

Анализ и моделирование штатных и нештатных нагрузок и воздействий на агрегаты стартовой системы для РКН семейства «Союз»

09, сентябрь 2014

Зверев В. А., Ломакин В. В.

УДК: 629.7.085

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

zverev_vadim@mail.ru

Модернизации ракет космического назначения (РКН) семейства «Союз» требует определенных изменений в агрегатах и элементах стартовой системы (СС) (рис.1), что в свою очередь предполагает проведение расчетного анализа агрегатов СС с целью получения оценки их общей прочности и жесткости. Одной из основных задач такого анализа является моделирование штатных и нештатных нагрузок и воздействий на агрегаты СС.

В различные моменты своего функционирования на этапах подготовки к пуску и пуска РКН агрегаты СС испытывают различные нагружения и воздействия. Среди этих различных комбинаций нагружений соответствующих определенному функциональному состоянию СС можно выделить основные штатные и нештатные случаи.

Штатные случаи нагружения:

Предстартовая подготовка РКН (стоянка заправленной РКН) – каждый агрегат испытывает нагрузки от собственного веса, от веса контактирующих с ним агрегатов СС и РКН. Все агрегаты за исключением устройств направляющих (УН), нижних кабельных мачт (НКМ) и опорного кольца (ОК) испытывают ветровое воздействие. Все агрегаты за исключением кабель-заправочной мачты (КЗМ) и верхней кабельной мачты (ВКМ) дополнительно испытывают (напрямую или опосредовано) силы со стороны РКН, вызванные действием ветра на РКН.

Отвод подвижных частей агрегатов СС - КЗМ, ВКМ, несущих стрел (НС), секторов силового пояса (ССП), опорных ферм (ОФ), УН, НКМ испытывают нагрузки от собственного веса и инерционные нагрузки, вызванные разгоном и торможением при их отводе. Все отводимые агрегаты за исключением УН и НКМ испытывают так же ветровое воздействие.

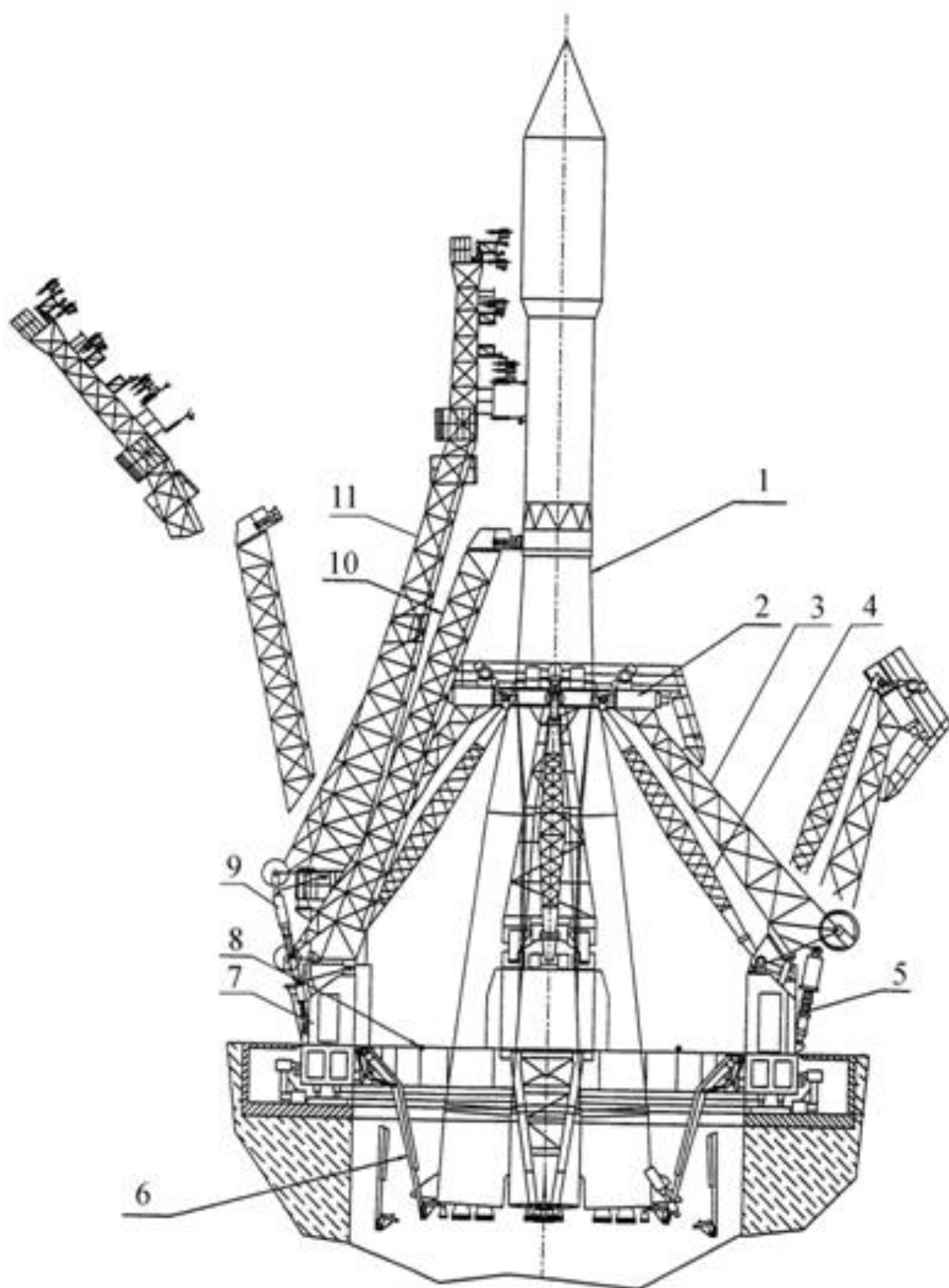


Рис. 1. Агрегаты стартовой системы для РКН «Союз» (1 – РКН, 2 – сектор силового пояса, 3 – опорная ферма, 4 – несущая стрела, 5 – гидробуферы торможения опорных ферм, 6 – устройство направляющие, 7 – основания опорных ферм, 8 – опорное кольцо, 9 – гидробуферы торможения кабель-заправочной мачты, 10 – верхняя кабель-мачта, 11 – кабель-заправочная мачта)

Старт РКН - каждый агрегат испытывает нагрузки от собственного веса, от веса контактирующих с ним агрегатов СС и нагрузки, вызванные действием газодинамической струи ДУ РКН.

Межпусковой период - каждый агрегат испытывает нагрузки от собственного веса, от веса контактирующих с ним агрегатов СС. Все агрегаты за исключением УН, НКМ и ОК могут испытывать предельное ветровое воздействие.

Нештатные случаи нагружения:

Случай «ножевого нагружения» - при стоянке заправленного РКН, ее вес в основном приходится только на две из четырех НС.

Случай аварийного выключения двигательной установки РКН (АВДУ РКН) - при нештатном режиме работы ДУ РКН (разнотяг, невыход на режим) на предварительной ступени тяги и выдаче команды на АВДУ РКН опорные агрегаты СС подвергаются динамическому нагружению со стороны РКН.

Случай старта РКН при нештатной работе ДУ - при разнотяге двигателей РКН, невыходе одно или нескольких из них на номинальную тягу появляется дополнительное боковое воздействие на опорные агрегаты СС со стороны РКН.

Согласно приведенным выше основным случаям штатного и нештатного нагружения агрегатов СС в процессе подготовки к пуску и пуска РКН необходимо рассмотреть определение и моделирование следующих видов нагрузок и воздействий, действующих на СС и РКН:

- Весовые нагрузки;
- Ветровые нагрузки;
- Нагрузки, вызванные действием струй ДУ РКН;
- Инерционные нагрузки, вызванные разгоном и торможением отводимых элементов агрегатов СС;
- Сила тяги РКН при штатной и нештатной работе ДУ.

Для расчетного анализа агрегатов СС РКН семейства «Союз» предпочтительно использовать метод конечных элементов (МКЭ) [1]. Принципы МКЭ требуют соответствующего моделирование нагрузок, действующих на агрегат (систему агрегатов СС). Удобно представлять нагрузки приведенными к узлам конечноэлементных моделей агрегатов СС.

Задача моделирования весового нагружения сводится к определению соответствующих узловых масс конечноэлементных моделей. Узловые массы моделей агрегата СС (системы агрегатов СС, системы «СС-РКН») формируются из масс всех конечных элементов модели и дополнительных сосредоточенных масс. Масса каждого конечного элемента рассчитывается по его характеристикам, а затем распределяется по узлам конечного элемента. Полная масса в узле модели является суммой узловых масс всех конечных элементов, сходящихся в этом узле, и дополнительной сосредоточенной массы. Полный вектор весовой нагрузки $\{G\}$ определяется следующим образом:

$$\{G\}=\{m\}\cdot g,$$

где $\{m\}$ – вектор составленный из узловых масс физической модели агрегата СС;
 g - ускорение свободного падения.

Полная ветровая нагрузка на узел модели является суммой узловых ветровых нагрузок всех КЭ, сходящихся в этом узле.

Согласно [2] полная ветровые нагрузки, действующие на j -ый КЭ модели, определяются суммой статической и динамической составляющих:

$$P_j = P_{ст,j} + P_{дин,j}$$

Статическая ветровая нагрузка $P_{ст,j}$ определяется аэродинамическим силовым воздействием, вызванным осредненным ветровым потоком. Динамическая ветровая нагрузка $P_{дин,j}$ определяется переменным во времени нагружением, обусловленным порывами ветрового потока с периодом меньше двух минут и инерционными силами от вынужденных колебаний модели, вызванных этими колебаниями.

В упрощенном виде полная ветровая нагрузка на КЭ модели агрегата СС рассчитывается по формуле [2]:

$$P_j = P_{ст,j} \cdot \kappa_{дин,j},$$

где $\kappa_{дин,j}$ - коэффициент динамичности нагрузки для j -ый КЭ.

Приведенные узловые нагрузки от ветрового воздействия можно определить в виде векторов ветровой нагрузки $\{P_{\epsilon}\}_{cmj}$ для соответствующих обобщенных координат j -ого стержневого КЭ в следующем виде [2,] [3]:

$$\{P_{\epsilon}\}_{cmj} = C_{ja} \cdot \kappa_{дин,j} \cdot k_j \cdot \frac{L_j}{2} \cdot \int_{-1}^1 D_j(t) \cdot q_p(t) \cdot \{\varphi_j(t)\} dt, \quad (1)$$

где C_{ja} – аэродинамический коэффициент КЭ;

k_j – коэффициент увеличения скоростного напора ветра по высоте;

$\kappa_{дин,j}$ – коэффициент динамичности ветровой нагрузки;

t – безразмерная координата;

$D(t)_j$ – функция максимального размера сечения j -ого стержневого КЭ в направлении, перпендикулярном скорости ветра;

L_j – длина j -ого стержневого КЭ;

$q_p(t)$ – функция расчетного скоростного напора;

$\{\varphi_j(t)\}$ – вектор функций форм j -ого стержневого КЭ.

Для пластинчатого КЭ векторы ветровой нагрузки $\{P_{\epsilon}\}_{nlj}$ можно определить следующим образом:

$$\{P_{\epsilon}\}_{nlj} = C_{ja} \cdot \kappa_{дин,j} \cdot k_j \cdot \iint_{\Omega} q_p(\xi, \eta) \cdot \{\varphi_j(\xi, \eta)\} \cdot |J| d\xi d\eta, \quad (2)$$

где ξ, η - естественные координаты пластинчатого КЭ (использование естественных координат как для скоростного напора, так и для функций форм КЭ, позволяет существенно ускорить вычисление определенного интеграла по поверхности с помощью квадратур Гаусса);

$|J|$ - якобиан преобразования системы координат;

Ω - часть поверхности КЭ, на которую действует скоростной напор (давление).

При старте РКН конструкции агрегатов СС испытывают комбинированное температурно-силовое нагружение, вызванное скоростным напором и температурой струй ДУ РКН. Моделирование данного нагружения при конечноэлементной идеализации агрегатов СС требует решения следующих задач:

- Определение узловых сил модели агрегата СС (системы агрегатов СС), вызванных скоростным напором струй ДУ РКН;
- Определение узловых температур модели агрегата СС (системы агрегатов СС);
- Определение узловых нагрузок модели агрегата СС (системы агрегатов СС), эквивалентных температурному нагружению, вызванному температурным воздействием струй ДУ РКН.

Опыт показывает, что параметры воздействия, вызванное скоростным напором струй ДУ РКН, так же как воздействие скоростного напора ветра можно определять согласно рекомендаций, приведенных в [2]. Вектор нагрузки, вызванной воздействием скоростного напором струй ДУ РКН, $\{P_{zd}\}_{cmj}$ для соответствующих обобщенных координат j -ого стержневого КЭ модели агрегата СС можно определить по аналогии с формулой (1) в следующем виде:

$$\{P_{zd}\}_{cmj} = C_{ja} \cdot k_{zd,дин,j} \cdot k_j \cdot \frac{L_j}{2} \cdot \int_{-1}^1 D_j(t) \cdot q_{zd,pj}(t) \cdot \{\varphi_j(t)\} dt, \quad (3)$$

где $k_{zd,дин,j}$ – коэффициент динамичности газодинамической нагрузки,

$q_{zd,pj}(t)$ - функция расчетного скоростного напора струи ДУ РКН на j -ый стержневой КЭ.

По аналогии с зависимостью (2) для пластинчатого КЭ вектор нагрузки, вызванной воздействием скоростного напором струй ДУ РКН, $\{P_{zd}\}_{nlj}$, можно определить следующим образом:

$$\{P_{zd}\}_{nlj} = C_{ja} \cdot k_{zd,дин,j} \cdot k_j \cdot \iint_{\Omega} q_{zd,pj}(\xi, \eta) \cdot \{\varphi_j(\xi, \eta)\} \cdot |J| d\xi d\eta, \quad (4)$$

Узловые температуры в конечноэлементных моделях агрегатов СС может быть определено из уравнений теплового баланса. Так для тонкостенных стержневых КЭ узловые температуры можно определить из следующего уравнения:

$$\frac{dT_i}{d\tau} = \frac{U}{F \cdot \rho \cdot C_p} \cdot q_i, \quad (5)$$

где T_i – температура i -го узла;

τ – время;

U – периметр сечения стержневого элемента;

F – площадь его сечения;

ρ – плотность материала стержневого элемента;

C_p – удельная изобарная теплоемкость материала стержневого элемента;

q – плотность теплового потока на поверхности КЭ.

Силовое воздействие, вызванное температурными деформациями элементов конструкций, формируется путем введения в конечноэлементную модель агрегата СК эквивалентных фиктивных сил [4], [5], действующих по осям стержней и в плоскости пластин.

Вектор инерционной нагрузки действующей на отводимый элемент агрегата СК при его конечноэлементном моделировании определялся в виде [6]:

$$\{P\}_{ин} = (\{m_{ом}\} \cdot \{y\} + \{m_{ом}\} \cdot \{x\}) \cdot (\varepsilon + \omega^2), \quad (6)$$

где $\{m_{ом}\}$ – вектор, составленный из узловых масс модели отводимого элемента агрегата СК,

ε – угловое ускорение вращения,

ω – угловая скорость вращения,

$\{x\}, \{y\}$ – векторы, составленные из соответствующих декартовых координат узлов модели подвижного элемента агрегата СК.

Несмотря на то, что многие из рассматриваемых нагрузок, действующих на агрегаты СК, можно моделировать, используя их статическое или квазидинамическое представление, все же возникает необходимость в моделирование переменных во времени внешних сил.

Для произвольно меняющейся во времени нагрузки вектор узловых сил, действующих на конечноэлементную модель можно представить в виде [7]:

$$\{Q(t)\} = \sum (\{Q_j\} \cdot u_j(t)), \quad (7)$$

где $\{Q_j\}$ – вектор компонент j -ого фиксированного варианта распределения нагрузок;

$u_j(t)$ – скалярная функция времени, в соответствии с величиной которой пропорционально изменяются все компоненты вектора $\{Q_j\}$.

Общая тяга ДУ РКН семейства «Союз» при старте складывается из тяги центрального блока и 4-ёх боковых блоков. Учитывая зависимость (7), вектор узловых нагрузок, вызванных тягой ДУ РКН, $\{Q(t)\}$, можно записать следующим образом:

$$\{P_{тяг}(t)\} = \left\{ \begin{array}{l} \{P_{ББ1}\} \cdot u_{ББ1}(t) \\ \{P_{ББ2}\} \cdot u_{ББ2}(t) \\ \{P_{ББ3}\} \cdot u_{ББ3}(t) \\ \{P_{ББ4}\} \cdot u_{ББ4}(t) \\ \{P_{ЦБ}\} \cdot u_{ЦБ}(t) \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где $\{P_{ББ1}\}, \{P_{ББ2}\}, \{P_{ББ3}\}, \{P_{ББ4}\}, \{P_{ЦБ}\}$ – векторы компонентов распределения вдоль направлений обобщенных координат моделей агрегата СС или РКН тяги ДУ соответственно первого, второго, третьего, четвертого боковых и центрального блоков;

$u_{ББ1}(t), u_{ББ2}(t), u_{ББ3}(t), u_{ББ4}(t), u_{ЦБ}(t)$ – функция изменения по времени тяги ДУ соответственно первого, второго, третьего, четвертого боковых и центрального блоков РКН.

Функцию набора тяги ДУ каждого из блоков РКН в штатном режиме качественно можно представить графиком изображенным на рис. 2. На рис. 3 и рис. 4 представлены графики изменения тяги ДУ боковых блоков РКН при нештатных режимах разнотяга двигателей и их аварийного выключения соответственно.

Предложенное выше моделирование охватывает большинство штатных и нештатных нагрузок действующих на агрегаты СС для РКН семейства «Союз» при подготовке к пуску и пуску РКН. Данное моделирование использовалось при прочностных расчетах агрегатов СС для РКН семейства «Союз» на космодроме Куру, Плесецк, «Восточный».

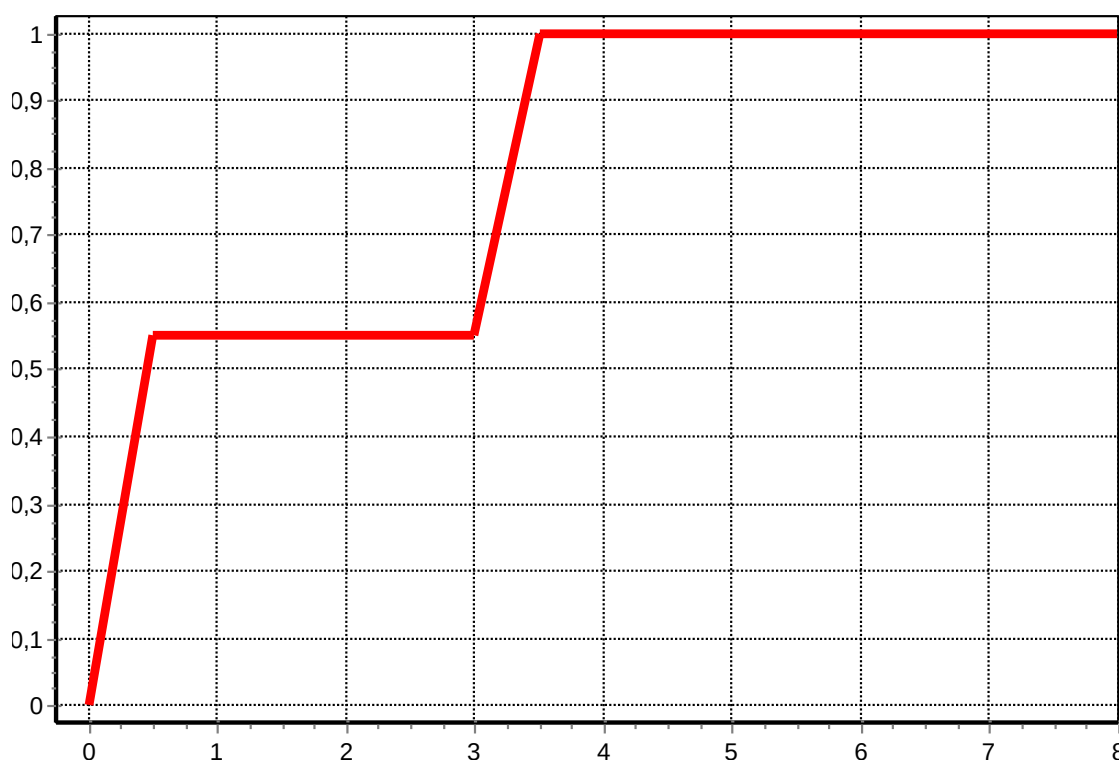


Рис. 2. График набора тяги ДУ блока РКН в штатном режиме

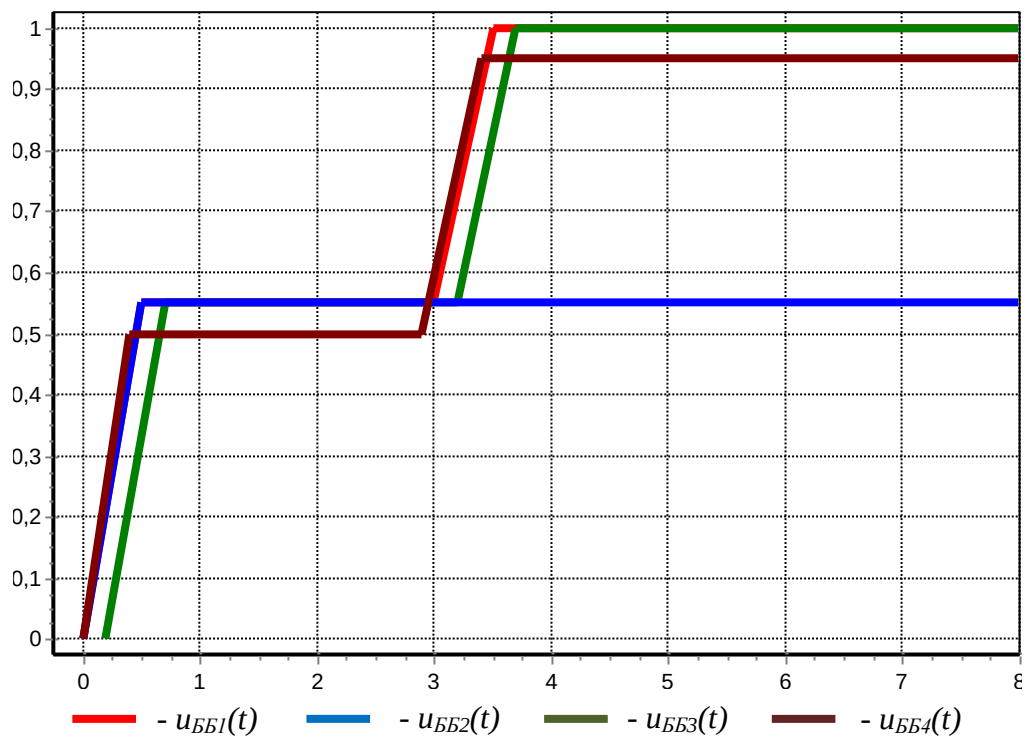


Рис. 3. Графики набора тяги ДУ боковых блоков РКН в нештатном режиме «разнотяга»

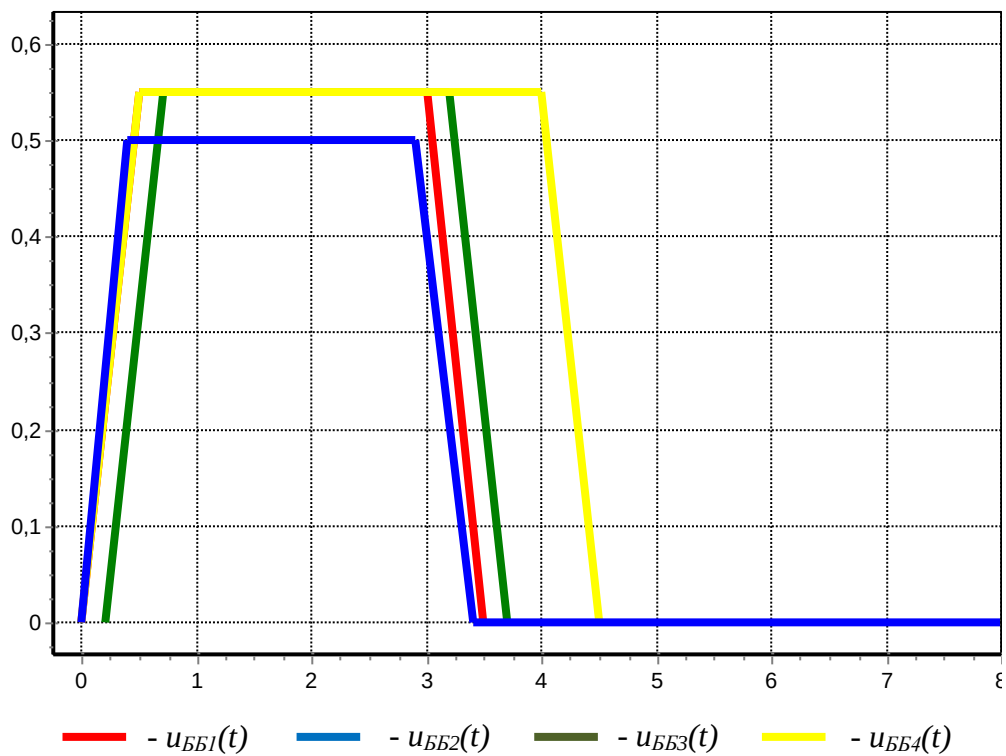


Рис. 4. Графики набора тяги ДУ боковых блоков РКН в нештатном режиме АВДУ

Список литературы

1. Батэ К., Вилсон Е., Численные методы анализа и метод конечных элементов. –М.: Изд-во «Озон», 2012. – 445 с.
2. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения /Под общей ред. А.В. Перельмутера. – 4-е изд., переаб. – М.: издательство СКАД СОФТ, издательство АСВ, издательство ДМК Пресс, 2014.- 596 стр.
3. Зверев В.А., Ломакин В.В., Языков А.В. Расчет нагрузок на ферменные конструкции агрегатов стартового комплекса при газодинамическом и ветровом воздействии. Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2013, № 03. DOI: 10.7463/0313.0541205.
4. Игрицкий В.А., Чугунков В.В., Языков А.В. Методика прогнозирования температур и температурных напряжений в элементах конструкций стартового оборудования при газодинамическом воздействии струй двигателей стартующей ракеты. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2010, спец. вып. 1, с. 53-60
5. Игрицкий В.А., Хлыбов В.Ф., Языков А.В. Расчетный анализ прочности элементов ферменных конструкций наземного оборудования при интенсивном воздействии высокотемпературной струи. Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2012, № 02.
6. Зверев В.А., Украинский А.Ю. Исследование динамики отвода конструкций стартового оборудования ракеты-носителя «Союз» при использовании различных вариантов гидробуферов торможения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2010, спец. вып. 1, с. 61-66.
7. Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю., Чугунков А.Ю., Языков А. В. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века. Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения: 75 лет факультету «Специальное машиностроение»: сб. ст./ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ ти. Н.Э. Баумана; 2013. – с. 215-227.