и перемещения корпуса тягача и прицепа, получаемые от соответствующих модулей “Корпус тягача” и “Корпус прицепа” после интегрирования;

–  $\sum R_k$  – результирующие воздействия от колес, передаваемые от модулей “Двигатель тягача” и “Двигатель прицепа”;

–  $\dot{\varphi}_i, \psi_i$  – скорости и перемещения всех обобщенных координат подвески, возвращаемые после интегрирования.

Выходными параметрами модулей “Подвеска” являются:

–  $\ddot{\varphi}_i$  – ускорения всех обобщенных координат подвески;

–  $P_{\text{под}}$  и  $P'_{\text{под}}$  – усилия от упругих и демпфирующих элементов подвески, передаваемые в соответствующие модули “Двигатель” и “Корпус”.

Модули “*Корпус тягача*” и “*Корпус прицепа*” в качестве входных параметров имеют:

–  $P'_{\text{под}}$  – усилия от упругих и демпфирующих элементов подвески, получаемые от соответствующего модуля “Подвеска”;

–  $\sum R_{\text{рез}}$  – суммарные усилия, передаваемые на соответствующий корпус от модуля “Землеройное оборудование”;

–  $M_{\text{пов}}$  – момент, складывающийся тягач и прицеп для получения поворота, генерируемый модулем “Рулевое управление”;

–  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$  – линейные и угловые скорости и перемещения соответствующего корпуса, возвращаемые после интегрирования.

Выходными параметрами модуля “Корпус” являются линейные и угловые ускорения соответствующего корпуса  $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  и  $\ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{\gamma}$ .

Модуль “*Рулевое управление*” в качестве входных параметров имеет:

–  $g_{\text{пов}}$  – угол поворота рулевого колеса, задаваемый модулем “Механик-водитель”;

–  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$  – линейные и угловые скорости и перемещения корпусов тягача и прицепа, полученные после интегрирования из модулей “Корпус тягача” и “Корпус прицепа”.

Выходным параметром модуля “Рулевое управление” является  $M_{\text{пов}}$ , передаваемый в модули “Корпус тягача” и “Корпус прицепа”.

Модуль “*Тормозная система*” в качестве входного параметра имеет  $g_{\text{торм}}$  – положение педали управления тормозом, задаваемое модулем “Механик-водитель”, а выходным параметром является  $M_{\text{торм}}$  – тормозной момент на колесе, передаваемый во все модули “Двигатель”.

**Вывод.** Таким образом, проведенная работа показывает, что для комплексного математического моделирования СКЗТМ на базе ШСКМ можно использовать математический аппарат, наработанный для обычных многоосных автомобилей, при условии учета указанных специфических особенностей объекта моделирования и разработанной модульной структуры КФММ.

В результате построения программного комплекса, реализующего математический аппарат КФММ ШСКМ, по предложенной структуре можно в головном программном модуле сосредоточить только задачи ввода/вывода и интегрирования системы дифференциальных уравнений, правые части для которых формируются в перечисленных выше модулях. Одновременно набор

модулей, составляющих комплекс, может быть сформирован в зависимости от конструкции конкретной машины, а степень их проработки – в зависимости от поставленных перед исследователем задач.

**Список литературы:** 1. Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Карпенко В.А. и др. Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин. // Под общ. ред. А.Н.Туренко. – Харьков: Изд-во ХГАДТУ, 2001, – 640 с. 2. Ульянов Н.А., Ронинсон Е.Г., Соловьев В.Г. Самоходные колесные землеройно-транспортные машины. / Под ред. Н.А.Ульянова. – М.: Машиностроение, 1976. – 359 с. 3. Ульянов Н.А. Колесные двигатели строительных и дорожных машин: Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1982. – 279 с. 4. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 335 с. 5. Баловнев В.И., Завадский Ю.В., Кустарев Г.В. Использование ЭВМ при исследовании эффективности дорожных машин методами математического моделирования. – М.: Изд-во МАДИ, 1987. – 104 с. 6. Карпенко В.А., Качур В.М., Волонцевич Д.О. К вопросу моделирования подсистемы тягач – прицеп – подвеска - движитель шарнирно-сочлененных колесных машин // Вісник НТУ "ХПИ". Тем. вип. "Автомобіле- та тракторобудування". –Харків: НТУ "ХПИ", – 2004. – №2. – С.26-30.

*Поступила в редколлегию 12.10.06*

УДК 519.2:621.658.512

**А.В. ГРАБОВСКИЙ, А.Ю. ТАНЧЕНКО,  
В.И. СЕРИКОВ**, канд. техн. наук, НТУ „ХПИ”,  
**М.М. ПЕКЛИЧ**, ОАО „Головной специализированный  
конструкторско-технологический институт”, г. Мариуполь

### **СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БАЗОВЫХ ПЛИТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Запропонована керуюча програмна оболонка, яка дозволяє проводити багатоваріантні розрахунки базових плит верстатних пристосувань з Т-образними пазами. Представлені тестові розрахунки досліджуваного класу конструкцій.

The managing shell program is offered allowing to conduct the multiple calculations of base frame of machine-tools with tee slots. Tests are presented calculations of the explored class of constructions.

**Введение.** Многолетний опыт использования различных станков, точность изготовления, а также требования к сложности изготавливаемых на станках деталей показали, что необходимы качественно новые подходы к изготовлению и расчету различных частей станков. Это связано с допустимой точностью изготавливаемых деталей, а также с необходимостью удешевления технологического оборудования. Для этого необходимо использовать более точные методики расчетов различных частей и узлов оборудования, на котором будут в дальнейшем производиться различного рода ответственные, точные технологические детали и конструкции [1].