



РОСКОСМОС

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ И УГЛОВЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

63-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МФТИ



Инженер-математик ПАО РКК «Энергия» Тырнов П.А.
petrtyrnov1@rsce.ru

23.11.2020

Цели:

- разработать алгоритм управления включениями двигателей причаливания и ориентации
- исследовать алгоритм на возможность использования для динамического контроля

Актуальность работы:

- предложенный метод имеет преимущества перед применяемыми в текущее время – меньший расход топлива, большая точность управления
- нет полнофункциональных зарубежных аналогов – управление только по 3 степеням свободы

Этапы презентации:

1. Текущие варианты решения задачи управления включениями двигателей
2. Алгоритм на основе метода наименьших квадратов и его преимущества
3. Перспективы развития и возможности дальнейшего применения

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА



R – координаты КА

V – линейная скорость центра масс

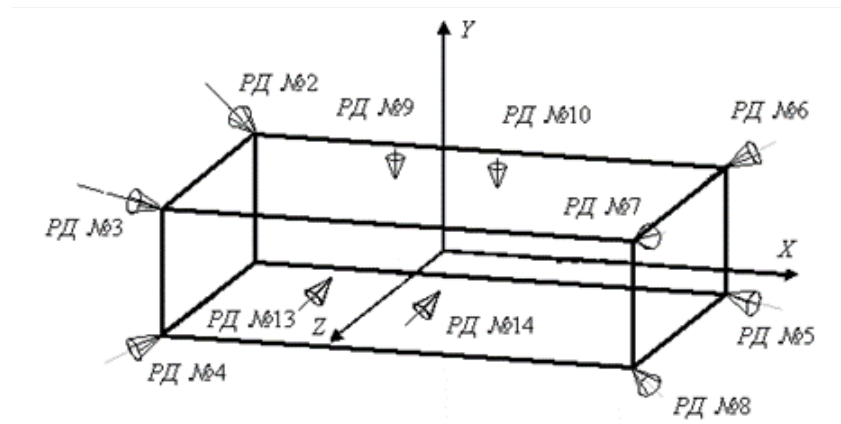
ϕ – ориентация центра масс КА (кватернион, углы Крылова)

ω – угловая скорость вращения КА

dv – требуемое изменение линейной скорости ЦМ

$d\omega$ – требуемое изменение угловой скорости вращения относительно ЦМ

t_1, t_i, t_n – длительность включения 1, i , n -го двигателя



Пример схемы расположения двигателей космического аппарата (декартово управление)

Метод каталогов:

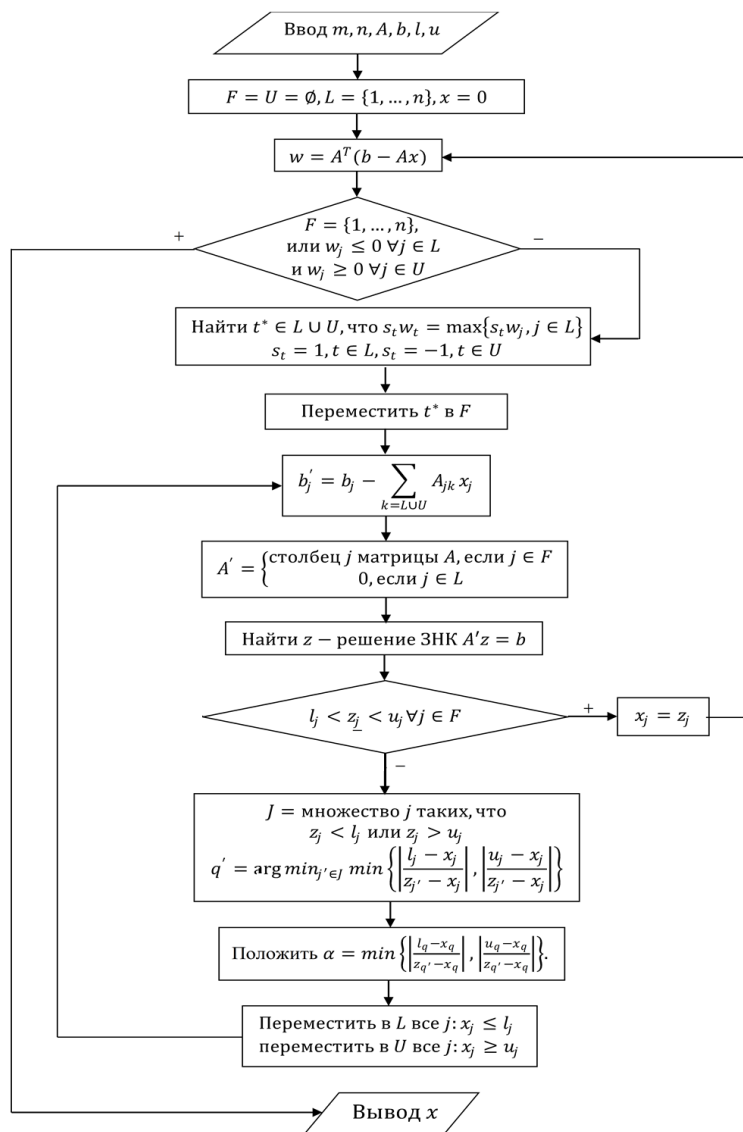
1. Надежность и длительный опыт использования
2. Относительно прост в разработке
3. Неадаптируемый в реальном времени к изменениям конфигурации двигательной установки
4. Неоптимален по расходу топлива, точности управления

Линейное программирование (симплекс-метод):

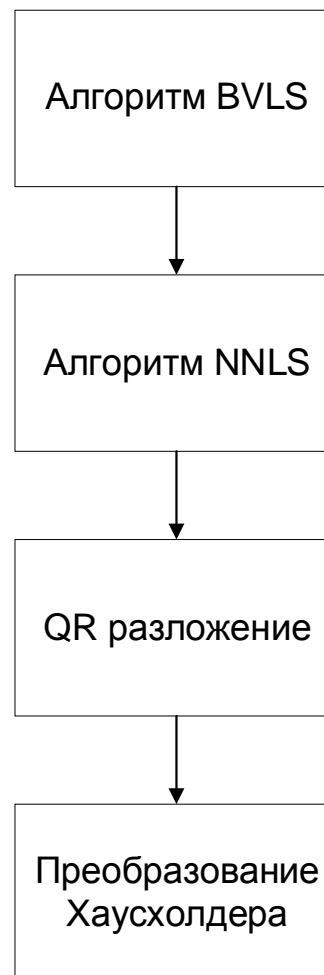
1. Получение оптимального решения по расходу топлива с высокой точностью отработки управляющих воздействий
2. Возможность вносить изменения в конфигурацию ДУ в реальном времени
3. Большая сложность разработки
4. Вычислительная сложность, невозможность использования для управления в реальном времени для задач с большим количеством степеней свободы
5. Как следствие – при текущей вычислительной мощности ЦВМ невозможно использовать для управления больше, чем по 3 степеням свободы – необходимость комбинировать с другими методами (методом каталогов)

Метод наименьших квадратов – компромиссное решение

АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ПЕРЕМЕННЫЕ



Блок-схема алгоритма BVLS



$$J = |At - b|^2 \rightarrow \min$$

$$lb \leq t \leq ub$$

$$J = |At - b|^2 \rightarrow \min$$

$$t \geq 0$$

$$A = QR$$

$$\hat{t} = (QR)^{-1}b = R^{-1}Q^T b$$

$$P = I - \frac{2uu^T}{\|u\|^2} u$$

$$= x - \|x\|ex = a_k k$$

$$= 1, \dots, n - 1Q$$

$$= I, R = A$$

$$R = A$$

$$A = PA$$

$$Q = QP$$

АЛГОРИТМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ПЕРЕМЕННЫЕ

$$\begin{cases} J = |At - b|^2 \rightarrow \min \text{ (целевая функция)} \\ lb \leq t \leq ub \text{ (ограничения на решение)} \end{cases}$$

Входные данные:

- A – матрица коэффициентов двигателей – линейные и угловые ускорения
- b – вектор управления (требуемый вектор состояния)
- lb, ub – ограничения на решение (такт ЦВМ)

Выходные данные:

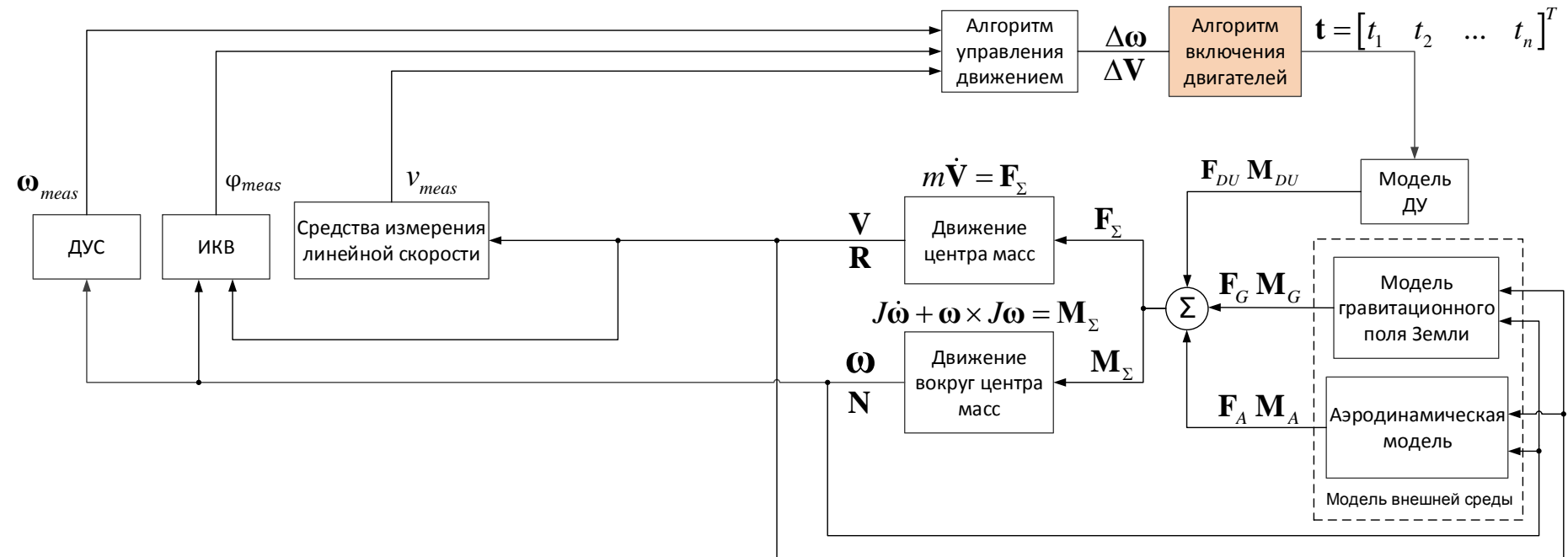
- t – вектор времени включения всех двигателей

Преимущества:

- Высокая точность отработки управляющих воздействий – хуже, чем у симплекс-метода, намного лучше, чем у метода каталогов
- Адаптируемость к изменению конфигурации двигательной установки – простой учет отказавших двигателей
- Меньшая вычислительная сложность, чем у симплекс-метода
- Возможность дополнительного расширения функционала – динамический контроль

Недостатки:

- Вычислительная сложность все ещё достаточно высока
- В строгом виде не решается задача оптимизации по расходу топлива

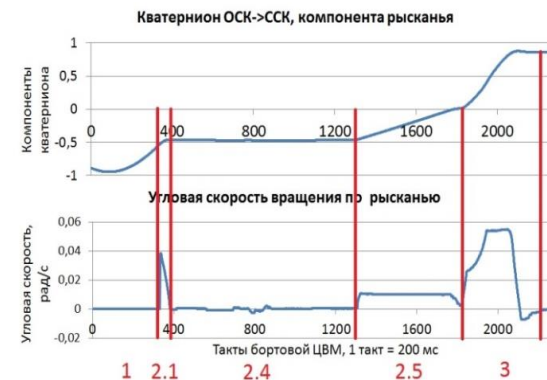
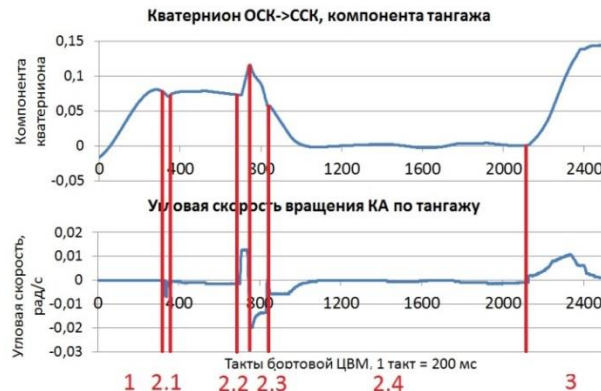


ДУ – двигательная установка

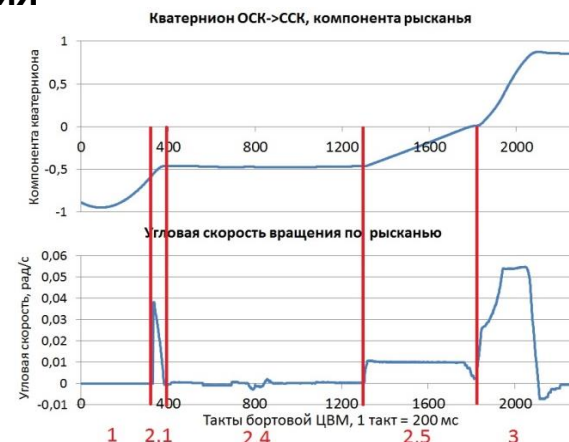
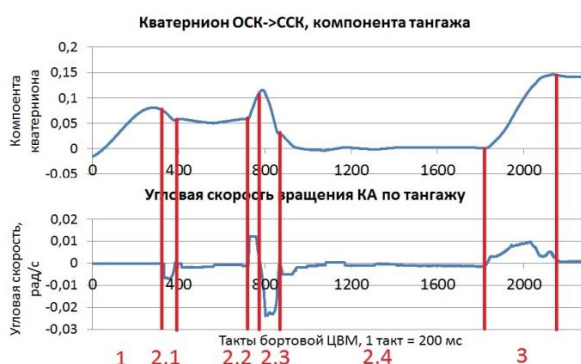
ДУС – датчик угловой скорости

ИКВ – датчик инфракрасной вертикали

Метод наименьших квадратов

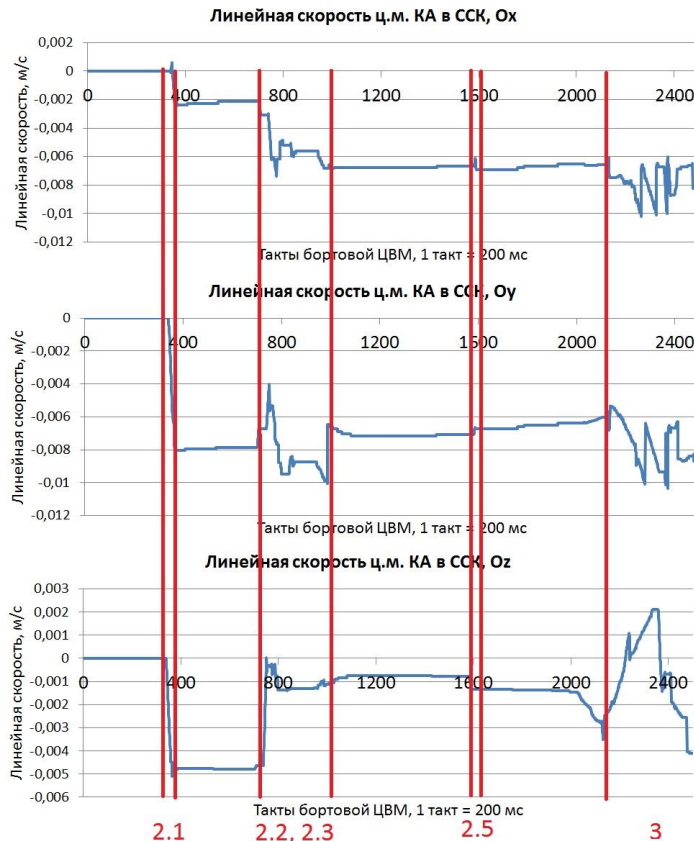


Метод линейного программирования

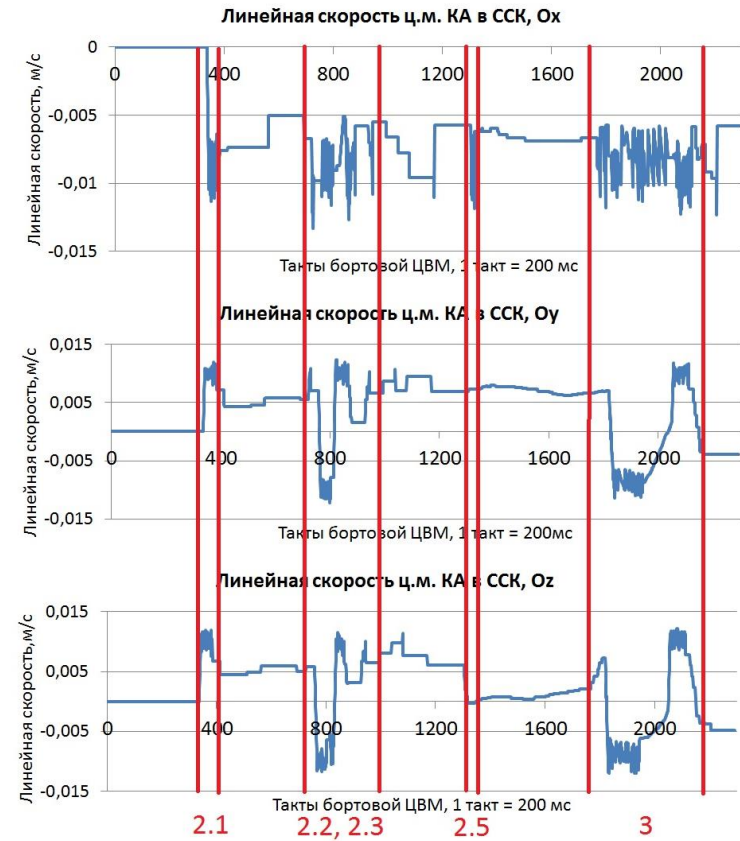


- 1 – пассивное вращение с начальной угловой скоростью;
- 2.1 – демпфирование угловой скорости;
- 2.2 – поиск Земли;
- 2.3 – построение местной вертикали;
- 2.4 – расчет курсового угла;
- 2.5 – финальный разворот ОСК по рысканью;
- 3 – заданный разворот [0.3536 0.3536 0.8536 0.1464].

Метод наименьших квадратов

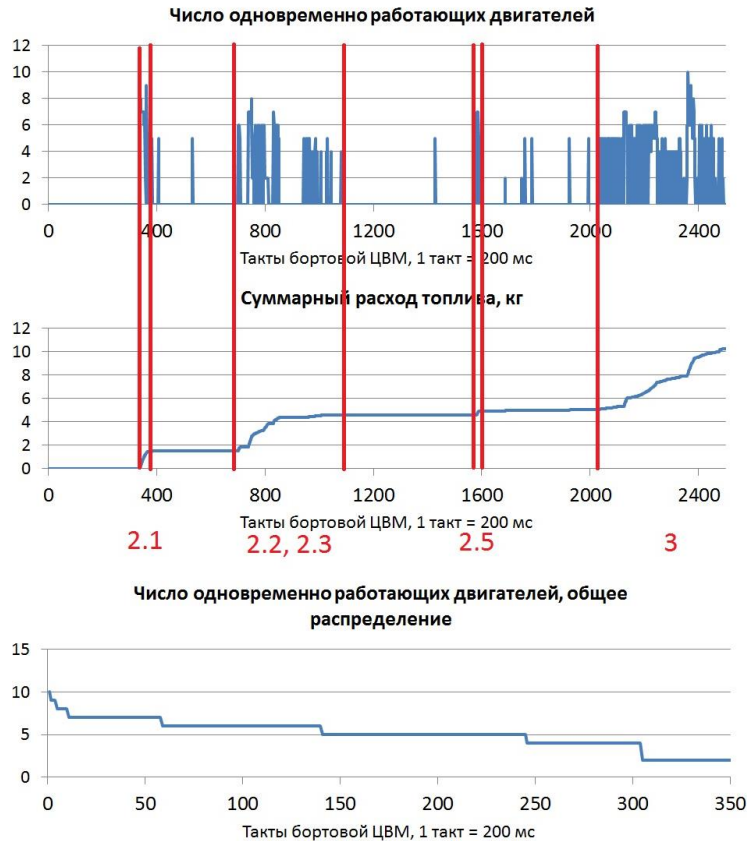


Метод линейного программирования

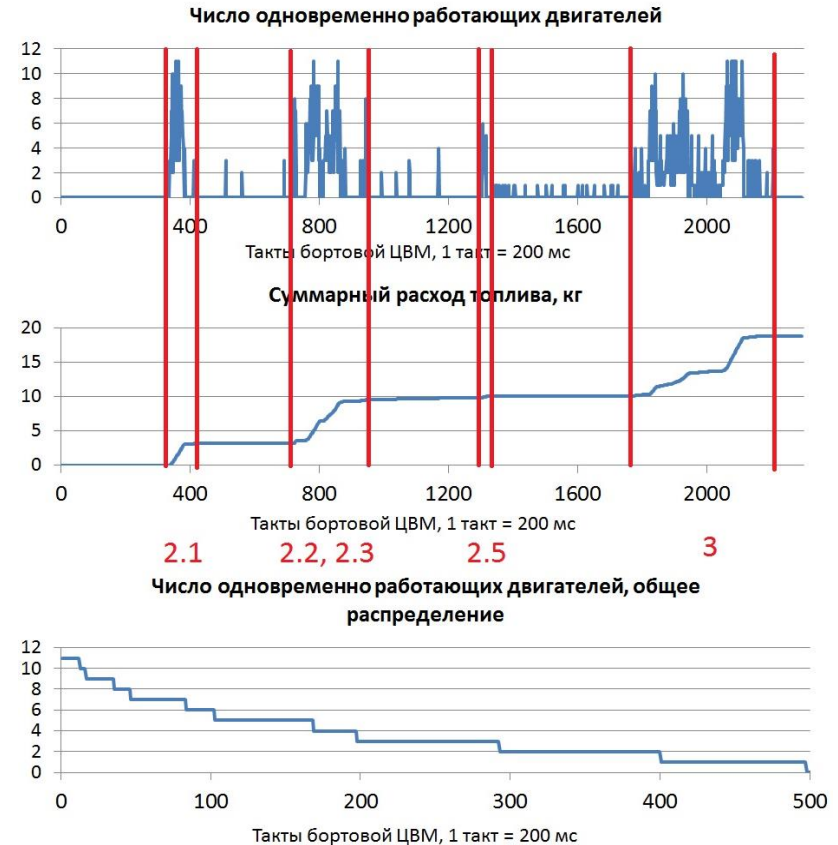


- 1 – пассивное вращение с начальной угловой скоростью;
- 2.1 – демпфирование угловой скорости;
- 2.2 – поиск Земли;
- 2.3 – построение местной вертикали;
- 2.4 – расчет курсового угла;
- 2.5 – финальный разворот ОСК по рысканью;
- 3 – заданный разворот [0.3536 0.3536 0.8536 0.1464].

Метод наименьших квадратов



Метод линейного программирования



- 1 – пассивное вращение с начальной угловой скоростью;
- 2.1 – демпфирование угловой скорости;
- 2.2 – поиск Земли;
- 2.3 – построение местной вертикали;
- 2.4 – расчет курсового угла;
- 2.5 – финальный разворот ОСК по рысканью;
- 3 – заданный разворот [0.3536 0.3536 0.8536 0.1464].

$$\min_t \|D \cdot t - \varepsilon_{\text{ИЗМ}}\|^2, \text{ так что } t \leq t_0$$

Входные данные:

- D – матрица коэффициентов (ускорений) двигателей, на которые были переданы команды включения в течение предыдущего такта
- $\varepsilon_{\text{ИЗМ}}$ – вектор измеренной угловой скорости с ДУС;
- t_0 – полученное на предыдущем такте время работы двигателей

Выходные данные:

- t – рассчитанный алгоритмом вектор времени включения двигателей с учетом полных отказов

Результаты работы первой ревизии алгоритма – корректное определение полных отказов за 1 такт:

98% (978/1000) – 1 отказ;

94% (937/1000) – 2 отказа;

88% (881/1000) – 3 отказа

Разработанный алгоритм обеспечивает:

- высокую точность отработки управляющих воздействий с низкими побочными воздействиями в канале перемещения
- меньший расход топлива даже в сравнении с гибридным алгоритмом на основе симплекс-метода
- возможность использования для осуществления динамического контроля