
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ**

УДК 62-522.2

**СХЕМНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ПО КРИТЕРИЮ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ
ОДНОКАСКАДНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РУЛЕВЫХ
МАШИН КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ БЛОКОВ**

© 2020 г. О. Б. Белоногов

ПАО РКК “Энергия” им. С.П. Королева, Королев, Москва

e-mail: obelonogoff@mail.ru

Поступила в редакцию 03.06.2019 г.

После доработки 13.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Статья содержит результаты схемно-параметрической оптимизации по критерию электропотребления автономных однокаскадных электрогидравлических рулевых машин с отрицательным перекрытием дроссельных окон их электрогидравлических усилителей золотниковыми плунжерами. В основу оптимизации положены результаты исследования влияния конструкционных и регулировочных параметров электрогидравлических усилителей на статические характеристики рулевых машин и итерационные методы статического анализа рулевых машин. Обосновывается, что в качестве основного критерия оптимизации таких рулевых машин может быть выбран параметр их минимального электропотребления при обеспечении всех требований к статическим характеристикам, предъявляемым к этим рулевым машинам. В результате проведения расчетов статических характеристик рулевых машин показывается, что окончательные варианты рулевых машин обеих схем имеют весьма близкие значения электропотребления. Поэтому возникает необходимость использовать для оптимизации дополнительные неформализованные свойства рассматриваемых вариантов. В результате анализа статических характеристик устанавливается, что вариант рулевой машины с четырехдроссельным электрогидравлическим усилителем не обладает статической устойчивостью, что является дестабилизирующим фактором, который может приводить к возникновению автоколебаний в рулевом сервоприводе. Оптимальным представляется вариант рулевой машины с двухдроссельным электрогидравлическим усилителем.

DOI: 10.31857/S0002338820030026

Введение. В качестве исполнительных органов рулевых трактов систем управления космических ракетных блоков широкое распространение получили автономные однокаскадные электрогидравлические рулевые машины (РМ) [1, 2].

Поскольку РМ космических ракетных блоков преимущественно работают не в режиме слежения, а в режиме позиционирования, к таким РМ, как правило, не предъявляются требования к динамическим характеристикам, а предъявляются только требования обеспечения статических характеристик, к коим относятся скоростные и силовые (или моментные) характеристики.

Для космических ракетных блоков главным критерием оптимизации в большинстве случаев является масса, выводимая на орбиту, а у их РМ главным критерием оптимизации служит не масса самой РМ (так как масса ее конструкции оптимизирована), а масса бортового химического источника тока, от которого осуществляется электропитание РМ, так как его масса напрямую зависит от электропотребления РМ. Таким образом, массовый критерий оптимизации для РМ выродждается в критерий ее электропотребления. В связи с этим задачу оптимизации РМ можно сформулировать следующим образом: РМ должна обладать минимальным электропотреблением при выполнении всех параметров ее статических характеристик.

Автономные однокаскадные РМ могут выполняться по схемам с двухдроссельным и четырехдроссельным электрогидравлическими усилителями (ЭГУ). Двухдроссельные ЭГУ РМ, как правило, выполняются с отрицательным перекрытием дроссельных окон золотниковыми плунжерами, а четырехдроссельные ЭГУ могут иметь как положительное (нулевое), так и отрицательное

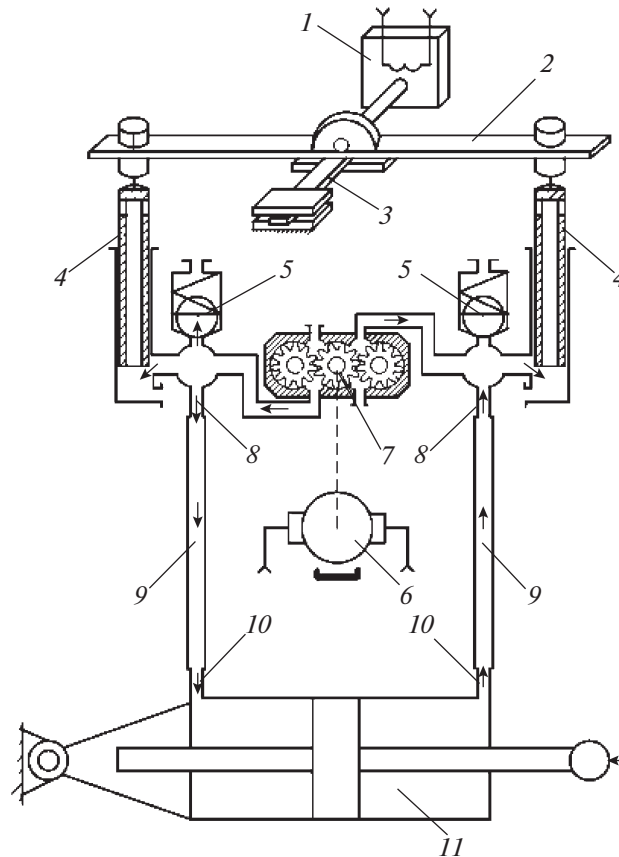


Рис. 1. Схема РМ с двухдроссельным ЭГУ

перекрытие. Поскольку в РМ с ЭГУ с положительным (нулевым) перекрытием насос качает рабочую жидкость в полость нагнетания, снабженную переливным клапаном, такие РМ в процессе работы практически постоянно потребляют максимальную мощность при любой нагрузке и любом командном сигнале. Поэтому указанные РМ в последнее время находят ограниченное применение в рулевых трактах (сервоприводах) систем управления вектором тяги ракетных двигателей.

РМ, представленные на рис. 1 и 2, включают в себя: 1 – поляризованное реле (электрохимический преобразователь); 2 – коромысло; 3 – плоскую нагрузочную пружину; 4 – золотниковые плунжеры; 5 – предохранительный(ые) клапан(ы); 6 – электродвигатель; 7 – трехшестеренный насос; 8 – входные каналы трубопроводов; 9 – трубопроводы; 10 – выходные каналы трубопроводов; 11 – силовой гидроцилиндр.

Конструкции РМ, рассмотренные на рис. 1 и 2, обладают следующими основными особенностями:

золотники РМ выполнены разрезными и состоят из двух плунжеров, которые крепятся к коромыслу с помощью упругих подвесов в виде проволочных тяг, что позволяет компенсировать перекосы плунжеров в гильзах при поворотах коромысла;

золотниковые плунжеры размещены в полых вращающихся осях ведомых шестерен насоса, исполняющих роль гильз, в стенках гильз выполнены радиальные сквозные отверстия, образующие вместе с плунжерами дроссельные окна;

начальные открытия дроссельных окон могут регулироваться установкой золотниковых плунжеров в требуемое положение, это достигается оригинальной конструкцией узлов их подвесов и позволяет компенсировать разбросы статических характеристик РМ, обусловленных неидентичным изготовлением золотниковых пар.

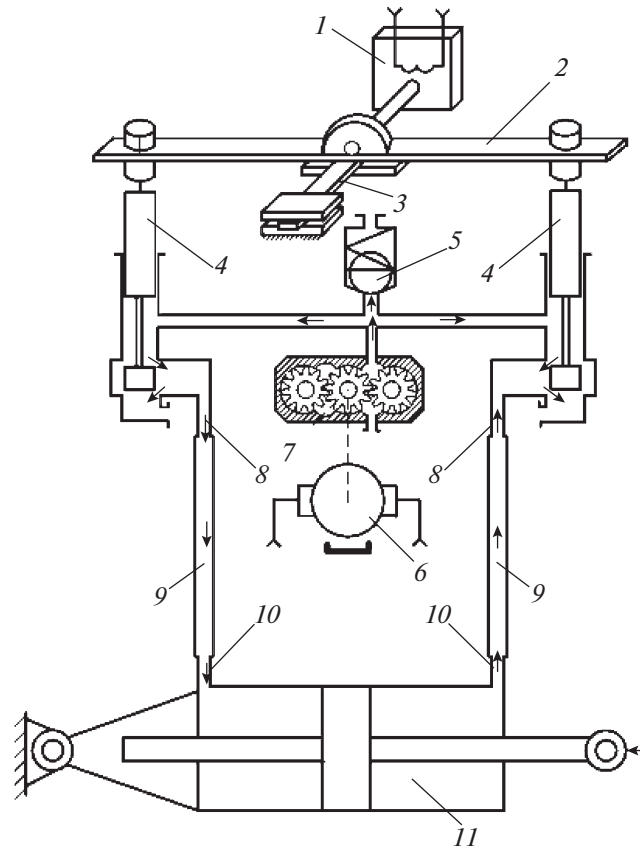


Рис. 2. Схема РМ с четырехдроссельным ЭГУ

Кроме этого РМ с двухдроссельными ЭГУ обладают следующими дополнительными особенностями:

отверстия в гильзах выполняются круглыми, в результате чего дроссельные окна имеют сегментную форму, что дает возможность несколько компенсировать нелинейность их гидравлических характеристик;

золотниковые плунжеры выполняются в виде тонкостенных трубок со сквозными радиальными отверстиями вблизи мест крепления проволоочных тяг. Благодаря этому практически устраняется действие гидростатических сил в процессе функционирования РМ.

1. Постановка задачи. К оптимизации в настоящей работе приняты РМ с двухдроссельным (рис. 1) и четырехдроссельным (рис. 2) ЭГУ с отрицательным перекрытием дроссельных окон золотниковыми плунжерами и с силовым механизмом в виде силового гидроцилиндра с поступательным перемещением рабочего органа (поршня со штоком), имеющие одинаковые комплектующие элементы и одинаковые требования к статическим характеристикам.

В основу оптимизации РМ были положены:

результаты исследования рабочих процессов функциональных элементов РМ [3–8];

результаты исследования влияния конструктивных и регулировочных параметров ЭГУ на статические характеристики РМ [9–11];

итерационные методы статического анализа рулевых машин [12, 13].

Принятые к оптимизации РМ должны обеспечивать следующие номинальные параметры статических характеристик:

ток трогания РМ $i_{тр}$, характеризующий зону нечувствительности, не более 2 мА;

скорость движения поршня РМ $V_{п}$ при противодействующей нагрузке на штоке 1000 Н и командном токе $i_{к} = 8$ мА должна быть 28 мм/с;

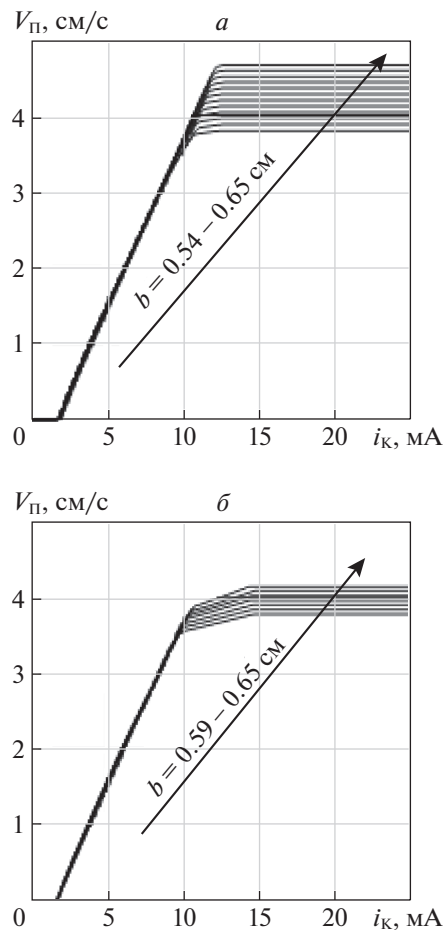


Рис. 3. Зависимости $V_{\text{п}} = f(i_{\text{к}}, b)$ РМ: а – с двухдроссельным ЭГУ; б – с четырехдроссельным ЭГУ

скорость движения поршня РМ $V_{\text{п}}$ при противодействующей нагрузке на штоке 1000 Н и командном токе $i_{\text{к}} = 25$ мА должна быть не менее 38 мм/с;

скорость движения поршня РМ $V_{\text{п}}$ при противодействующей нагрузке на штоке 2200 Н и командном токе $i_{\text{к}} = 25$ мА должна быть не менее 19 мм/с;

максимальное усилие $F_{\text{п}}$, развиваемое поршнем РМ, должно быть не менее 3600 Н.

Поскольку ток трогания РМ сильно зависит от начального давления в полостях силового гидrocилиндра, а следовательно, и от токопотребления ее электродвигателя $I_{\text{э}}$, необходимо задать ее конкретным значением. Исходя из статистических данных по настройкам РМ, а также с целью исключения влияния вибрационных и ударно-импульсных нагрузок на работу РМ в составе маршевого двигателя, было выбрано конкретное значение тока трогания $i_{\text{тр}}$, равное 1.8 мА, т.е. близкое к его максимальному значению.

Электропотребление электрогидравлической РМ определяется шириной зубчатого венца шестерни питающего насоса b , а также вариацией конструкционных и регулировочных параметров ЭГУ. Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров ЭГУ на статические характеристики РМ [9–11] показало, что преимущественным параметром, который оказывает значительное влияние на наклон скоростной характеристики, является относительная локальная толщина набегающей стенки гильзы ЭГУ (стенки оси шестеренного насоса) $\delta_{\text{о}}$. В процессе проведения оптимизации выяснилось, что для РМ с двухдроссельным ЭГУ вариация этого параметра не требуется.

2. Описание алгоритма оптимизации. Алгоритм разработанного метода оптимизации РМ заключался в следующем:

у обеих математических моделей РМ, начиная с начального значения с шагом в 1 мм, уменьшалась ширина зубчатого венца шестерни насоса b ;

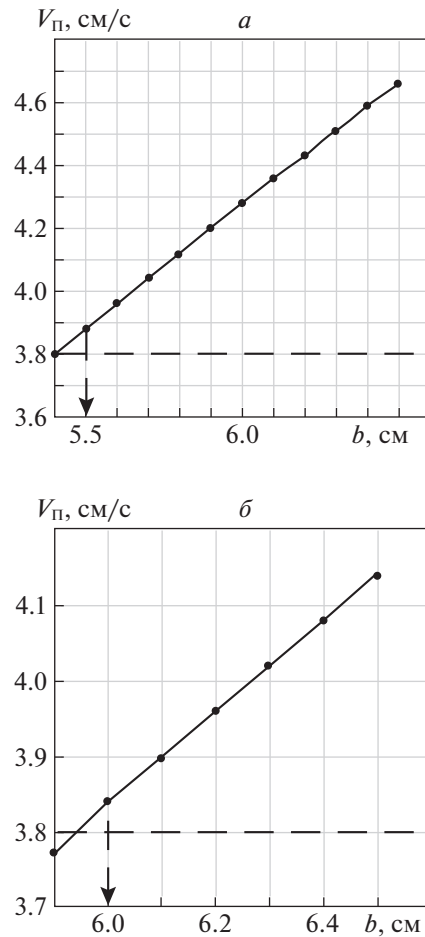


Рис. 4. Зависимости $V_{п} = f(b)$ РМ: а – с двухдроссельным ЭГУ; б – с четырехдроссельным ЭГУ

осуществлялась виртуальная настройка обеих математических моделей РМ на номинальные параметры путем проведения расчетов статических характеристик [12, 13] при вариации таких конструктивных и регулировочных параметров ЭГУ, как коэффициент позиционного момента, создаваемого плоской нагрузочной пружиной $K_{п.м.}$, начальное открытие дроссельных окон X_{30} и относительная локальная толщина набегающей стенки гильзы δ_0 ;

анализировались полученные результаты расчетов на предмет соответствия номинальным параметрам статических характеристик.

Процесс продолжался до тех пор, пока математическая модель оптимизируемой РМ не переставала обеспечивать какой-либо номинальный параметр статических характеристик.

Таким критичным номинальным параметром для обеих схем РМ стала максимальная скорость движения поршня РМ $V_{п}$ при нагрузке на штоке 1000 Н и командном токе $i_{тр} = 25$ мА, которая должна быть не менее 38 мм/с.

Для РМ с двухдроссельным ЭГУ оптимальное значение ширины зубчатого венца шестерни насоса b составило 5.5 мм, а для РМ с четырехдроссельным ЭГУ значение этого параметра составило 6.0 мм.

Несмотря на то, что у представленного метода оптимизации имеется главный критерий – минимальное электропотребление, тем не менее, метод является многокритериальным, так как в процессе оптимизации необходимо обеспечивать все требования к статическим характеристикам.

Процессы оптимизации РМ с двухдроссельным и четырехдроссельным ЭГУ иллюстрируются соответственно рис. 3, на котором показаны скоростные характеристики РМ после виртуальной настройки при противодействующей нагрузке на штоке 1000 Н и меняющейся ширине зубчатого

Таблица 1. Регулировочные и конструкционные параметры РМ с двухдроссельным ЭГУ после виртуальной настройки

Ширина зубчатого венца шестерни насоса b , мм	Коэффициент позиционного момента, создаваемого плоской нагрузочной пружиной $K_{п.м.}$, Н · м/рад	Начальное открытие дроссельных окон X_{30} , мм
6.5	1.133055	0.280
6.4	1.135017	0.278
6.3	1.137960	0.275
6.2	1.144827	0.272
6.1	1.147770	0.269
6.0	1.148751	0.266
5.9	1.148751	0.263
5.8	1.157580	0.260
5.7	1.157580	0.255
5.6	1.162485	0.251
5.5	1.167930	0.249
5.4	1.162485	0.243

Таблица 2. Регулировочные и конструкционные параметры РМ с четырехдроссельным ЭГУ после виртуальной настройки

Ширина зубчатого венца шестерни насоса b , мм	Коэффициент позиционного момента, создаваемого плоской нагрузочной пружиной $K_{п.м.}$, Н · м/рад	Начальное открытие сливных дроссельных окон X_{30} , мм	Относительная локальная толщина набегающей стенки гильзы δ_0
6.5	1.082043	0.280	0.619
6.4	1.140903	0.278	0.633
6.3	1.137960	0.275	0.633
6.2	1.128150	0.272	0.608
6.1	1.128150	0.269	0.557
6.0	1.128150	0.266	0.533
5.9	1.128150	0.263	0.504

венца шестерни питающего насоса b , и рис. 4, на котором рассмотрены зависимости максимальной скорости движения штока РМ $V_{п}$ при нагрузке на штоке 1000 Н и командном токе 25 мА от ширины зубчатого венца шестерни питающего насоса b . На рис. 4 представлены получаемые оптимальные значения ширины зубчатого венца шестерни насоса b .

При этом значения варьируемых регулировочных и конструкционных параметров этих РМ по шагам изменения ширины зубчатого венца шестерни питающего насоса b после виртуальной настройки приведены соответственно в табл. 1 и 2.

На рис. 5 показаны зависимости тока, потребляемого РМ I_3 после виртуальной настройки от командного тока i_k при нагрузке на штоке 1000 Н и меняющейся ширине зубчатого венца шестерни питающего насоса b .

3. Сравнительный анализ характеристик РМ. Как видно из рис. 5, окончательные варианты РМ обеих схем имеют весьма близкие значения электропотребления. В связи с этим возникла необходимость для оптимизации РМ использовать дополнительные неформализованные свойства.

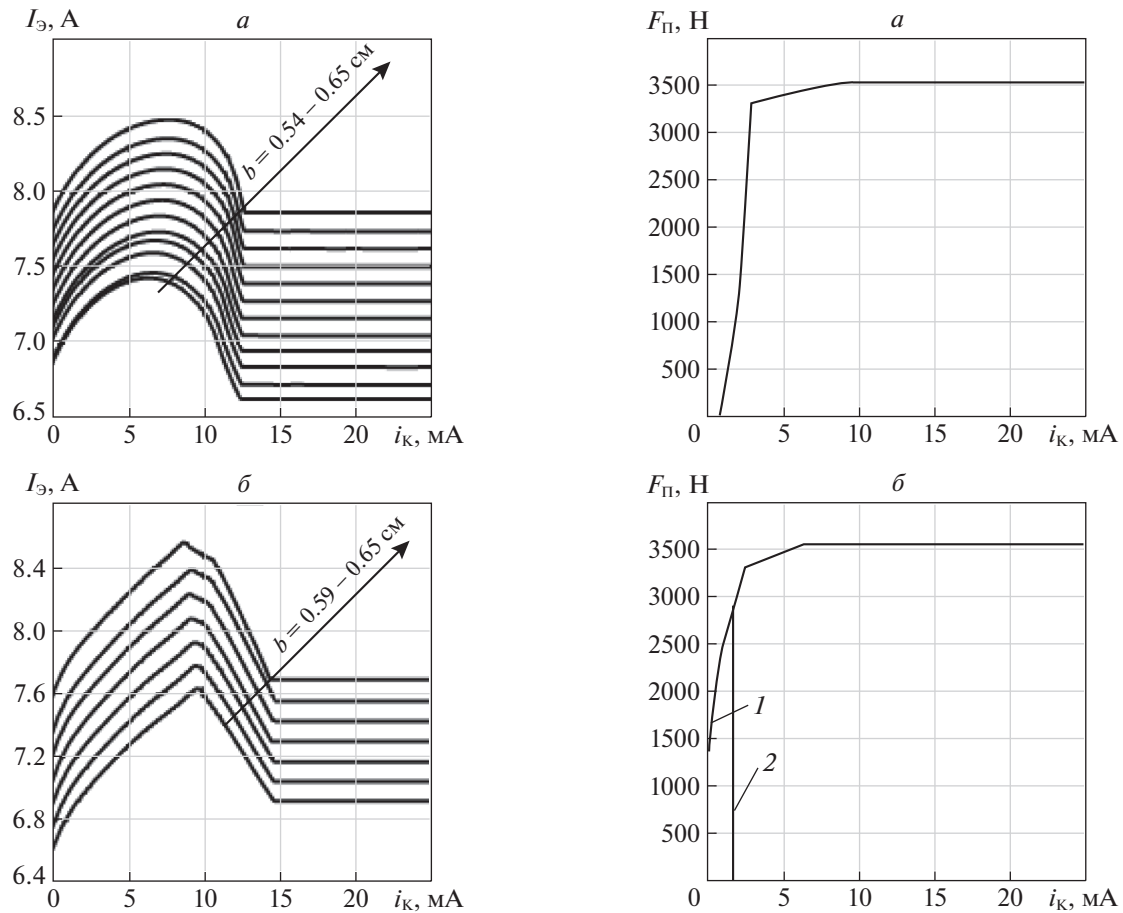


Рис. 5. Зависимость $I_3 = f(i_k, b)$ РМ: *a* – с двухдроссельным ЭГУ; *б* – с четырехдроссельным ЭГУ

Рис. 6. Зависимости $F_n = f(i_k)$ РМ: *a* – с двухдроссельным ЭГУ; *б* – с четырехдроссельным ЭГУ; 1 – первый вариант характеристики; 2 – второй вариант характеристики

На рис. 6 представлены силовые характеристики РМ $F_n = f(I_k)$ после проведения виртуальной настройки, где F_n – усилие, развиваемое поршнем РМ.

В процессе расчетов силовых характеристик РМ было выявлено, что силовая характеристика РМ с четырехдроссельным ЭГУ не однозначна. Дополнительные вычислительные эксперименты показали, что при заторможенном поршне при малейшем смещении коромысла ЭГУ (имитация силового воздействия) в ту или другую сторону золотниковые плунжеры сваливаются под действием гидравлических сил F_T на значительную величину в сторону смещения (в сторону силового воздействия). Это явление иллюстрируется рис. 7.

Соответствующие этим смещениям золотниковых плунжеров (X_3) силовые характеристики представлены на рис. 6. При этом силовая характеристика РМ с двухдроссельным ЭГУ, на рис. 6, *a*, как и соответствующая ей зависимость гидравлической силы от перемещения золотниковых плунжеров (см. рис. 8) в аналогичных условиях, демонстрирует однозначный характер.

Кроме этого, из рассмотрения графика рис. 8 видно, что зависимость $F_T = f(X_3)$ РМ с двухдроссельным ЭГУ выходит из начала координат, что указывает на статическую устойчивость такого типа РМ. Аналогичные результаты были получены и для моделей неоптимизированных РМ [9–11].

Сравнительный анализ характеристик РМ с двухдроссельным ЭГУ и РМ с четырехдроссельным ЭГУ показывает, что и оптимизированный вариант РМ с четырехдроссельным ЭГУ, к сожалению, не обладает статической устойчивостью. Полученный результат является дестабилизирующим фактором, который может приводить к возникновению автоколебаний в рулевом тракте.

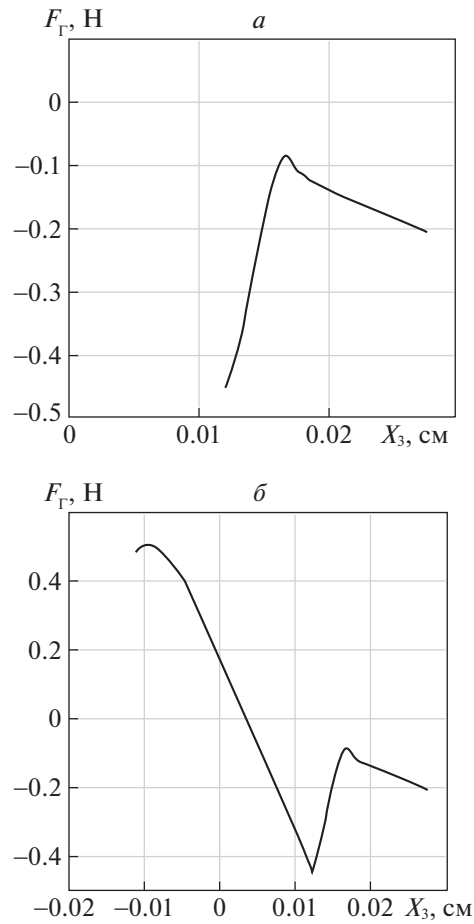


Рис. 7. Зависимости $F_{\Gamma} = f(X_3)$ РМ с четырехдроссельным ЭГУ при заторможенном поршне: *a* – первый вариант характеристики; *б* – второй вариант характеристики

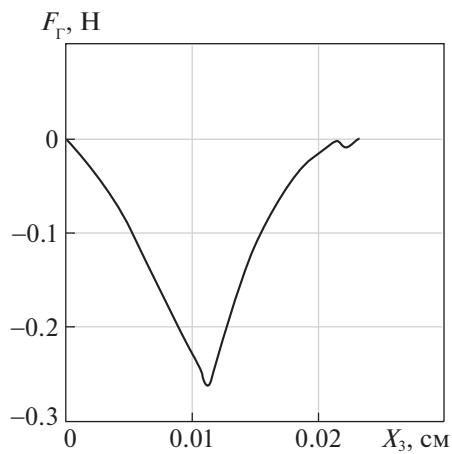


Рис. 8. Зависимость $F_{\Gamma} = f(X_3)$ РМ с двухдроссельным ЭГУ при заторможенном поршне

Таким образом, в результате проведенных исследований есть все основания признать оптимальным вариант РМ с двухдроссельным ЭГУ с шириной зубчатого венца шестерни насоса *b*, составляющей 5.5 мм.

4. Результаты оптимизации. Результатом оптимизации РМ с двухдроссельным ЭГУ стало снижение ее электропотребления приблизительно на 1 А. Учитывая, что система управления вектором тяги маршевого двигателя блока включает два рулевых тракта, а время работы РМ суммарно для всех включений составляет порядка 0.75 ч, то суммарная экономия емкости химического источника тока составляет $1.5 \text{ А} \cdot \text{ч}$, а экономия его массы при удельной емкости $0.8 \text{ кг/А} \cdot \text{ч}$ будет порядка 1.2 кг.

У разгонных блоков (РБ) типа Д и ДМ в рулевых трактах долгое время применялась РМ с четырехдроссельным ЭГУ с отрицательным перекрытием дроссельных окон золотниковыми плунжерами, и все это время в них периодически возникали автоколебания, которые с переменным успехом пытались устранить либо перенастройкой, либо заменой РМ. Кроме этого, автоколебания выходного штока РМ иногда наблюдались и на испытательном стенде РМ, даже при отсутствии замыкания РМ электрической обратной связью.

Окончательно избавиться рулевые тракты РБ от автоколебаний удалось только после внедрения РМ с двухдроссельным ЭГУ. К настоящему времени не зарегистрировано ни одного случая возникновения автоколебаний в рулевых трактах.

Заключение. В качестве основного критерия (задачи) оптимизации РМ предложен параметр их минимального электропотребления при обеспечении всех требований к статическим характеристикам, предъявляемым к этим РМ. Разработана и прошла апробацию предлагаемая методика схемно-параметрической оптимизации РМ с четырехдроссельным и двухдроссельным ЭГУ с отрицательным перекрытием дроссельных окон золотниковыми плунжерами, построенная на виртуальной настройке математических моделей РМ на номинальные параметры путем проведения расчетов их статических характеристик при вариации конструкционных и регулировочных параметров их ЭГУ для различных значений ширины зубчатого венца шестерни насоса.

В процессе проведения исследований установлено, что РМ с четырехдроссельным ЭГУ в оптимизированном исполнении не обладает статической устойчивостью, что является дестабилизирующим фактором, который может приводить к возникновению автоколебаний в рулевом тракте системы управления вектором тяги. Оптимальным признан вариант РМ с двухдроссельным ЭГУ с отрицательным перекрытием дроссельных окон золотниковыми плунжерами и с шириной зубчатого венца шестерни насоса b , составляющей 5.5 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белицкий Д.С., Белоногов О.Б., Жарков М.Н.* Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-22. Ракетно-космическая техника. Кн. 1. Гл. 8.8 Исполнительные приводы систем управления. М.: Машиностроение, 2012. С. 918–924.
2. *Белоногов О.Б., Жарков М.Н., Кудрявцев В.В., Степан Г.А., Черток Б.Е., Шутенко В.И.* Особенности схемно-конструктивных решений и функционирования электрогидравлических рулевых машин ракет (краткий технико-исторический обзор) // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3–4. С. 3–25.
3. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования и идентификация углов истечения потоков в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей рулевых машин ракет // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 35–48.
4. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования и метод идентификации безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 43–57.
5. *Белоногов О.Б.* Экспериментальные исследования истечения и безразмерных параметров течения потоков жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей с вращающимися гильзами // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 5. С. 4–23.
6. *Белоногов О.Б.* Регрессионные методы идентификации параметров энергетических потерь шестеренных насосов рулевых машин ракет // Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2014. № 4. С. 56–61.
7. *Белоногов О.Б.* Метод идентификации безразмерных параметров течения потоков жидкости в шариковых предохранительных и переливных клапанах рулевых машин ракет и двигательных установок космических аппаратов // Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2015. № 1. С. 66–70.
8. *Белоногов О.Б.* Обобщенная математическая модель электродвигателя постоянного тока и метод идентификации ее параметров // Изв. РАН. Энергетика. 2013. № 1. С. 75–81.

9. *Белоногов О.Б.* Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины // *Космонавтика и ракетостроение*. 2009. Вып. 3 (56). С. 169–173.
10. *Белоногов О.Б.* Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины // *Ракетно-космическая техника*. Сер. XII. 2009. Вып. 3. С. 71–78.
11. *Белоногов О.Б.* Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров четырехдроссельного электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины ракетного блока // *Изв. РАН. Энергетика*. 2018. № 4. С. 100–107.
12. *Белоногов О.Б.* Итерационные методы статического анализа двухдроссельной электрогидравлической рулевой машины ракетных блоков // *Космическая техника и технологии*. 2018. № 2 (21). С. 93–105.
13. *Белоногов О.Б.* Итерационные методы статического анализа четырехдроссельной электрогидравлической рулевой машины ракетных блоков // *Космическая техника и технологии*. 2019. № 2 (25). С. 115–126.