

УДК 631.354.2

## К ВОПРОСУ О ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА САМОХОДНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА «ПАЛЕССЕ FS60»

**В. Б. ПОПОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** самоходный измельчитель, функциональное проектирование, адаптер, подъемно-навесное устройство, оптимизационный синтез, грузоподъемность.

### **Введение**

Самоходный измельчитель кормоуборочного комбайна FS60 (рис. 1), выпускаемого ЗАО СП «Брянсксельмаш», агрегируется с адаптерами посредством подъемно-навесного устройства (ПНУ), состоящего из объемного гидропривода (ГП) и четырехточечного механизма навески (МН).

Эффективность работы самоходного кормоуборочного комбайна FS60 [1], предназначенного для заготовки кормов, зависит как от рационального выбора параметров ПНУ, так и от их регулировки во время работы [2].



Рис. 1. Самоходный измельчитель кормоуборочного комбайна FS60

Известны три основных режима эксплуатации ПНУ в составе кормоуборочного комбайна FS60: рабочий, транспортный и режим перевода адаптера из рабочего положения в транспортное. Использование известных методов [3] при проектировании ПНУ не может обеспечить комплексную увязку параметров ПНУ, определяющих показатели качества работы современной уборочной техники, и параметров, определяющих грузоподъемность ПНУ. Эти методы осложняют поиск рациональных вариантов ПНУ, увеличивают время и затраты на экспериментальную доводку.

Сегодня конструирование ПНУ ведется в автоматизированном режиме и должно опираться на функциональное проектирование, базирующееся на соответствующих

функциональных математических моделях (ФММ) анализа [4] и синтеза [5]. В настоящей работе сформированы проектные операции и процедуры для функционального проектирования ПНУ самоходного измельчителя FS60, при этом учитывается опыт проектирования подъемно-навесных устройств трех поколений универсальных энергетических средств (УЭС) [6].

Цель работы – обоснование методики функционального проектирования ПНУ FS60, необходимой для решения задачи его автоматизированного проектирования.

### Основная часть

Динамичная разработка новых и модернизация серийных адаптеров, агрегируемых с самоходным измельчителем посредством ПНУ, наращивает требования, предъявляемые к выходным параметрам МН и ГП. Срочное и качественное решение этой проблемы возможно только в режиме автоматизированного расчета выходных параметров ПНУ, опирающегося на имитационное моделирование процесса подъема адаптера. Вес адаптера и удаление его центра тяжести от оси подвеса МН имеют тенденцию к росту, а заданная траектория подъема адаптера воспроизводится, если обеспечена достаточная грузоподъемность ПНУ.

Поворотные рычаги четырехточечного МН (рис. 2, б), в отличие от трехточечного (рис. 2, а), непосредственно связаны с адаптером, что обеспечивает ему большую устойчивость в движении. Таким образом, в четырехточечном МН поворотные рычаги в работе заменили верхнюю тягу трехточечного МН, что способствует его структурному упрощению. Форма и размеры присоединительных элементов, а также размеры  $A$  и  $B$  присоединительного треугольника (прямоугольника) (рис. 2) и кинематические параметры ПНУ регламентируются соответствующими национальными и международными стандартами [7].

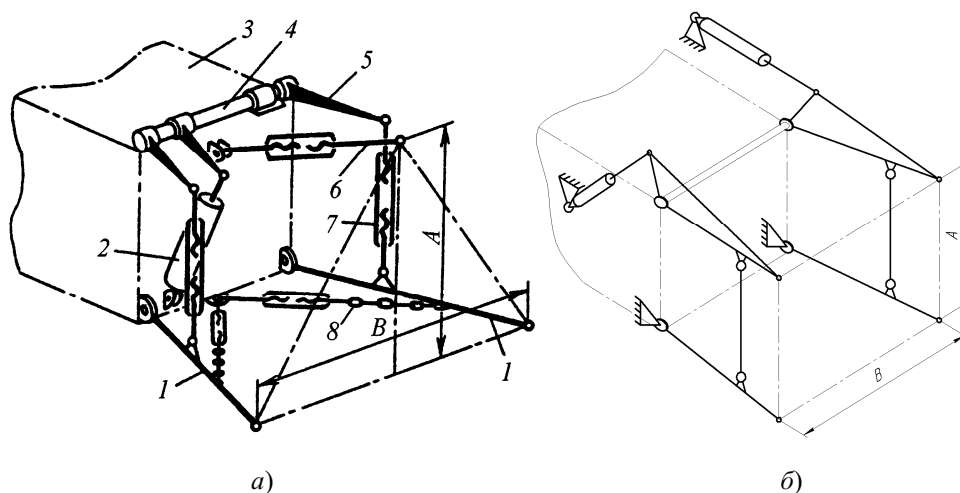


Рис. 2. Схемы для трехточечного (а) механизма навески трактора и четырехточечного (б) механизма навески самоходного измельчителя: 1, 6 – тяги; 2 – гидроцилиндр; 3 – трактор (рама); 4 – вал; 5 – поворотный рычаг; 7 – раскос

Преобразовав 3D модель МН в плоский аналог, получим рычажный механизм, структура которого идентифицируется одноподвижным шеститизвенником (рис. 3). адаптера присоединяется к МН в четырех точках посредством поворотных рычагов и нижних тяг, а на плоскости преобразуется в выходное звено, положение центра тяжести которого однозначно связано с изменением обобщенной координаты ( $S$ ).

Механизм навески – это основной структурный компонент ПНУ, определяющий характер взаимодействия измельчителя с адаптером в замкнутой кинематической

цепи, состоящей из рамы измельчителя, гидроцилиндра, звеньев МН и адаптера. Ход поршня ( $\Delta S$ ) рассматривается как изменение входной (обобщенной) координаты, а изменение положения центра тяжести адаптера ( $S_6$ ) – как изменение выходной.

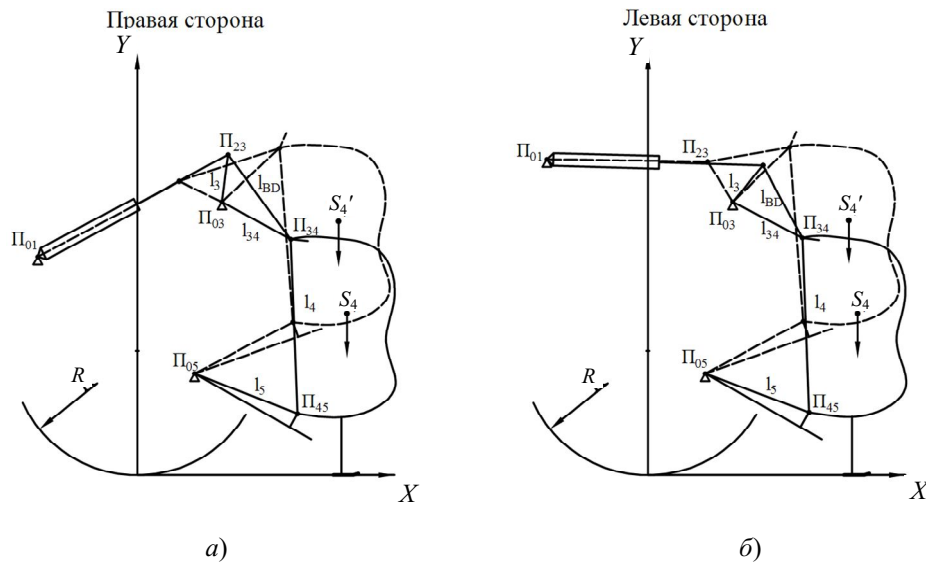


Рис. 3. Плоский аналог кинематической цепи, состоящей из рамы самоходного измельчителя, механизма навески и навесного адаптера (в рабочем и транспортном положениях)

Для определения положения подвижных шарниров МН, аналогов угловых и линейных скоростей формируются процедуры геометрического и кинематического анализа на базе метода замкнутого векторного контура. В результате определяется аналитическое выражение для передаточного числа МН –  $I_{S_4}(S)$ :

$$I_S = \varphi'_3 [U_{53} L_5 \cos \varphi_5 + U_{43} L_{S_4} \cos(\varphi_4 + \varphi_{S_4})], \quad (1)$$

где  $\varphi'_3(S)$  – аналог угловой скорости звена  $L_{34}$ ;  $U_{53}, U_{43}$  – передаточные отношения;  $L_5, L_{S_4}$  – длина нижней тяги и расстояние от оси подвеса до центра тяжести адаптера;  $\varphi_5(S), \varphi_4(S)$  – углы, образуемые  $L_5, L_4$  в правой декартовой системе координат.

Выражение для передаточного числа МН позволяет определить полезную нагрузку  $F(S)$  на гидроцилиндре (ГЦ) и грузоподъемность  $G_{S_4}$  ПНУ:

$$G_{S_4} = \frac{p_{\text{ГЦ}}^{\max} F_c - [F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*) + F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)]}{I_{S_4}(S^*)_{\max}}, \quad (2)$$

где  $p_{\text{ГЦ}}^{\max}$  – максимальное давление в ГЦ;  $F_c$  – площадь поршня ГЦ;  $F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*)$  – приведенная сила инерции и  $F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)$  – приведенная сила трения, определенные для значения обобщенной координаты, соответствующей максимуму передаточного числа.

Приведенная к штоку ГЦ сила инерции может быть определена по выражению

$$F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S) = m_4 a_{S_4}(S) I_{S_4}(S) + J_4 \varepsilon_4(S) \varphi'_4(S), \quad (3)$$

где  $a_{S_4}(S), \varepsilon_4(S)$  – линейное и угловое ускорение;  $m_4, J_4$  – масса и момент инерции адаптера.

Силовой анализ выполняется по группам Ассура, по известной методике. Приведенная сила трения определяется по результатам кинематического и силового анализа:

$$F_{\text{тр}}^{\text{мп}}(S) = F_{\text{трц}} + rf_{\text{тр}} \left\{ \sum_{i=1}^7 R_{0i}(S)\varphi'_i(S) + \sum R_{ij}(S)[\varphi'_i(S) \pm \varphi'_{i+1}(S)] \right\}, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус шарниров;  $f_{\text{т}}$  – коэффициент трения;  $R_{0i}(S), R_{ij}(S)$  – силы реакций в шарнирах МН;  $\varphi'_i, \varphi'_{i+1}$  – аналоги угловых скоростей звеньев МН;  $F_{\text{трц}}$  – сила трения манжеты ГЦ.

Выбор параметров ПНУ для обеспечения полного подъема адаптера важен как в энергетическом аспекте, так и в информационном. Большая часть рассчитываемых здесь выходных параметров используется и при других режимах эксплуатации ПНУ FS60. Например, рабочее и транспортное положения оси подвеса –  $\text{П}_{45}$ , завал стойки присоединительного треугольника –  $\Delta\varphi_4$ , высота подъема  $Y_{S4}$  и вылет адаптера  $X_{S4}$ . Передаточное число механизма навески и грузоподъемность ПНУ, максимальная высота подъема адаптера, а также время его подъема и максимальное давление в гидроприводе влияют на режимы работы агрегатов. Они относятся к основным показателям качества ПНУ [5] и определяются параметрами механизма навески, гидропривода и навесного оборудования.

Для расчета выходных параметров ПНУ были разработаны функциональные математические модели (ФММ), формализующие процедуры геометрического, кинематического, силового и динамического анализа. Так, результаты силового анализа МН используются для анализа прочности рамы измельчителя и звеньев механизма навески. Динамический анализ нагруженного ГП уточняет результаты силового анализа звеньев МН и одновременно расчет параметров гидропривода, а также время подъема и опускания адаптера. Адекватность и точность разработанных ФММ анализа свойств ПНУ – необходимое условие рационального выбора параметров ПНУ в процедуре оптимизационного синтеза.

Попытки решить задачу параметрической оптимизации искусственным уменьшением реального числа критериев оптимальности (показателей качества), как правило, приводят к серьезному огрублению задачи и тем самым ставят под сомнение итог ее решения. Примером такой попытки может быть сведение многокритериальной задачи к однокритериальной. Под постановкой многокритериальной задачи здесь понимается обоснование и построение содержательного допустимого множества решений, которое определяется параметрическими, функциональными и критериальными ограничениями [5]. Алгоритм поиска оптимального решения для ПНУ FS60 представлен на рис. 4.

Выбор параметров МН выполнялся с учетом его структуры и руководствуясь соображениями взаимосвязанной компоновки МН и механизма вывешивания адаптера. Ранее проектная задача была сведена к выбору удовлетворяющего требованиям варианта из серии, проанализированной графоаналитически. Такой подход оставляет неисследованными ряд комбинаций внутренних параметров МН, реализующих меньшие средние значения передаточного числа (1).

Параметрический синтез шестизвенного МН выполняется с целью определения его внутренних параметров, обеспечивающих снижение среднего значения целевой функции – передаточного числа МН при одновременном выполнении условий работоспособности МН. Условия работоспособности (функциональные ограничения) представляют собой формализованные выражения для технических требований к МН и задаются системой неравенств:

$$\begin{cases} S < l_3 + \sqrt{(Y_{03} - Y_{01})^2 + (X_{03} - X_{01})^2}; \\ \Delta Y_M = Y_{45}(S^{\max}) - Y_{45}(S_p) \geq \Delta Y_M^{\text{доп}}; \\ \Delta \varphi_4^{\max} = \varphi_4(S^{\max}) - \varphi_4(S_p) \leq \varphi_4^{\text{доп}}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Delta Y_M(S)$  – ход оси подвеса;  $\Delta \varphi_4^{\max}$  – изменение угла поворота адаптера;  $Y_{01}, X_{01}, Y_{03}, X_{03}$  – координаты крепления звеньев МН на раме измельчителя.

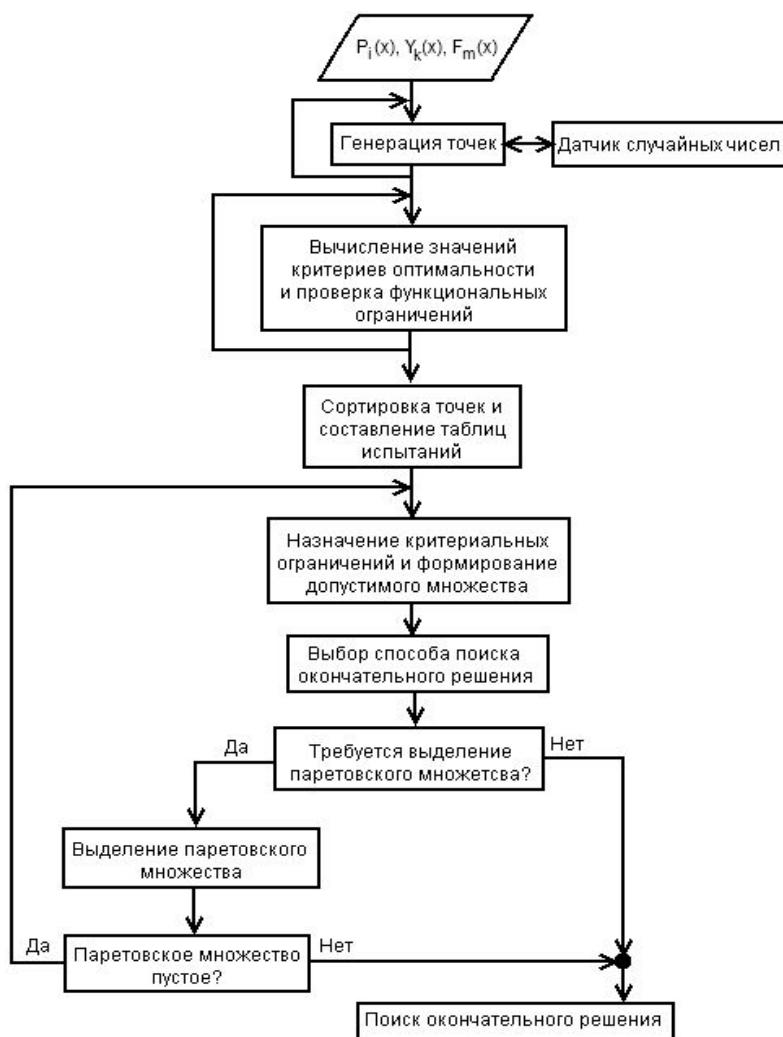


Рис. 4. Алгоритм многокритериальной оптимизации ПНУ FS60

Для всех перечисленных критериев поиск экстремума (минимума) выполнялся по методу Монте-Карло, с выбором начальной точки  $\bar{X}^0$ , представляющей набор исходных данных и характеризующих базовый вариант ПНУ. Последовательно, с помощью датчика случайных чисел с повышенной равномерностью, построенного на основе ЛП<sub>τ</sub>-последовательности [8], выбирались  $N$  пробных точек  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , расположенных равномерно в области поиска, ограниченной параметрическими ограничениями. Координаты каждой точки определялись по формуле

$$x_{ij} = x_{i\min} + \xi_{ij}(x_{i\max} - x_{i\min}), \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots N, \quad (6)$$

где  $n$  – число параметров;  $\xi_{ij}$  – случайное число в диапазоне  $[0,1]$ ;  $N$  – число испытаний;  $x_{i\min}/x_{i\max}$  – минимальные/максимальные значения варьируемых параметров.

Искомые значения оптимизируемых параметров должны удовлетворять ряду ограничений, которые делятся на прямые и функциональные [3]. Прямые ограничения касаются предельных значений управляемых параметров  $\bar{X}_{\min} \leq \bar{X} \leq \bar{X}_{\max}$ , в решаемой задаче их варьирование выполнялось в диапазоне  $\pm 5\%$  от их номинального значения.

В основу поиска положен метод исследования пространства параметров [8]. Исследование состоит из трех этапов 1–3. Первый этап – составление таблиц испытаний – выполняется ПЭВМ. Выбираются  $N$  пробных точек  $\underline{\alpha}^1, \dots, \underline{\alpha}^N$ , равномерно расположенных в многомерном кубе, в области очерченной границами изменения управляемых параметров пробной (исходной) модели ПНУ. Пробные точки, не удовлетворяющие функциональным ограничениям, отбрасываются и в поиске оптимальных решений не участвуют. В каждой из точек  $\underline{\alpha}^i$  вычисляются все локальные критерии  $\Phi_v(\underline{\alpha}^i)$ . По каждому критерию составляется таблица испытаний, в которой значения  $\Phi_v(\underline{\alpha}^1), \dots, \Phi_v(\underline{\alpha}^{iN})$  расположены в порядке возрастания. Локальный критерий или критерий оптимальности определяется здесь как числовая характеристика, которая связана с качеством технического объекта (ПНУ) монотонной зависимостью.

Второй этап – выбор критериальных ограничений – предполагает вмешательство конструктора. Рассматривая поочередно каждую из таблиц, он должен назначить ограничения  $\Phi_v^{**}$ . Конструктор заинтересован в уменьшении этих значений, однако если выбрать все  $\Phi_v^{**}$  слишком малыми, то множество допустимых точек  $D$  может оказаться пустым.

Результатом ввода критериальных ограничений и продолжения поиска является область компромиссов или компромиссная «кривая», на которой расположены так называемые неулучшаемые паретовские модели (улучшение одного из критериев неизбежно влечет ухудшение других). Получив достаточно представительное множество моделей, оптимальных по Парето, конструктор приступает к его анализу, конечной целью которого является выявление предпочтительных (оптимальных) моделей.

В результате условно можно выделить несколько стадий разработки ПНУ FS60: предпроектных исследований, функционального проектирования, уточнения внешних и внутренних параметров ПНУ по результатам стендовых и лабораторно-полевых испытаний, наконец, проектирования с уточненными исходными данными и окончательного выбора структуры и параметров для основных компонентов ПНУ.

Стадия предпроектных исследований включает в себя анализ конструкций ПНУ таких ведущих фирм, как, например, CLAAS, John Deere, Walterscheid; анализ накопленного опыта конструирования ПНУ для трех поколений УЭС в НТЦ комбайностроения [6] и технико-экономическое обоснование рекомендуемого к разработке варианта.

Характерными особенностями ПНУ современных МЭС (энергонасыщенных тракторов и универсальных энергетических средств) являются:

- усложнение структуры механизма навески и гидропривода подъемно-навесных устройств;
- наращивание функций, выполняемых гидроприводом ПНУ;
- рост грузоподъемности ПНУ, в том числе за счет параметрической оптимизации.

На стадии функционального проектирования ПНУ разрабатывают в автоматизированном режиме, что предполагает регулярное обращение к функциональным математи-

ческим моделям (ФММ), имитирующим режимы работы ПНУ в составе FS60. При этом ФММ – это основные компоненты математического обеспечения, обеспечивающие на завершающей стадии разработки ПНУ рациональный выбор его параметров.

Структура процесса функционального проектирования ПНУ FS60 представляется последовательностью чередующихся проектных процедур: анализ – принятие решения – синтез – принятие решения – анализ и т. д. Обеспечить итеративное решение задач функционального проектирования ПНУ призван повторяющийся цикл из трех проектных процедур: анализ – принятие решения – синтез.

Исходя из назначения FS60 и навешиваемых адаптеров, инженер-конструктор одновременно стремится удовлетворить ряд противоречивых условий и требований:

- рассчитать и выбрать внутренние параметры МН так, чтобы в моменты начала и окончания движения навесная машина занимала желаемое положение, которое одновременно соответствовало и требованиям стандарта [7];
- обеспечить необходимый запас грузоподъемности ПНУ, для навески предполагаемых к агрегатированию адаптеров при ограниченной мощности гидропривода измельчителя;
- обеспечить управляемость FS60 с поднятым в транспортное положение адаптера, а также нормативную нагрузку на передний и задний мосты FS60 во время движения;
- минимизировать нагрузку в элементах ПНУ и силовое воздействие, передаваемое со стороны адаптера через МН на раму FS60.

Однако далеко не всякое паретовское решение устраивает конструктора. Именно поэтому принципиально важно построить содержательное (представительное) паретовское множество решений, из анализа которого конструктор (Совет специалистов) в дальнейшем определит оптимальную модель.

В результате постановки вычислительного эксперимента и решения задачи многокритериальной оптимизации было получено несколько паретооптимальных вариантов моделей ПНУ, выбор из которых стал возможен при использовании различных схем компромисса, когда приоритет устанавливается за вариантом ПНУ, имеющим улучшение показателей по большинству критериев оптимальности.

### **Заключение**

Методика функционального проектирования ПНУ FS60 сформирована с учетом представленного ниже комплекса рекомендаций:

1. При разработке ФММ учитываются влияние окружающей среды, структура и параметры гидропривода, механизма навески и параметры адаптера.
2. Проектировать ПНУ FS60 на основе ФММ анализа и оптимизационного синтеза, корректируемых с учетом изменения параметров режимов эксплуатации.
3. Задачи анализа [4] и синтеза [5] ПНУ решаются последовательно, с последовательным усложнением условий работы и режимов эксплуатации.
4. Расчет выходных параметров ПНУ в составе кормоуборочных комбайнов для режимов эксплуатации выполняется в следующей последовательности:
  - подъем адаптера из рабочего положения в транспортное [4];
  - опускание адаптера;
  - рабочие режимы с адаптером;
  - транспортный переезд с адаптером в полностью поднятом положении.
5. Параметры (коэффициенты) в уравнениях, представленные в задачах анализа, идентифицируются по результатам лабораторно-полевых испытаний ПНУ FS60.
6. При определении функциональных схем ПНУ используются результаты анализа современных конструкций ПНУ уборочных машин и тракторов, а также результаты патентного поиска.

7. Процесс функционального проектирования ПНУ кормоуборочных комбайнов организуется как последовательность итераций, циклов-триад: анализ – принятие решения – синтез, выполняемых конструктором в диалоге с ПЭВМ.

Методика функционального проектирования ПНУ FS60 может быть взята за базу при модернизации автоматизированного проектирования идентичных по структуре ПНУ колесных тракторов, в том числе «Беларус», а также подъемных механизмов дорожно-строительных машин.

### Литература

1. Комбайн кормоуборочный самоходный КСК-600 «ПАЛЕССЕ FS60» : инструкция по эксплуатации. – Гомель : РКУП «ГСКБ», 2011. – 123 с.
2. Навесное устройство мобильного энергетического средства : пат. 7496 Респ. Беларусь, МПК А 01 В 59/06 / В. Б. Попов ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № U2101085 ; заявл. 31.12.2010 ; опубл. 2011 // Офиц. бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 4. – С. 154.
3. Гуськов, В. В. Тракторы. Ч. III. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов, И. П. Ксеневич. – Минск : Выш. шк., 1981. – 383 с.
4. Попов, В. Б. Формализованное описание режима работы подъемно-навесного устройства самоходного измельчителя кормоуборочного комбайна «ПАЛЕССЕ FS60» / В. Б. Попов // Вестн. Брян. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 5 (67). – С. 35–43.
5. Попов, В. Б. К вопросу параметрической оптимизации подъемно-навесного устройства мобильного энергетического средства на стадии проектирования / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 2. – С. 35–42.
6. Попов, В. Б. Развитие подъемно-навесных устройств универсальных энергетических средств / В. Б. Попов // Техника будущего: перспективы развития сельскохозяйственной техники : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Кубан. гос. аграр. ун-т. – Краснодар, 2013. – С. 171–174.
7. Машины сельскохозяйственные, навесные и прицепные. Общие требования безопасности : ГОСТ 12.2.111–85.
8. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями : учеб. пособие для вузов / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2006. – 175 с.

*Получено 10.09.2018 г.*