

Научная статья
УДК 621.822.614

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ ВТУЛОК КАК СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ДОПУСТИМОГО МОМЕНТА ТРЕНИЯ ШАРНИРНЫХ РУЛЕВЫХ АГРЕГАТОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Валерий Борисович Балякин¹, Андрей Владимирович Лаврин², Дмитрий Евгеньевич Долгих³ ✉

^{1, 2, 3} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет),

Самара, Россия

¹ 029-029@mail.ru

³ i@dolgih-work.ru ✉

Аннотация. Проанализирована условная сумма момента трения и момента от асимметрии тяги в шарнирном рулевом агрегате при условии верхнего ограничения совокупного момента. Рассмотрен метод регулирования данной условной величины с помощью эксцентриковых втулок, показаны его преимущества и недостатки. Предложено усовершенствование метода путем регулирования эксцентриситета втулок и напрямую связанного с ним компенсирующего момента. На основании графического решения представлена характеристика регулируемой величины в виде простейшей функции. Получена аналитическая формула для расчета оптимального значения эксцентриситета втулок.

Ключевые слова: рулевой агрегат, асимметрия тяги, корректируемый момент, эксцентриковая втулка, оптимальный эксцентриситет

Для цитирования: Балякин В.Б., Лаврин А.В., Долгих Д.Е. Оптимизация параметров и границы применения эксцентриковых втулок как средства повышения допустимого момента трения шарнирных рулевых агрегатов жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 109–116.

Original article

PARAMETERS OPTIMIZATION AND APPLICATION SCOPE OF ECCENTRIC HUBS AS MEANS FOR PERMISSIBLE FRICTION TORQUE ENHANCING OF LIQUID ROCKET ENGINES ARTICULATED STEERING UNITS

Valerii B. Balyakin¹, Andrei V. Lavrin², Dmitrii E. Dolgikh³ ✉

^{1, 2, 3} Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University),
Samara, Russia

¹ 029-029@mail.ru

³ i@dolgih-work.ru ✉

Abstract

The authors considered a notional sum of the friction moment and a moment from the asymmetry in the articulated steering unit under condition of the upper limit of the said aggregate moment. For the first time in the practice of studying steering units torque characteristics of liquid rocket engines (LRE), an aggregate torque parameter

© Балякин В.Б., Лаврин А.В., Долгих Д.Е., 2023

was introduced, characterizing the above mentioned conditional sum. The obtained parameter components may be herewith independent variables. The previously declared method of this conditional value adjusting by eccentric hubs may be supplemented by an additional parameter optimizing, i.e. the hubs eccentricity and compensating moment directly associated with it. The currently available analytical dependencies define concretely only the boundary of commencing application of hubs as adjusting elements. The numerical boundary value herewith is unambiguously defined as a half of the compensating torque, created by the eccentric hub, value. In the furtherance of the subject, the value itself of the compensating torque was considered in detail. The dependence of the said adjustable value in the form of the simplest function, which argument is the entire permissible range of the torque, on the thrust asymmetry of the steering unit was established based on the graphical solution. Joint determination of regulation commencing and the adjustable value allows elaborating a universal technique for the aggregate torque correction applicable for the articulated steering units under any limitations for the torques composing the sum. This technique may be applied herewith both at the design stage and in the process of the existing structures modification while operational conditions changing. The newly obtained analytical dependencies allow determining the margin of the friction torque increase without increasing its upper set limit.

Implementation of the new technique for torque characteristics adjustment allows reducing the process of serial structures fine-tuning to the required friction torque values by simple increasing of the admissible value. The said possibility contributes to the number of costly repeated tests number reduction.

Keywords: steering unit, thrust asymmetry, corrected torque, eccentric bushing, optimal eccentricity

For citation: Balyakin V.B., Lavrin A.V., Dolgikh D.E. Parameters Optimization and Application Scope of Eccentric Hubs as Means for Permissible Friction Torque Enhancing of Liquid Rocket Engines Articulated Steering Units. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 109–116.

Введение

При проектировании малоразмерных рулевых агрегатов (РА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) уделяется много внимания вопросам теплового состояния конструкции [1–3], газодинамике [4–6], прочностным задачам [7, 8]. Моментные характеристики также играют важную роль при разработке такого рода агрегатов, однако это направление до сих пор остается малоисследованным. Данная статья является частью исследовательской работы, проводимой сотрудниками Самарского университета, посвященной разработке методик расчета и оптимизации этих параметров.

В отечественных изделиях ракетно-космической техники самый распространенный способ корректировки вектора тяги маршевого ЖРД с неподвижными камерами – применение шарнирных рулевых агрегатов. Данные РА совершают угловые перемещения в узлах качания в одной плоскости. Энергетические возможности соответствующих рулевых машин (РМ) должны с определенным быстродействием преодолевать всю совокупность моментов, реализуемых в РА. Наиболее важными компонентами данной комплексной величины, выступающей в качестве момента сопротивления вращения вала РМ, являются момент трения в узлах качания ($M_{тр}$) и момент от асимметрии тяги РА (M_{ac}). Формально $M_{тр}$ и M_{ac} являются независимыми друг от друга величинами. Момент M_{ac} хорошо поддается регулировке, направленной на уменьшение его абсолютного значения ($|M_{ac}|$), с помощью эксцентриковых втулок. С целью тех-

нологического упрощения втулки применяются с фиксированным значением эксцентриситета, причем их постановка осуществляется при достижении РА фиксированного порогового значения M_{ac1} , установленного разработчиком. Таким образом, реализуется ступенчатый способ регулировки по M_{ac} . Изменение (уменьшение) $M_{тр}$ является значительно более сложной задачей. Для управления процессами трения в узлах качания были проведены исследования или использовались имеющиеся результаты по нескольким направлениям:

а) разработка мероприятий по уменьшению момента трения в уплотнениях [9–13];

б) оценка влияния геометрических параметров подшипников качения на коэффициент трения, подбор оптимального качества обработки рабочих поверхностей [14, 15];

в) разработка методики расчета и мероприятий по уменьшению момента трения в радиальных подшипниках [16, 17];

г) разработка методики расчета и мероприятий по уменьшению момента трения в радиально-упорных бессепараторных подшипниках [18, 19].

Как показывает практика, внедрение сформулированных предложений требует определенного времени, а также изменений сложившихся технологических процессов. Для оперативного решения вопроса о допуске к использованию по назначению РА ЖРД, в котором обнаружено отступление от требований по $M_{тр}$, в производстве практикуется полная переборка узлов качания с неизбежным повторением дорогостоящего огневого испытания

РА. По статистике такое испытание оказывается целесообразным только в половине случаев. Выход из создавшейся ситуации, исключающий необходимость коррекции условий работы трибосопряжений, впервые был предложен в работе [20]. Рассматривалась возможность замены суммы $M_{тр}$ и $|M_{ac}|$ условным суммарным моментом M_{Σ} , что дает возможность его корректировки только эксцентриковыми втулками без вмешательства в конструкцию узлов качания. На практике это означает получение такого способа регулирования, который при сохранении верхнего установленного предела $M_{\Sigma}(M_{\Sigma max})$ максимально полно перераспределяет компоненты суммы в пользу $M_{тр}$. В настоящее время имеется понимание сложившейся проблемы со стороны разработчиков технических условий на РМ, гарантирующих сохранение ее работоспособности и функциональности в случае непревышения $M_{\Sigma max}$. При этом само соотношение компонентов внутри величины M_{Σ} для них не принципиально. В свете изложенного задача определения наиболее оптимального способа регулирования суммарной моментной характеристики становится еще более актуальной. В работе [20] анализируются возможные способы применения эксцентриковых втулок с фиксированным эксцентриситетом. Показано, что, используя различные соотношения между граничным значением постановки эксцентриковой втулки ($M_{ac.1}$) и значением корректируемого втулкой момента ($M_{ac.к}$), можно получить не менее восьми типов графиков функции $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$. С помощью аналитических и графических зависимостей удалось найти единственное решение по определению наибольшего значения $M_{ac.1}$, которое составляет половину значения $M_{ac.к}$. Это позволило получить критерий оценки допустимых изменений $M_{тр}$ в сторону увеличения без превышения $M_{\Sigma max}$. Практическая ценность проведенных исследований была продемонстрирована на примере РА первой и второй ступени РН «Союз-2». Рассчитанный резерв прироста $M_{тр}$ серийной конструкции составил от 0,6 до 0,95 даН · м, что уже способно компенсировать любые зарегистрированные выходы $M_{тр}$ РА ЖРД РД-107А/108А за верхний установленный предел при огневых контрольно-технологических испытаниях. Сам перенос границы $M_{ac.1}$ не требует никакого конструктивного изменения РА и, следовательно, никаких затрат на внедрение и изменение технологии. Однако этим резервы совершенствования существующей методики корректировки M_{Σ} не исчерпываются. В статье [20] не затрагивался анализ величины $M_{ac.к}$ и ее возможной зависимости от области определения функции $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$. Было только заявлено, что данная величина определена разработчиком на этапе проектирования. Необходи-

димо более детальное рассмотрение $M_{ac.к}$ в качестве переменной, так как предварительные оценки показывают возможность оптимизации в том числе и по данному параметру с увеличением диапазона допустимой корректировки $M_{тр}$.

Цель работы – анализ комплексной характеристики, объединяющей $M_{тр}$ и M_{ac} РА, с последующим определением оптимального значения компенсирующего момента $M_{ac.к}$, позволяющего увеличить допускаемый момент трения в узлах качания шарнирных РА при отсутствии дополнительного нагружения рулевых машин двигательных установок.

Необходимо найти универсальную аналитическую зависимость значения компенсирующего момента $M_{ac.к}$ от граничного значения M_{ac} ($M_{ac max}$), при том что M_{ac} выступает в качестве переменного компонента совокупного момента M_{Σ} РА.

Получение аналитической зависимости

Характеристику M_{Σ} удобно рассматривать на примере самого массового в истории отечественного и мирового ракетостроения шарнирного РА ЖРД первой и второй ступени РН типа «Союз». Данная конструкция растрежирована более чем в 22 тысячах экземпляров и продолжает изготавливаться и применяться в настоящее время. Конструктивно данные РА входят в состав двигательных установок, являющихся основой пилотируемых программ отечественной космонавтики. В составе таких РА для регулировки момента применяются два вида втулок, одна из которых осесимметричная (коаксиальная), другая – с фиксированным значением эксцентриситета e . В конструкторской документации назначено пороговое значение момента от асимметрии тяги $M_{ac.1}$, при превышении которой осесимметричная втулка меняется на эксцентриковую. При этом получается новое значение момента от асимметрии, равное алгебраической разности ($M_{ac} - M_{ac.к}$). Компенсируемый втулкой момент находится по зависимости

$$M_{ac.к} = P \cdot e, \quad (1)$$

где P – тяга РА при работе на главной ступени тяги; e – эксцентриситет.

Рассмотрим условную выборку результатов огневых испытаний РА, где каждый агрегат характеризуется своим значением M_{ac} . При этом удобно оперировать максимально допустимым значением момента трения $M_{тр}$, единым для всех РА:

$$M_{тр} = M_{тр max} = const.$$

Проанализируем поведение совокупного момента M_{Σ} при возрастании M_{ac} . Функция $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$ принимает следующий вид:

$$M_{\Sigma} = M_{\text{тр max}} + |M_{\text{ac}}| \text{ при } M_{\text{ac}} \leq M_{\text{ac.1}}; \quad (2)$$

$$M_{\Sigma} = M_{\text{тр max}} + |M_{\text{ac}} - M_{\text{ac.к}}| \text{ при } M_{\text{ac}} > M_{\text{ac.1}}. \quad (3)$$

В работе [20] показано, что наибольший практический интерес представляет случай намеренного перерегулирования параметра $M_{\text{ac.к}}$ при соблюдении неравенства $2M_{\text{ac.1}} > M_{\text{ac.к}} > M_{\text{ac.1}}$. Другие сочетания не являются рациональными и не имеют резерва коррекции. По аналогии с серийными РА условно ограничим область определения функции $M_{\Sigma} = f(M_{\text{ac}})$ удвоенной величиной $M_{\text{ac.1}}$, хотя в дальнейшем будет показано, что данное ограничение не является обязательным. На рис. 1 представлен графический вид функции в соответствии с выражениями (2) и (3). Появление нисходящего участка графика связано с последовательным уменьшением слагаемого в выражении (3) внутри области определения функции $[M_{\text{ac.1}}; M_{\text{ac.к}}]$ до нуля. Важно отметить, что на нисходящих/восходящих участках графика производная функции равна ± 1 (изменение аргумента равно изменению функции).

Скачкообразное изменение функции при $M_{\text{ac}} = M_{\text{ac.1}}$ объясняется неравенством выражений (2) и (3) в окрестности точки $M_{\text{ac.1}}$. Действительно, в данном случае выражение (2) принимает вид

$$M_{\Sigma} = M_{\text{тр max}} + |M_{\text{ac.1}}|.$$

Выражение (3) предстанет в виде

$$M_{\Sigma} = M_{\text{тр max}} + |M_{\text{ac.1}} - M_{\text{ac.к}}|.$$

При действии ранее введенного ограничения $2M_{\text{ac.1}} > M_{\text{ac.к}} > M_{\text{ac.1}}$ очевидно неравенство $|M_{\text{ac.1}}| > |M_{\text{ac.1}} - M_{\text{ac.к}}|$. Поэтому в окрестности

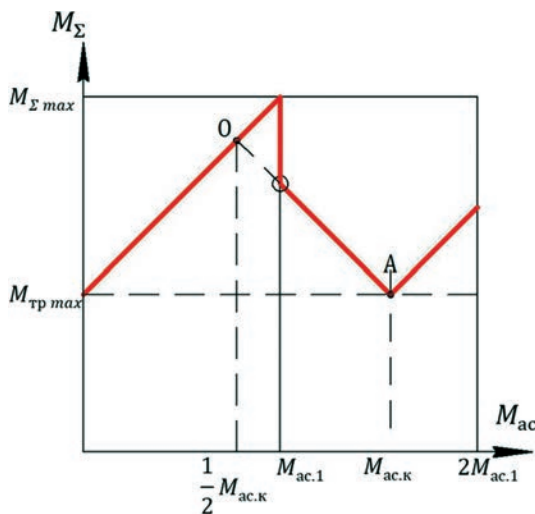


Рис. 1. Характеристика совокупного момента M_{Σ} при компенсирующем моменте $M_{\text{ac.к}} > M_{\text{ac.1}}$

аргумента $M_{\text{ac}} = M_{\text{ac.1}}$ реализуется нисходящий вертикальный скачок.

Если назначить

$$M_{\text{ac.1}} = \frac{1}{2} M_{\text{ac.к}}, \quad (4)$$

вертикального скачкообразного изменения функции при постановке эксцентриковой втулки не произойдет. Действительно, выражение (2) в данном случае примет вид

$$M_{\Sigma} = M_{\text{тр max}} + \left| \frac{1}{2} M_{\text{ac.к}} \right|.$$

Выражение (3) после несложного преобразования примет аналогичную форму:

$$\begin{aligned} M_{\Sigma} &= M_{\text{тр max}} + \left| \frac{1}{2} M_{\text{ac.к}} - M_{\text{ac.к}} \right| = \\ &= M_{\text{тр max}} + \left| -\frac{1}{2} M_{\text{ac.к}} \right| = M_{\text{тр max}} + \left| \frac{1}{2} M_{\text{ac.к}} \right|. \end{aligned}$$

Численное равенство выражений (3) и (2) исключает вертикальный скачок. В таком случае в точке O (рис. 2) реализуется перегиб функции с изменением знака производной, однако нисходящая ветвь графика по-прежнему приходит в точку A . В работе [20] графически было показано, что возможный прирост Δ параметра $M_{\text{тр max}}$ любого шарнирного РА определяется выражением

$$\Delta = M_{\text{ac.1}} - \frac{1}{2} M_{\text{ac.к}}. \quad (5)$$

Зависимость (4) указывает нам наиболее оптимальную границу постановки эксцентриковой втулки.

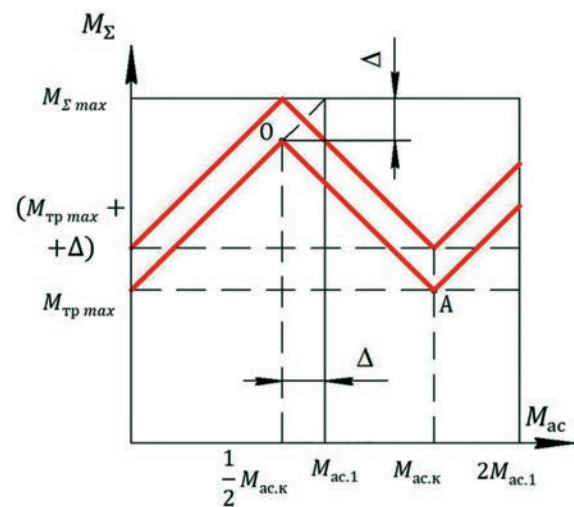


Рис. 2. Графический способ определения допустимого прироста $M_{\text{тр max}}$ в случае смещения границы постановки эксцентриковой втулки к значению $M_{\text{ac.к}}/2$

Рассмотрим верхний график функции $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$, представленный на рис. 2. Он получен вертикальным смещением графика без вертикального скачка к величине $M_{\Sigma max}$. Данный смещенный график также не является оптимальным, так как на границе области определения $M_{\Sigma max}$ не достигается. Это означает, что у РА есть определенный резерв по суммарному моменту и, с точки зрения энергетических возможностей РМ, его еще можно использовать. Однако при этом будет превышение допустимой границы момента от асимметрии тяги, которое директивно ограничено разработчиком во избежание ухудшения гидравлических характеристик и снижения прочности РА.

Для упрощения дальнейших рассуждений обозначим границу области определения функции $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$ величиной $M_{ac max}$.

Простейшее решение по оптимизации способа регулирования суммарного момента непосредственно вытекает из рис. 2. Необходимо такое последующее смещение графика, чтобы на границе области определения ($M_{ac} = M_{ac max}$) функция достигала разрешенного максимума ($M_{\Sigma} = M_{\Sigma max}$). Верхняя точка перегиба также должна остаться на разрешенном максимуме. Этого можно добиться, если принять:

$$M_{ac.1} = \frac{1}{3} M_{ac max}; \tag{6}$$

$$M_{ac.к} = \frac{2}{3} M_{ac max}. \tag{7}$$

Указанные соотношения легко доказываются, исходя из геометрического равенства трех прямоугольных треугольников, представленных на рис. 3.

Таким образом, вновь предложенный способ оптимизации по сути представляет собой горизон-

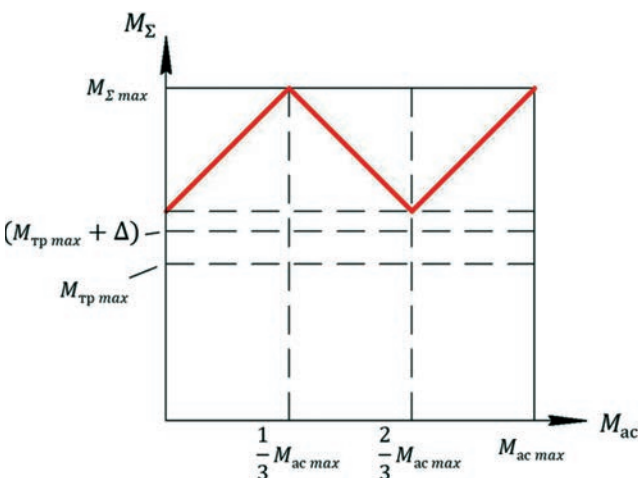


Рис. 3. Оптимальный вид функции $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$, достигающей максимума на границе области определения

тальный сдвиг графика в единственное предельное положение, когда $M_{ac max}$ соответствует $M_{\Sigma} = M_{\Sigma max}$. Необходимо отметить, что найденное в работе [20] соотношение (4) по-прежнему выполняется.

Иные способы регулирования с другими соотношениями $M_{ac.к}$, $M_{ac.1}$ и $M_{ac max}$ такими достоинствами не обладают. В работе [20] однозначно определен допустимый прирост момента трения Δ при условии оптимального положения $M_{ac.1}$, заданного выражением (4). В развитие темы найдем дополнительный допустимый прирост момента трения Δ_1 в случае, если совокупная моментная характеристика будет соответствовать рис. 3. Решение может быть найдено графически, если совместить график рис. 3 с верхним графиком рис. 2. Данное совмещение представлено на рис. 4.

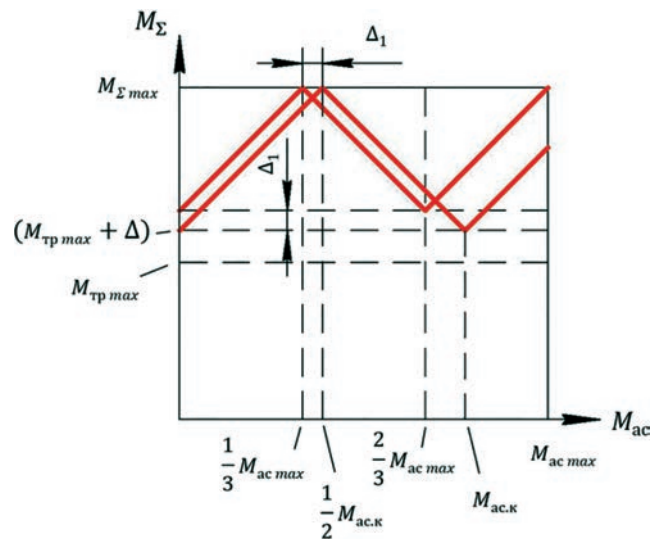


Рис. 4. Графический способ определения дополнительного прироста $M_{tr max}$ в случае смещения значения корректируемого момента $M_{ac.к}$ к значению $2M_{ac max}/3$

Из равенства катетов прямоугольного треугольника следует, что

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} M_{ac.к} - \frac{1}{3} M_{ac max}. \tag{8}$$

Суммируя выражения (5) и (8), получаем максимальный теоретический прирост момента трения Δ_{Σ} шарнирного РА, у которого граница постановки эксцентриковых втулок и регулируемый втулками момент отличны от соотношений (6) и (7):

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta + \Delta_1 = \left(M_{ac.1} - \frac{1}{2} M_{ac.к} \right) + \left(\frac{1}{2} M_{ac.к} - \frac{1}{3} M_{ac max} \right);$$

$$\Delta_{\Sigma} = M_{ac.1} - \frac{1}{3} M_{ac.max} \tag{9}$$

Выражение (9) легко представить графически, если совместить функции $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$ рис. 1 и рис. 3. Данное совмещение представлено на рис. 5.

Выражение (9) позволяет оценить величину возможной корректировки характеристики $M_{тр max}$ в сторону максимального увеличения без ущерба для рулевой машины РА и системы управления РН в целом. Очевидно, что это выполнимо для уже существующих конструкций РА с ранее назначенным параметром $M_{ac.1}$. С учетом зависимостей (1) и (7) оптимальный эксцентриситет регулировочных втулок определяется выражением

$$e = \frac{2M_{ac.max}}{3P} \tag{10}$$

Выводы

Получены аналитические зависимости, позволяющие осуществлять предельную программу регулирования суммарной моментной характеристики шарнирного РА. В дополнение к предшествующим наработкам показано, что область определения функции вида $M_{\Sigma} = f(M_{ac})$ может являться независимым параметром, однозначно определяющим границу постановки эксцентриковых втулок, корректируемый момент и оптимальное значение эксцентриситета. Для серийных конструкций получен критерий теоретической оценки максимально допустимого увеличения $M_{тр}$. Выявленный резерв повышения $M_{тр}$ также может быть использован для расширения технологических допусков замеряемых

при огневых испытаниях моментных характеристик, что в настоящее время является одним из «узких» мест серийных РА ЖРД РД-107А/108А. Вновь разработанная методика позволила установить, что при оптимальном выборе $M_{ac.1}$ и $M_{ac.k}$ допустимое значение прироста (Δ_{Σ}) $M_{тр}$ для данных РА равно 1 даН·м. Этот прирост составляет в 40% от серийного максимума. Для его получения не требуется значительных технологических затрат, так как корректировке подлежит единственный линейный размер в регулировочных втулках. Предложенный метод позволяет полностью устранить проблему превышения $M_{тр}$ серийной конструкции, которая с разной степенью интенсивности проявлялась на протяжении последних десятилетий.

Список источников

1. Сеницин А.П., Гоца Д.А., Румянцев А.В. Тепловой расчет жидкостного ракетного двигателя малой тяги на экологически безопасном монотопливе // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 109–116.
2. Воробьева С.С., Воробьев А.Г. Анализ теплового состояния камеры сгорания ракетного двигателя малой тяги с внутренним завесным охлаждением // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 45–54.
3. Агеев Ю.И., Гальперин Р.Н., Ивашин Ю.С. и др. Исследование влияния теплового потока от маршевого ЖРД на параметры управляющих ЖРДМТ в условиях двигательной установки перспективного разгонного блока // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 3–3(34). С. 251–259.
4. Воробьев А.Г., Воробьева С.С. Численное исследование пограничного слоя жидкостного ракетного двигателя малой тяги // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 49–56.
5. Шустов С.А. Численная модель влияния вязкости на течение в соплах ракетных двигателей малой тяги в приближении ламинарного пограничного слоя со скольжением скорости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. 2009. № 1(17). С. 79–89.
6. Максимов А.Д., Шустов С.А. Об эффективности использования приближения Навье–Стокса в термодинамическом расчете жидкостных ракетных двигателей малой тяги при низких числах Рейнольдса // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 1. С. 67–80. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-67-80
7. Володин В.А., Ткаченко Ю.Н. Конструкция и проектирование ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.

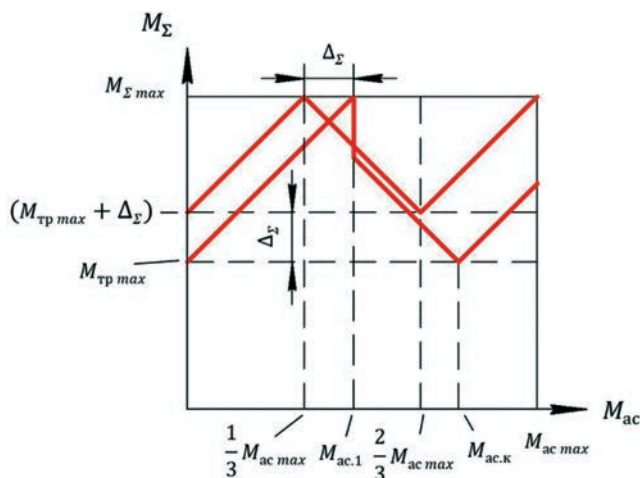


Рис. 5. Графический способ определения максимального прироста $M_{тр max}$ в случае одновременной оптимизации $M_{ac.1}$ и $M_{ac.k}$

8. Пичугин Д.В. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие. — Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1990. — 224 с.
9. Фалалеев С.В. Методика расчета гидродинамических характеристик торцового уплотнения с сложной формой зазора // Трение и износ. 2015. Т. 36. №2. С. 230–237.
10. Wei L., Zhang P., Lui Q. et al. Influencing Factors Analysis and Experiments of Friction Coefficient between the End Faces for Contact Mechanical Seals // Tribology. 2016. Vol. 36. No. 3, pp. 354–361. DOI: 10.16078/j.tribology.2016.03.013
11. Балякин В.Б., Лаврин А.В., Оссиала В.Б. Методика определения момента трения в торцевом мембранном уплотнении // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 1. С. 62–67.
12. Yu X., Liu M., Wang Z. et al. Experimental Investigation on Friction Performance of Mechanical Seals with a Laser-Textured Seal Face // Materials Science Forum. 2006. Vols. 532–533, pp. 81–84. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.81
13. Feihong Y., Wang L., Yao S. et al. Analytical and Experimental Study on Sealing Contact Characteristics of Subsea Collet Connectors // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9. No. 4 :168781401770170. DOI: 10.1177/1687814017701702
14. Королев А.А., Королев А.В. Влияние геометрических параметров рабочих поверхностей шарикоподшипника на его работоспособность // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 2. С. 244–248.
15. Королев А.В., Королев А.А. Экспериментальное исследование влияния геометрии контакта тел и дорожек качения шариковых подшипников на момент трения качения // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 2. С. 156–161.
16. Балякин В.Б., Жильников Е.П., Косенок Б.Б., Лаврин А.В. Исследование влияния перекоса колец подшипника качения на момент трения и долговечность опор // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 6. С. 693–698.
17. Силаев Б.М., Даниленко П.А. Метод расчета высокоскоростной опоры качения двигателей летательных аппаратов с учетом изнашивания // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 4. С. 453–460.
18. Жильников Е.П., Балякин В.Б., Лаврин А.В. Методика расчета момента трения в радиально-упорных бессепараторных подшипниках // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 5. С. 507–513.
19. Зубко А.И., Лукин В.А., Герман Г.К. Разработка мероприятий по уменьшению сил сопротивления при работе подшипников качения // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 125–137. DOI: 10.34759/vst-2022-4-125-137
20. Балякин В.Б., Лаврин А.В. Методика повышения допустимого момента трения рулевых агрегатов ЖРД // Трение и износ. 2021. Т. 42. № 3. С. 329–337.

References

1. Sinitzin A.P., Goza D.A., Romyantsev A.V. Thermal calculations of liquid low thruster on pollution-safe fuel. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no 2, pp. 109–116.
2. Vorob'eva S.S. Low-thrust rocket engine with internal boundary cooling combustion chamber thermal state analysis. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no 4, pp. 45–54.
3. Ageenko Yu.I., Gal'perin R.N., Ivashin Yu.S. et al. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2012, no. 3–3(34), pp. 251–259.
4. Vorob'eva S.S. Liquid low-thrust rocket engine boundary layer numerical study. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no 1, pp. 49–56.
5. Shustov S.A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva*, 2009, no. 1(17), pp. 79–89.
6. Maksimov A.D., Shustov S.A. On the efficiency of using the Navier–Stokes approximation in thermogasdynamics calculation of low-thrust liquid-propellant rocket engines at low Reynolds numbers. *Vestnik of Samara University Aerospace and Mechanical Engineering*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 67–80
7. Volodin V.A., Tkachenko Yu.N. *Konstruktsiya i proektirovanie raketnykh dvigatelei* (Rocket engines structure and designing), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 272 p.
8. Pichugin D.V. *Konstruktsiya i proektirovanie dvigatelei letatel'nykh apparatov* (Aircraft engines structure and designing), Kuibyshev, KuAI, 1990, 224 p.
9. Falaleev S.V. *Trenie i iznos*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 230–237.
10. Wei L., Zhang P., Lui Q. et al. Influencing Factors Analysis and Experiments of Friction Coefficient between the End Faces for Contact Mechanical Seals. *Tribology*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 354–361. DOI: 10.16078/j.tribology.2016.03.013
11. Balyakin V.B., Lavrin A.V., Ossiala V.B. *Trenie i iznos*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 62–67.
12. Yu X., Liu M., Wang Z. et al. Experimental Investigation on Friction Performance of Mechanical Seals with a Laser-Textured Seal Face. *Materials Science Forum*, 2006, vols. 532–533, pp. 81–84. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.81
13. Feihong Y., Wang L., Yao S. et al. Analytical and Experimental Study on Sealing Contact Characteristics of Subsea Collet Connectors. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 4 :168781401770170. DOI: 10.1177/1687814017701702
14. Korolev A.A. Korolev A.V. *Trenie i iznos*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 244–248.
15. Korolev A.V. Korolev A.A. *Trenie i iznos*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 156–161.
16. Balyakin V.B., Zhil'nikov E.P., Kosenok B.B., Lavrin A.V. *Trenie i iznos*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 693–698.
17. Silaev B.M., Danilenko P.A. *Trenie i iznos*, 2015, vol. 36, no. 4, pp. 453–460.

-
18. Zhil'nikov E.P., Balyakin V.B., Lavrin A.V. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 5, pp. 507-513.
19. Zubko A.I., Lukin V.A., German G.K. Development of measures for resisting forces reduction while roller bearings operation. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no 4, pp. 125-137. DOI: 10.34759/vst-2022-4-125-137
20. Balyakin V.B., Lavrin A.V. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 329-337.

Статья поступила в редакцию 30.04.2023; одобрена после рецензирования 30.06.2023; принята к публикации 30.06.2023.

The article was submitted on 30.04.2023; approved after reviewing on 30.06.2023; accepted for publication on 30.06.2023.