



Учреждение Российской академии наук
Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН)

Лаборатория Интеллектуальных Электромеханических Систем (ИЭМС)

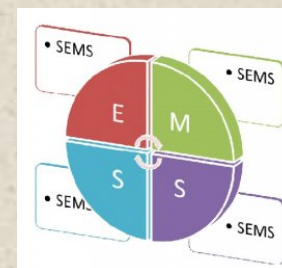
Заведующий лабораторией

Городецкий Андрей Емельянович,

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

заслуженный деятель науки и техники,

g27764@yandex.ru

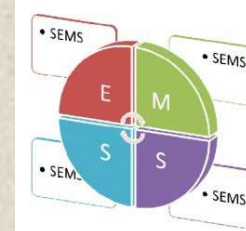


Состав лаборатории

1. Кулик Борис Александрович — вед.н.с.(д.ф.-м.н.)
2. Курбанов Вугар Гариб-оглы - ст. н.с. (к.ф.-м.н.)
3. Тарасова Ирина Леонидовна — ст.н.с. (к.т.н.)
4. Кучмин Андрей Юрьевич — вед.н.с. (к.т.н.)
5. Козлов В.В. — ст.н.с.

ЧАСТЬ 2

Содержание



Часть 1

1. Научные направления исследований

1.1. Исследование и разработка технологии создания интеллектуальных электромеханических систем

1.1.1. Модули SEMS

1.1.2. Системы управления модулей SEMS

1.1.3. Центральная нервная система SEMS

1.1.4. Управление группой SEMS

1.1.5. Оценки группового интеллекта SEMS

1.1.6. Безопасное управление группой SEMS

Часть 2

1.2. Идентификация систем управления (СУ) динамических объектов (ДО) на основе множественно-функционального подхода

1.3. Управление зеркальной системой радиотелескопа на базе модулей SEMS

1.4 . Гексапод контррефлектора

1.5. Формирование отражающих зеркальных поверхностей антенны космического радиотелескопа

1.6. Модифицированный релейный метод управления

1.7. Алгебраические методы логического анализа данных и знаний

Часть 3

2. Компьютерное моделирование

2.1. Процесс возбуждения и синхронизации колебаний ресничек мерцательных клеток

2.2. Формирование фракталоподобных структур

2.3. Проблемы и методы восстановления изображений с дефектами

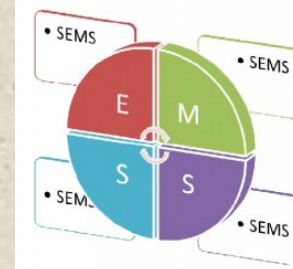
3. Практическое применение

3.1. Использование матричных приемников

3.2. Применение SEMS

4. Экспериментальные исследования

1.2. Идентификация систем управления (СУ) динамических объектов (ДО) на основе множественно-функционального подхода



Модель СУ ДО определим в общем виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}),$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния СУ, $\mathbf{p}$ – параметры СУ, $\mathbf{u}$ – управляющие воздействия на ДО, $\mathbf{f}$ – возмущающие воздействия, $\mathbf{y}$ – измеряемый выход ДО, $\mathbf{C}$, $\mathbf{M}$ – матрицы параметров.

$$J = \min_{\mathbf{p}, \mathbf{x}, \mathbf{f}} \left\{ \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{Cx} - \mathbf{y})^T \mathbf{M} (\mathbf{Cx} - \mathbf{y}) dt \right\},$$

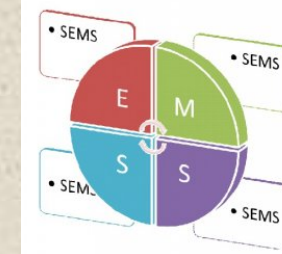
При ограничениях, описывающих физическую адекватность модели :

$$\mathbf{p}_{\min} \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}_{\max}, \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}, \mathbf{f}_{\min} \leq \mathbf{f} \leq \mathbf{f}_{\max},$$

$$G_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}, \mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m,$$

где G_i – функции ограничений.

Постановка задачи идентификации систем Управления (СУ) динамических объектов как задачи математического программирования



Модель СУ ДО определим в общем виде:

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{F} * (\mathbf{p}[k], \mathbf{x}[k], \mathbf{u}[k], \mathbf{f}[k]),$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния СУ, $\mathbf{p}$ – параметры СУ, $\mathbf{u}$ – управляющие воздействия на ДО, $\mathbf{f}$ – возмущающие воздействия, $\mathbf{y}$ – измеряемый выход ДО, $\mathbf{C}$, $\mathbf{M}$ - матрицы параметров.

$$J^* = \min_{\mathbf{p}, \mathbf{x}[0], \mathbf{f}} \left\{ \sum_{k=0}^N (\mathbf{C}\mathbf{x}[k] - \mathbf{y}[k])^T \mathbf{M} (\mathbf{C}\mathbf{x}[k] - \mathbf{y}[k]) \right\},$$

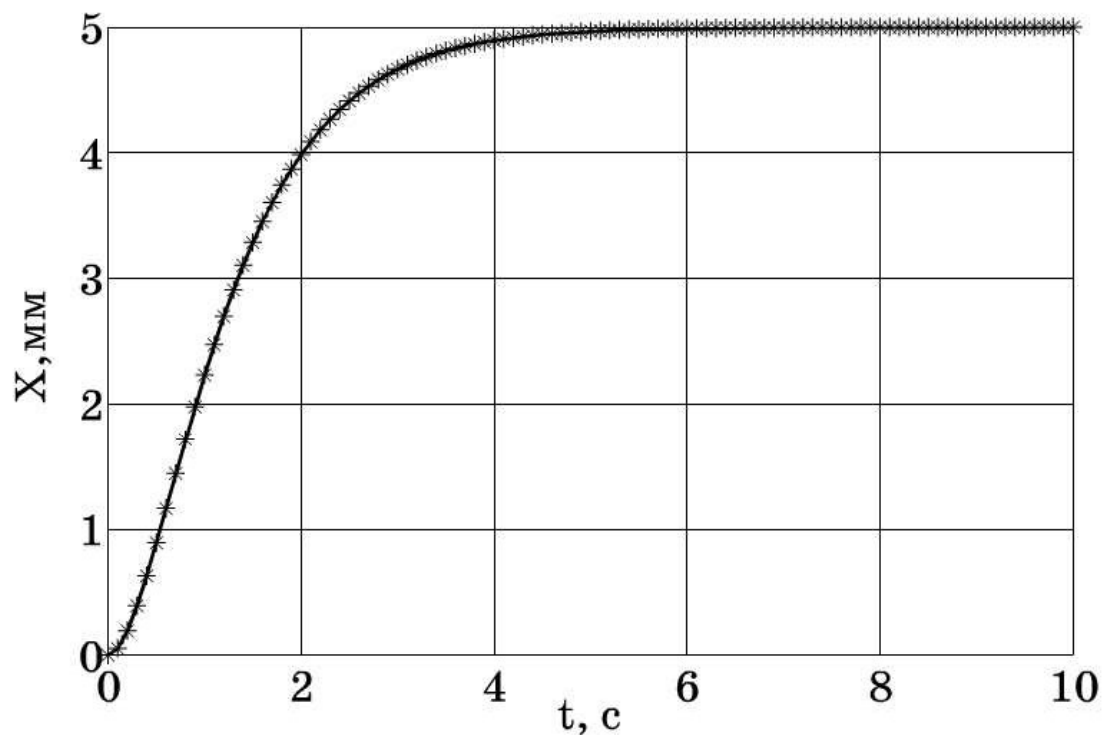
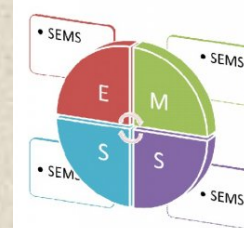
При ограничениях, описывающих физическую адекватность модели :

$$\mathbf{p}_{\min} \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}_{\max}, \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}, \mathbf{f}_{\min} \leq \mathbf{f} \leq \mathbf{f}_{\max},$$

$$G_i(\mathbf{p}, \mathbf{f}, \mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m,$$

где G_i – функции ограничений.

Идентификация модели гексапода

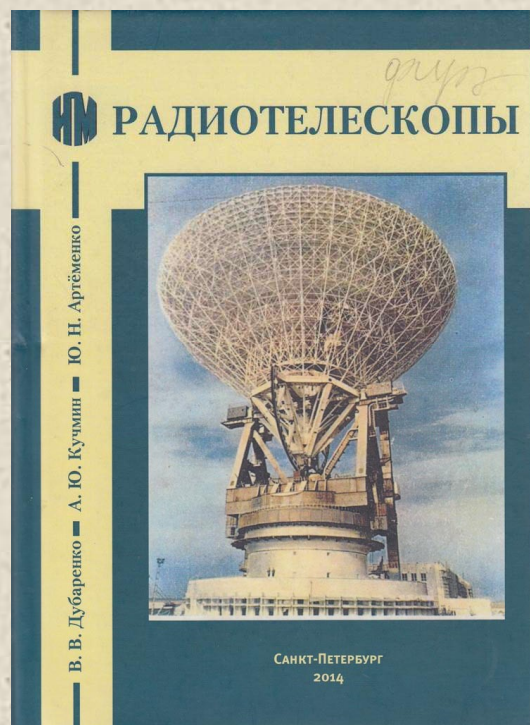
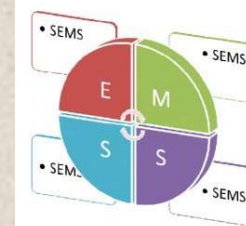


Передаточная функция для выхода линейного перемещения x и удлинения u_1 :

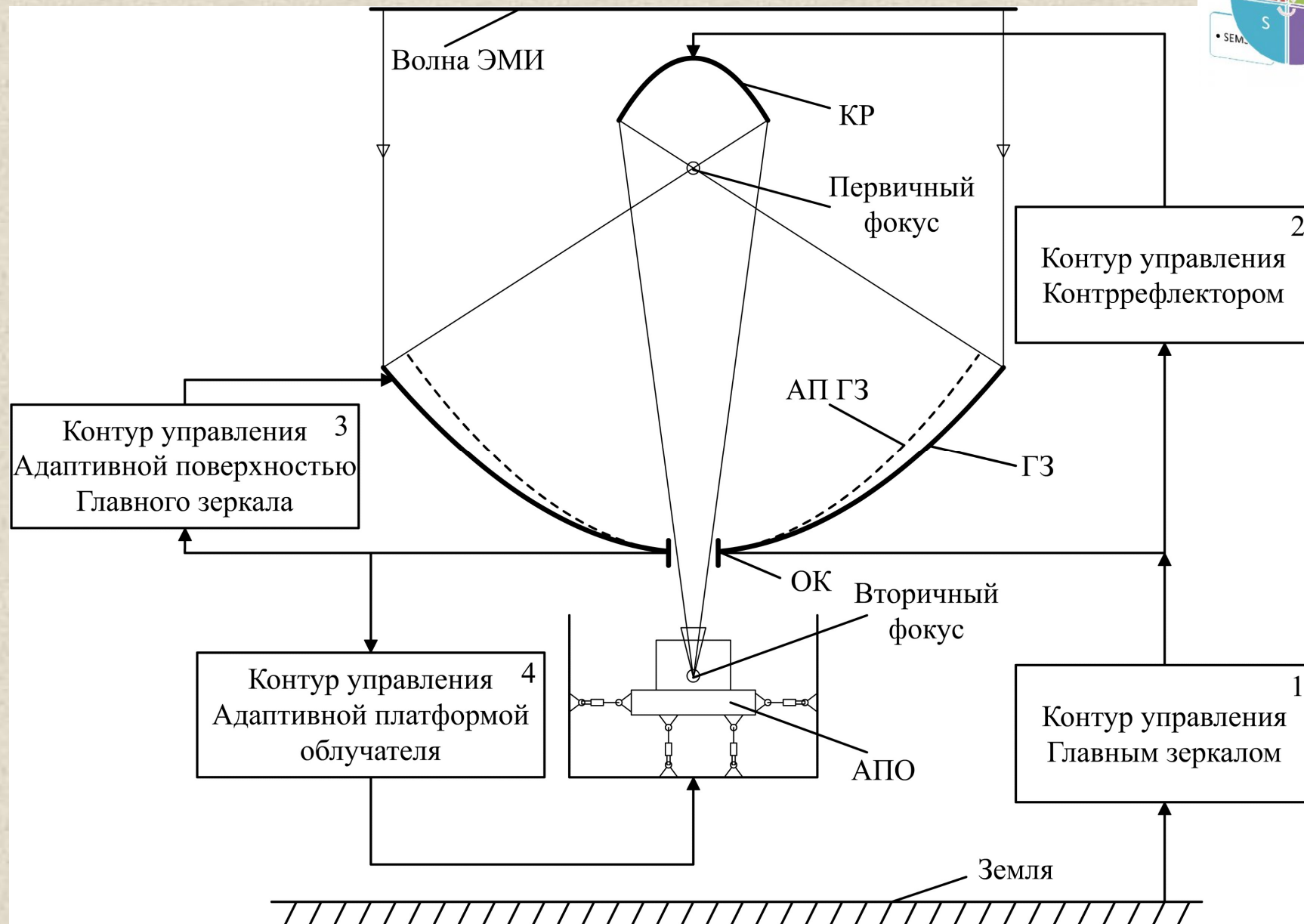
$$1.136 - 3.022 z^3 + 6.558 z^2 - 4.734 z$$

$$z^4 - 2.183 z^3 + 1.577 z^2 - 0.3763 z + 0.0001721$$

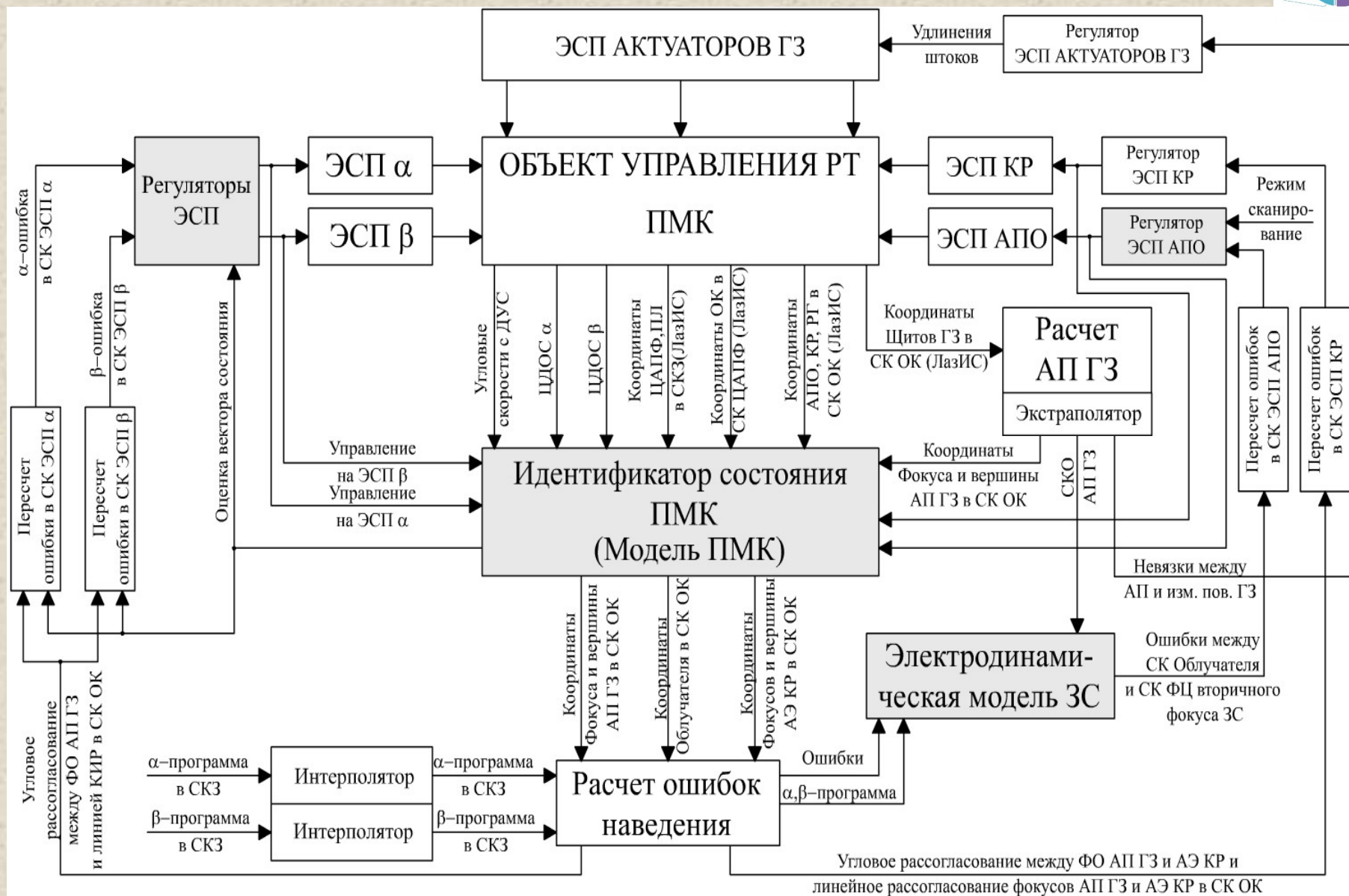
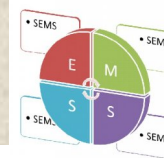
1.3. Управление зеркальной системой радиотелескопа на базе модулей SEMS



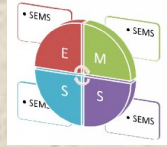
Концепция управления элементами зеркальной системы



Система управления радиотелескопом



Управление адаптивной поверхностью главного зеркала



Каноническое уравнение параболоида (КСК): Уравнение параболоида в Базовой СК(БСК):

$$\mathbf{x}_{p,i}^T \mathbf{A}_p \mathbf{x}_{p,i} + 2a_p \mathbf{B}_p^T \mathbf{x}_{p,i} = 0,$$

$$\mathbf{x}_{p,i} = \begin{bmatrix} x_{p,i} \\ y_{p,i} \\ z_{p,i} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}_{p,i} = \mathbf{c}(\beta, \theta)^T [\mathbf{x}_{p,0,i} - \mathbf{v}_0],$$

$$\mathbf{p} = [x_v \quad y_v \quad z_v \quad \beta \quad \theta \quad a_p]^T,$$

$$[\mathbf{x}_{p,0,i} - \mathbf{v}_0]^T \mathbf{A}_0 [\mathbf{x}_{p,0,i} - \mathbf{v}_0] + 2a_p \mathbf{B}_0^T [\mathbf{x}_{p,0,i} - \mathbf{v}_0] = 0,$$

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{c} \mathbf{A}_p \mathbf{c}^T, \mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_p \mathbf{c}^T,$$

Уравнение нормали в БСК:

$$\mathbf{B}_p^T \mathbf{x}_{p,i} - \mathbf{B}_p^T \mathbf{c}^T [\mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{v}_0] +$$

$$+ a_p \sqrt{\frac{[\mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{v}_0]^T \mathbf{c} \mathbf{A}_p \mathbf{c}^T [\mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{v}_0]}{\mathbf{x}_{p,i}^T \mathbf{c} \mathbf{A}_p \mathbf{c}^T \mathbf{x}_{p,i}}} - a_p = 0,$$

Ограничения на ход штоков актуаторов:

$$[\mathbf{e}_{a0,j}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{e}_{a0,j}] l_{a,j}^2 + [2\mathbf{e}_{a0,j}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_{b0,j} - 2\mathbf{e}_{a0,j}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{v}_0 + 2a_p \mathbf{B}_0^T \mathbf{e}_{a0,j}] l_{a,j} +$$

$$+ [\mathbf{x}_{b0,j}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_{b0,j} - 2\mathbf{x}_{b0,j}^T \mathbf{A}_0 \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_0^T \mathbf{A}_0 \mathbf{v}_0 + 2a_p \mathbf{B}_0^T \mathbf{x}_{b0,j} - 2a_p \mathbf{B}_0^T \mathbf{v}_0] = 0$$

$$-0.5l_{a,j}^{\max} \leq l_{a,j} \leq 0.5l_{a,j}^{\max}$$

Уравнение невязки по нормали:

$$\xi_n = \sum_i [\mathbf{c}^T \mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{c}^T \mathbf{v}_0 - \mathbf{x}_{p,i}]^T [\mathbf{c}^T \mathbf{x}_{0,i} - \mathbf{c}^T \mathbf{v}_0 - \mathbf{x}_{p,i}],$$

Искомые параметры:

$$\mathbf{p} = [x_v \quad y_v \quad z_v \quad \beta \quad \theta \quad a_p]^T, |p_i| \leq p_i^{\max}$$

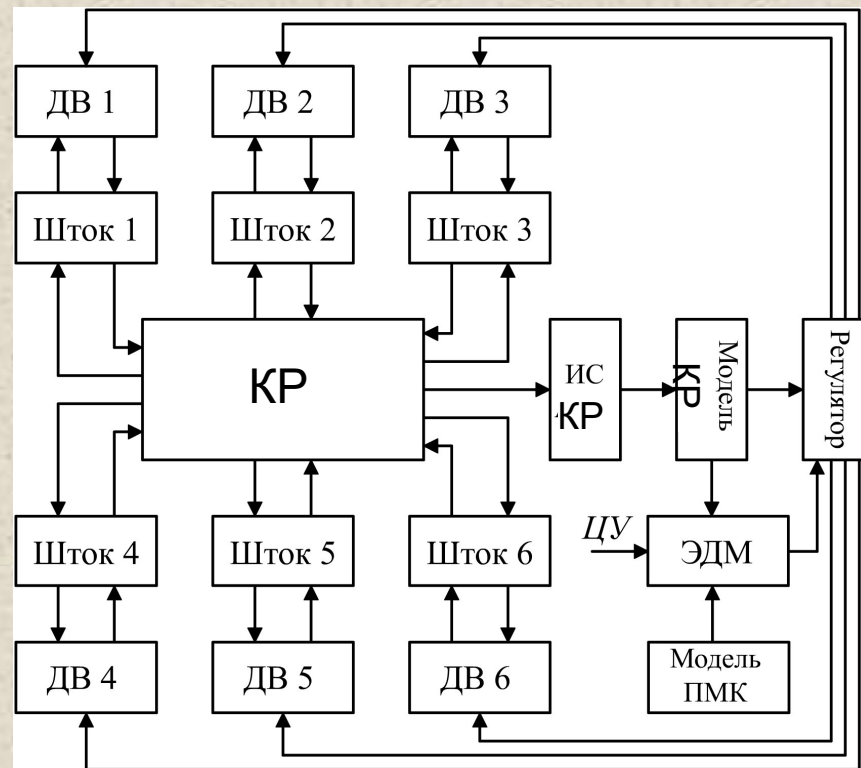
Критерии:

$$J_1 = \min_{\mathbf{p}} \xi_n(\mathbf{p}),$$

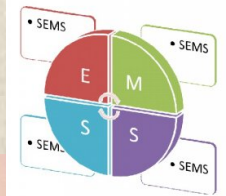
$$J_2 = \min_{\mathbf{p}} \sum_{j=1}^m l_{a,j}^2(\mathbf{p}).$$

$\mathbf{x}_{p,i}$ – координаты точки параболоида в КСК, $\mathbf{v}_0 = [x_v, y_v, z_v]$ – координаты вершины в БСК, β, θ – углы ориентации фокальной оси в БСК, a_p – фокусное расстояние, $\mathbf{c}$ – матрица вращения, $\mathbf{x}_{0,i}$ – координаты точки поверхности главного зеркала, ξ_n – невязка по нормали, $\mathbf{x}_{p,0,i}$ – координаты точки параболоида в БСК.

1.4. Гексапод контррефлектора

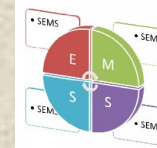


ДВ – двигатель, ИС – измерительная система, ЦУ – целеуказания, ЭДМ – электродинамическая модель, КР – контррефлектор, ПМК – пространственная металлоконструкция антенны



Требования к приводу					
мм			градусы		
x	y	z	β	θ	α
± 10	± 10	± 10	± 2	± 2	-

Задача оптимального управления гексаподом



Критерий : $J = \min_{x_1} \{x_1\}$, x_1 – время переходного процесса,

Ограничения :

$$1) g_i(x_1) < \frac{k_2}{T_h}, \quad 2) \mu_i(x_1) > 0,$$

$$3) \mu_i(x_1) - \mu_i(x_1) \ln \mu_i(x_1) - \sigma_i < 0,$$

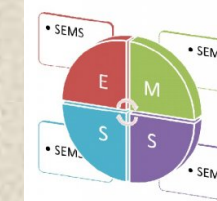
$$4) -\lambda_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h} g_i(x_1) < \lambda_i^{\max},$$

$\lambda_i^{\max}$ – максимальное ускорение по i -й координате,

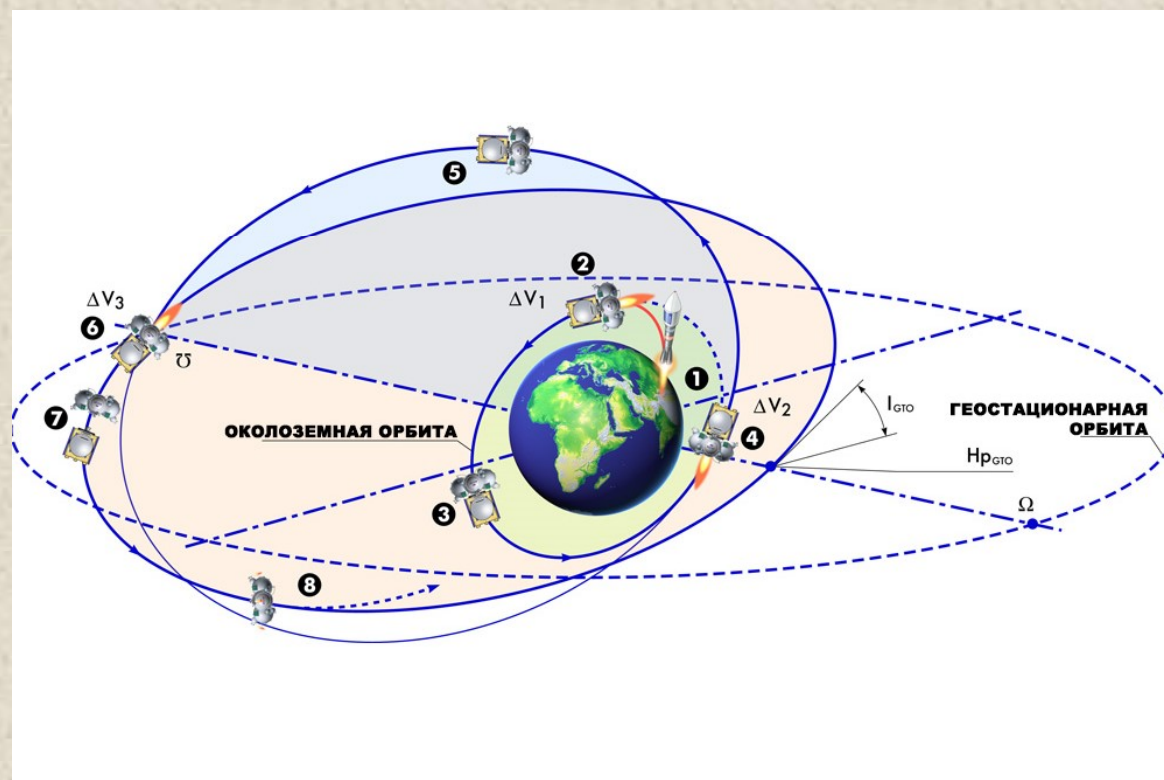
$$5) -v_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h - \frac{1}{g_i(x_1)}} \left(e^{\frac{-h_i(x_1)}{T_h}} - e^{-h_i(x_1)g_i(x_1)} \right) < v_i^{\max},$$

$v_i^{\max}$ – максимальная скорость по i -й координате.

1.5. Формирование отражающих зеркальных поверхностей антенны космического радиотелескопа



При формировании зеркальной системы космического радиотелескопа пространственное положение зеркал необходимо адаптировать к длине принимаемых антенной радиоволн с учетом различных возмущающих факторов. Практически избавиться от влияния весовых и ветровых возмущений можно за счет формирования антенны радиотелескопа в космосе, например, на геостационарной орбите Земли.



1, 2 - фаза старта
ракетоносителя спутника, 2,
3 - фаза выхода на
околоземную орбиту, 4, 5, 6
- фаза выхода на
геостационарную орбиту и
6, 7, 8 - фаза схода, либо
удержания на орбите

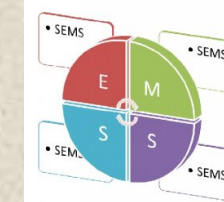
Схема вывода спутников с элементами зеркальной системы на орбиту

Формирование отражающих зеркальных поверхностей антенны космического радиотелескопа



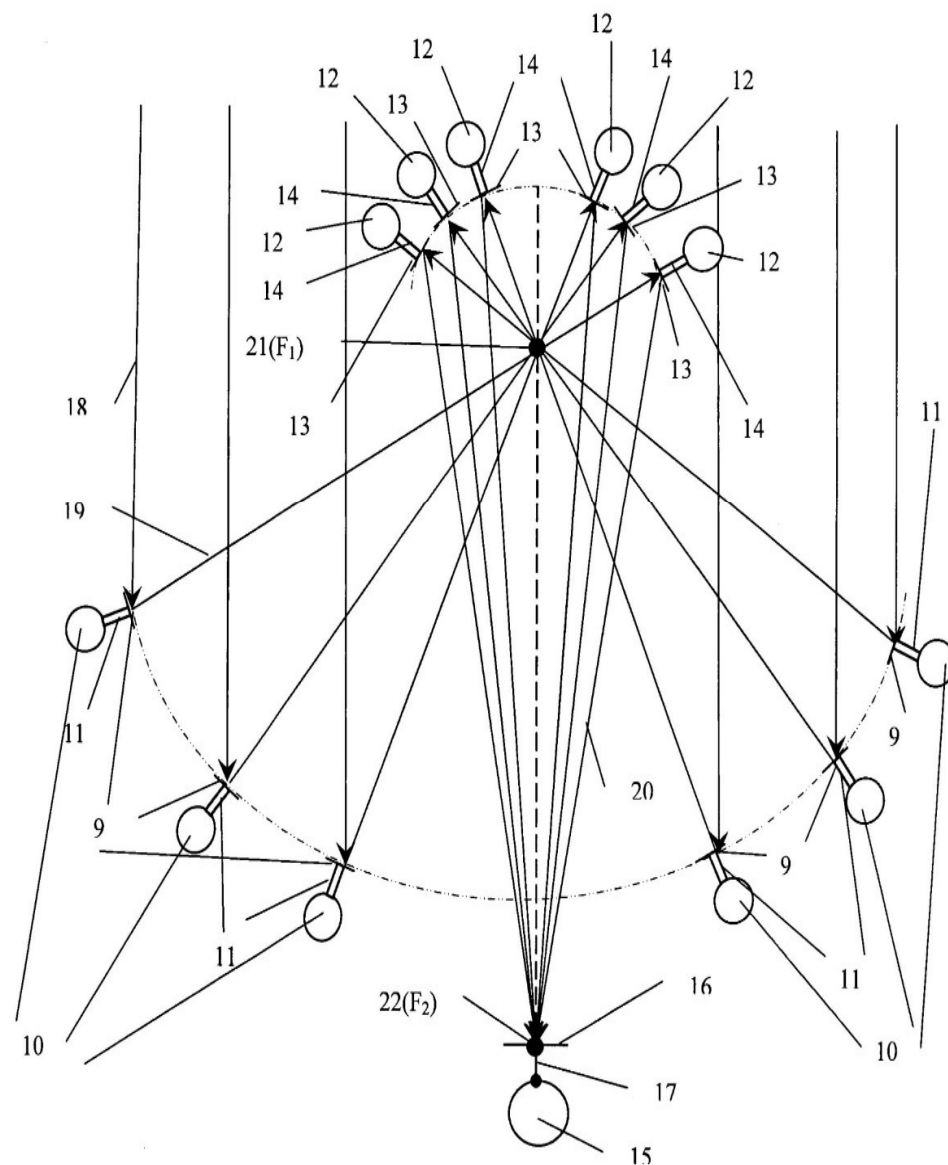
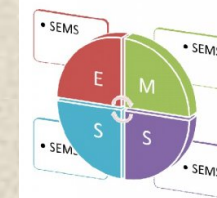
При этом щиты отражающих поверхностей главного зеркала и контррефлектора устанавливают на управляемые элементы (модули SEMS), установленные на искусственных спутниках земли, измеряют положения щитов, образующих отражающую поверхность главного зеркала антенны, строят в компьютере по измеренным значениям положения щитов главного зеркала для каждого щита, например методом наименьших квадратов своих аппроксимирующих параболоидов, таким образом, чтобы фокусное расстояние и положение основания каждого параболоида минимально отличалось от соседнего и при этом разности между их фокусными расстояниями были кратны длине волны принимаемого антенной радиоизлучения, вычисляют отклонения каждого щита главного зеркала от соответствующего своего аппроксимирующего параболоида, и по вычисленным отклонениям с помощью системы автоматического управления перемещают каждый щит в сторону минимизации этих отклонений, а после окончания перемещений щитов главного зеркала измеряют положения каждого щита контррефлектора, строят в компьютере модели хода лучей, отраженных от щитов главного зеркала в сторону контррефлектора и хода отраженных лучей от поверхностей щитов контррефлектора, вычисляют рассогласования крайних лучей, отраженных от щитов главного зеркала, с положениями соответствующих краев отражающих поверхностей щитов контррефлектора и, с помощью системы автоматического управления, перемещают каждый щит контррефлектора в сторону уменьшения указанных рассогласований таким образом, чтобы положения их фокусов минимально расходились между собой, с положением вторичного фокуса зеркальной системы и с положением приемника излучения при условии, что длины лучей, представляющих собой оптические пути от первичного фокуса до отражающих поверхностей щитов контррефлектора и расхождения между ними, а также длины лучей, представляющих собой оптические пути от отражающих поверхностей щитов контррефлектора до вторичного фокуса и расхождения между ними были кратны длине волны принимаемого излучения,

Формирование отражающих зеркальных поверхностей антенны космического радиотелескопа



Кроме того, в этом способе приемник излучения устанавливают на управляемом элементе, установленном на искусственном спутнике земли. Управляемые элементы щитов отражающих поверхностей главного зеркала и контррефлектора, а также приемника излучения выполняют, например, в виде гексаподов, устанавливаемых на спутниках земли, выводимых на орбиту, например, геостационарную, таким образом, чтобы поверхность, проведенная через щиты главного зеркала, была близкой к параболической. При этом надо чтобы лучи, идущие от плоскости фронта принимаемого антенной радиоизлучения и падающие на поверхности щитов главного зеркала собирались в первичном фокусе антенны и затем падали на щиты контррефлектора. Причем спутники, на которых закреплены управляемые элементы щитов контррефлектора, помещают на орбиту, например, геостационарную, так чтобы поверхность, проведенная через щиты контррефлектора, была близкой к эллипсоиду и чтобы все отраженные от щитов контррефлектора лучи собирались во вторичном фокусе и попадали на чувствительную поверхность радиоприемника. Спутник, на котором закреплен управляемый элемент приемника, помещают на орбиту, например, геостационарную так, чтобы центр приемника излучения как можно точнее совпадал со вторичным фокусом антенны. После окончания перемещения щитов контррефлектора приемник излучения перемещают с помощью системы автоматического управления до совпадения его центра с положением вторичного фокуса антенны.

Формирование отражающих зеркальных поверхностей антенны космического радиотелескопа



В качестве управляемых элементов целесообразно использовать последовательные соединения модулей SEMS, что позволяет позиционировать отражающие щиты при незначительных смещениях центра масс, что облегчает стабилизацию спутников. Малые габариты и управляемая реконфигурируемость конструкции SEMS обеспечивают высокую гибкость и маневренность таких управляемых элементов

А. Е. Городецкий, В. Г. Курбанов, И. Л. Тарасова. Патент РФ № 2694813 «Способ формирования отражающих зеркальных поверхностей антенны космического радиотелескопа», 2019

1.6. Модифицированный релейный метод управления

Постановка задачи управления:

Перевести за минимальное время ДО:

$$A\ddot{y} + D\dot{y} + Cy = Bu + Ff, \quad y \in R^s, \quad u \in R^m, \quad f \in R^p,$$

из начального состояния $x(t_0) = [y(t_0); \dot{y}(t_0)]$ в желаемое $x_g = [y_g; \dot{y}_g]$ при линейных ограничениях на обобщенные координаты $y^{\max}, y^{\min}$ и обобщенные скорости $v^{\max}, v^{\min}$.

Уравнения в отклонениях от желаемого состояния $z=x(t)-x_g$:

$$\dot{z} = A_z z + B_z u, \quad z \in R^{2s}, \quad u \in R^m.$$

Функция Ляпунова с добавленными штрафными функциями W_i :

$$V(z) = z^T \delta z + \sum_{i=1}^{2s} W_i^{\max}(z_i) + \sum_{i=1}^{2s} W_i^{\min}(z_i) > 0,$$

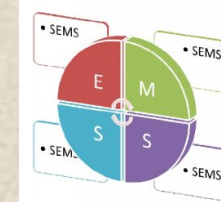
$$W_i^{\max}(z_i) = \exp\left[\delta_i^z \left(z_i + x_{g,i} - x_i^{\max}\right)\right] > 0, \quad W_i^{\min}(z_i) = \exp\left[\delta_i^z \left(x_i^{\min} - x_{g,i} - z_i\right)\right] > 0,$$

$$\delta^z = \text{diag}(\delta_1^y, \delta_2^y, \dots, \delta_s^y, \delta_1^v, \delta_2^v, \dots, \delta_s^v), \quad x^{\max} = [y^{\max}; v^{\max}], \quad x^{\min} = [y^{\min}; v^{\min}].$$

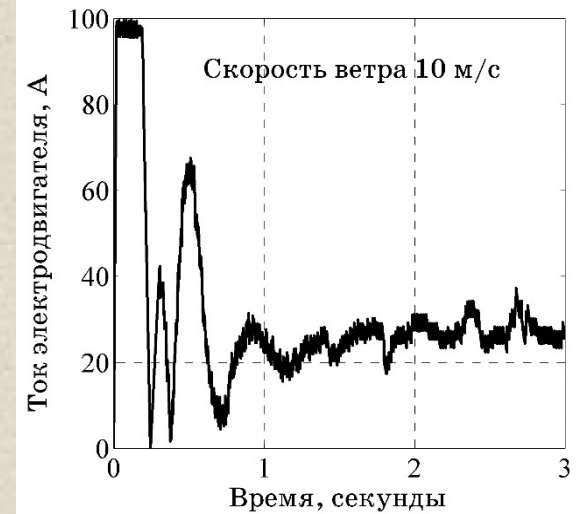
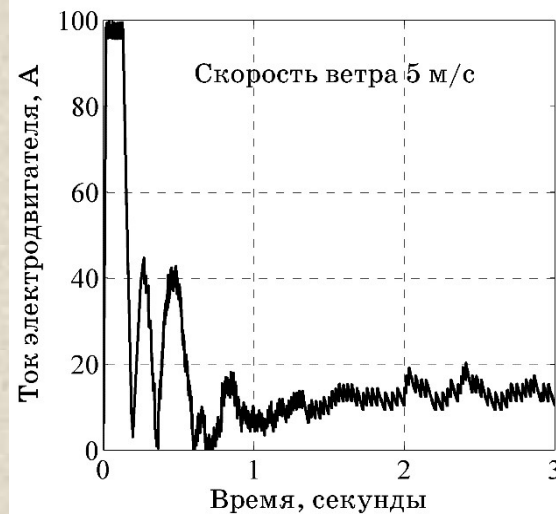
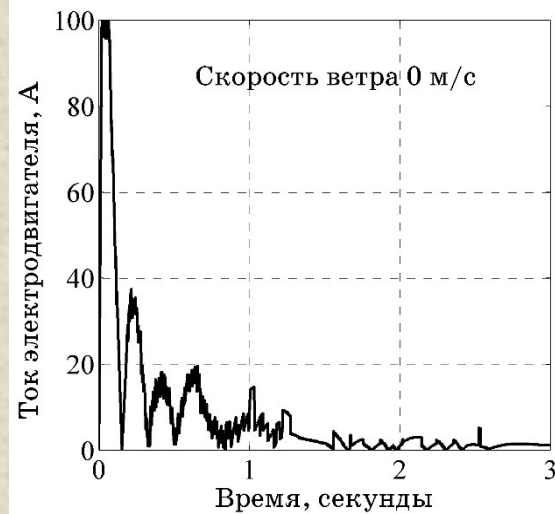
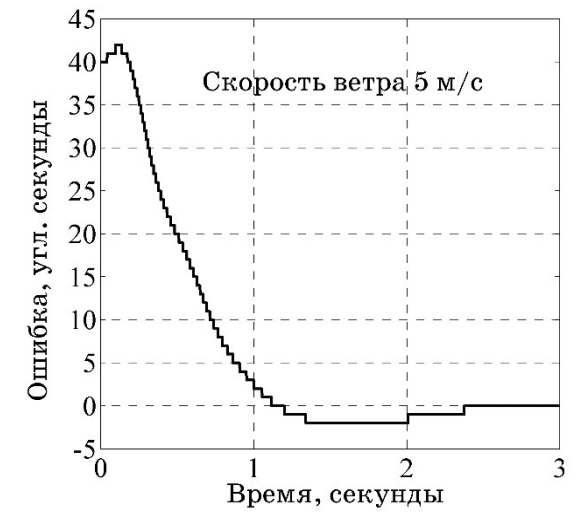
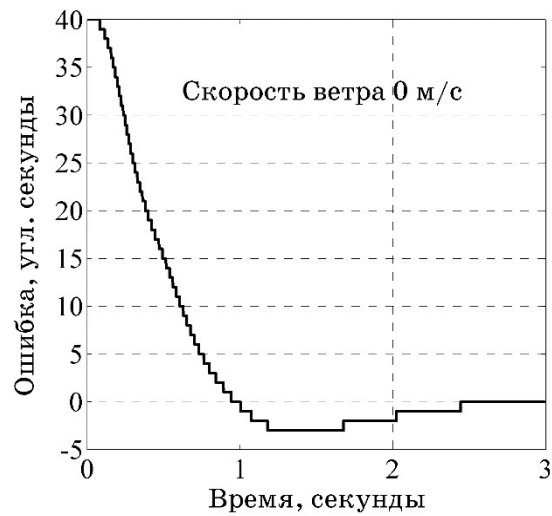
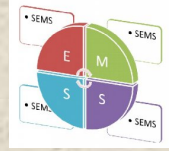
Алгоритм управления:

$$u = -\text{diag}(u^{\max}) \psi \left(B_z^T \delta z + B_z^T \delta^z [W^{\max} - W^{\min}] \right), \quad W^{\max} = [W_1^{\max}, W_2^{\max}, \dots, W_{2s}^{\max}]^T,$$

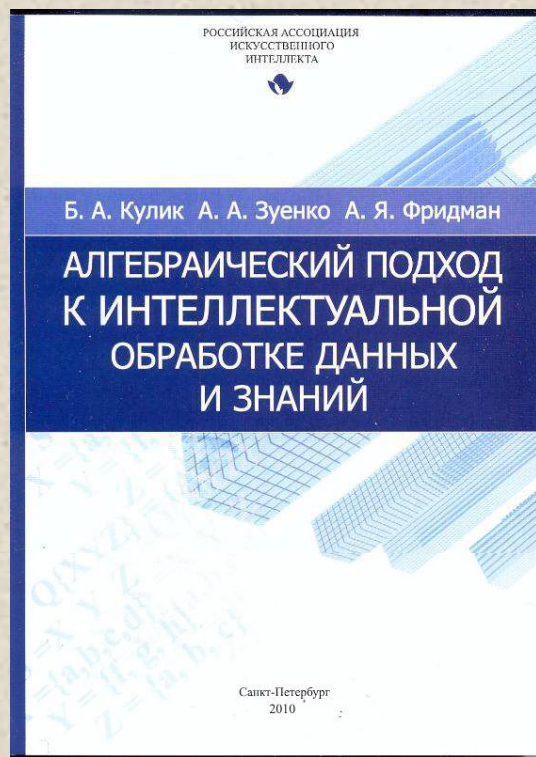
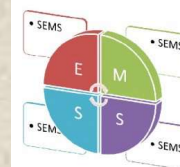
$$\psi(a_1, a_2, \dots, a_m) = [\text{sign}(a_1), \text{sign}(a_2), \dots, \text{sign}(a_{2s})]^T, \quad W^{\min} = [W_1^{\min}, W_2^{\min}, \dots, W_{2s}^{\min}]^T.$$



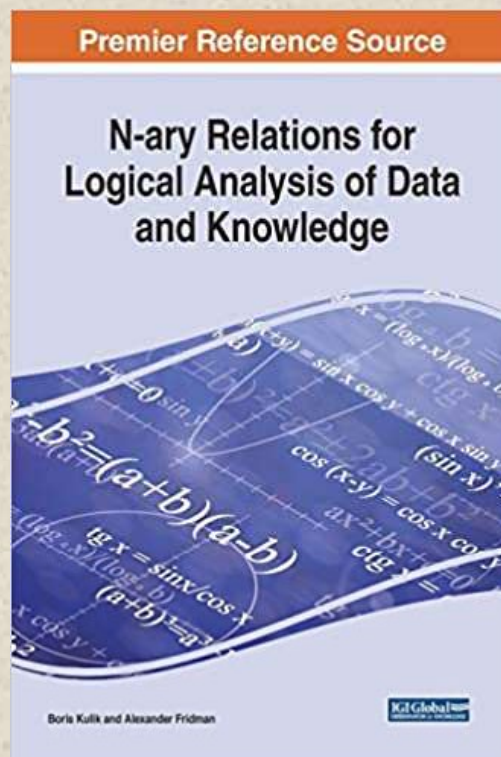
Модифицированный релейный метод управления ГЗ



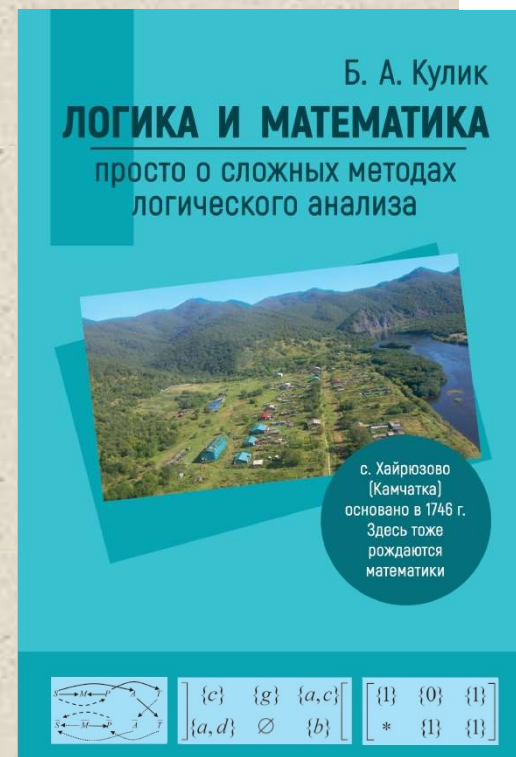
1.7. Алгебраические методы логического анализа данных и знаний



2010 г.



2017 г.



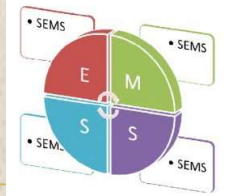
2020 г.

2010: <http://www.ipme.ru/ipme/labs/msa/kulik/book2010.pdf>

2017: <https://www.igi-global.com/book/ary-relations-logical-analysis-data/178722>

2020: [Логика и математика: просто о сложных методах логического анализ \(polytechnics.ru\)](http://polytechnics.ru)

Алгебраические методы логического анализа данных и знаний



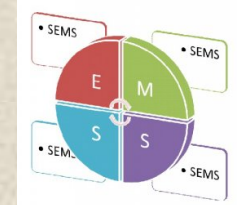
Разработана **АЛГЕБРА КОРТЕЖЕЙ** (АК) –математическая система для моделирования и анализа многоместных отношений, основанная на свойствах **декартова произведения множеств** (ДП) .

Основное предназначение – **логический анализ систем и рассуждений**.

Исследования показали, что помимо логического анализа алгебру кортежей можно использовать в следующих областях дискретной математики и информационных технологий:

- 1) реляционные модели;
- 2) графы и сети;
- 3) системы искусственного интеллекта (экспертные системы, семантические сети, фреймы, онтологии и т. д.);
- 4) логико-вероятностные методы, включая вероятностную логику;
- 5) дискретные автоматы;
- 6) задачи удовлетворения ограничений (Constraint Satisfaction Problem – CSP);
- 7) модели вопросно-ответных систем;
- 8) при машинной реализации – сокращение трудоемкости алгоритмов решения сложных задач логического анализа за счет специфических свойств АК, а также за счет возможности эффективного распараллеливания алгоритмов.

Алгебра кортежей: структуры 1



Структуры АК называются **АК-объектами**. В логическом анализе они представляют **области истинности** формул **математической логики**.

В основу АК положен новый способ записи **Декартова произведения** (ДП). Вместо традиционной записи ДП

$$P = A \times B \times C$$

используется **новая структура** (отношение)

С-кортеж: $P[XYZ] = [A \ B \ C]$,

где P – имя отношения, $[XYZ]$ – **схема отношения**, X, Y, Z – **атрибуты**, A, B, C – **компоненты** (подмножества соответствующих атрибутов).

С-кортеж можно преобразовать в обычное отношение:

$$P[XYZ] = A \times B \times C.$$

Полная компонента *.

В С-кортеже $Q[XYZ] = [A \ * \ C]$ компонента * равна домену атрибута Y и соответственно $Q[XYZ] = A \times Y \times C$.

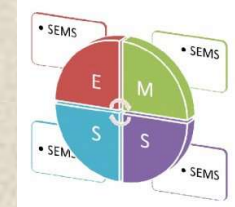
Связь с математической логикой:

АК-объект $P[XYZ] = [A \ B \ C]$ есть область истинности **конъюнкта**

$$F(x, y, z) = A(x) \wedge B(y) \wedge C(z),$$

где $A(x), B(y), C(z)$ – предикаты с областями истинности A, B, C .

Алгебра кортежей: структуры 2



Другие АК-объекты:

С-системы (объединения *С*-кортежей)

$$Q[XYZ] = \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \end{bmatrix}$$

В математической логике соответствуют **дизъюнктивной нормальной форме** (ДНФ) или **многоместному предикату**.

Д-кортежи (дополнения *С*-кортежей):

Пусть задан *С*-кортеж $P[XYZ] = [A \ B \ C]$

Тогда его дополнение $\bar{P}[XYZ] = \begin{bmatrix} \bar{A} & * & * \\ * & \bar{B} & * \\ * & * & \bar{C} \end{bmatrix}$ - **диагональная С-система**

где * - **полные компоненты**, равные доменам соответствующих атрибутов.

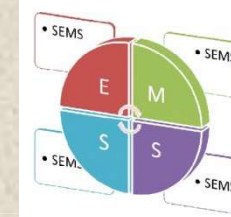
В сокращенном варианте $\bar{P}[XYZ] =] \bar{A} \ \bar{B} \ \bar{C} [$ - *Д*-кортеж

В математической логике *Д*-кортежи соответствуют **дизъюнктам**.

Д-системы (дополнения *С*-систем) $\bar{Q}[XYZ] = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} & \bar{C} \\ \bar{D} & \bar{E} & \bar{F} \end{bmatrix}$

В математической логике *Д*-системы соответствуют **конъюнктивной нормальной форме** (КНФ) или **многоместному предикату**.

Алгебра кортежей: операции и отношения



Операции в АК

В АК вместо логических связок $\neg$, $\wedge$ и $\vee$ используются изоморфные операции: *дополнение, обобщенное пересечение* ($\cap_G$) и *обобщенное объединение* ($\cup_G$).

Отношения в АК

Отношению выводимости в теории логического вывода в АК соответствует отношение *обобщенного включения* ($\subseteq_G$).

Например, даны посылки: $A_1, A_2, \dots, A_n$ и формула B , выраженные АК-объектами. Тогда B является следствием посылок $A_1, A_2, \dots, A_n$, если и только если

$$(A_1 \cap_G A_2 \cap_G \dots \cap_G A_n) \subseteq_G B.$$

АК-объект $A = A_1 \cap_G A_2 \cap_G \dots \cap_G A_n$ называется

минимальным следствием.

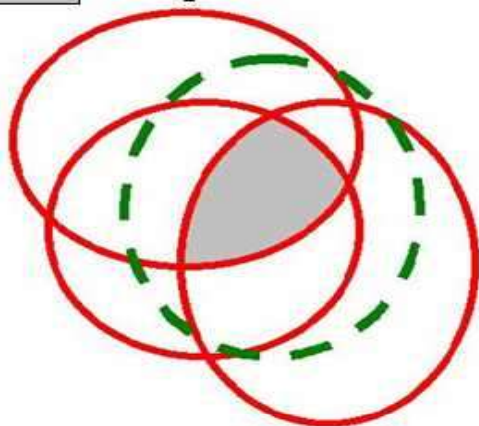
Любое надмножество минимального следствия также есть следствие соответствующих посылок.

Следствия:

— ПОСЫЛКИ

— — — - следствие

 - пересечение посылок



Ограничение: пересечение посылок не пусто

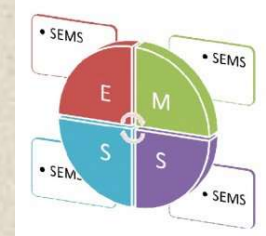
Заштрихованная часть — *минимальное следствие*.

то есть $A = A_1 \cap_G \dots \cap_G A_n$,

где A_i – посылки, выраженные структурами АК.

С помощью минимального следствия можно задачу, которая не была решена в математической логике, т.е. ***вычислять*** следствия с заранее заданными свойствами.

Алгебра кортежей: кванторы



Кванторные операции в АК выполняются с помощью двух **операций с атрибутами** ($+Atr$ и $-Atr$).

Добавление фиктивного атрибута ($+Atr$)

$$\text{Пусть } R[XZ] = \begin{bmatrix} A_1 & A_3 \\ B_1 & B_3 \end{bmatrix} \quad \text{тогда } +Y(R[XZ]) = \begin{bmatrix} A_1 & * & A_3 \\ B_1 & * & B_3 \end{bmatrix} \quad (C\text{-системы})$$

$$\text{Пусть } Q[XZ] = \begin{bmatrix} C_1 & C_3 \\ D_1 & D_3 \end{bmatrix} \quad \text{тогда } +Y(Q[XZ]) = \begin{bmatrix} C_1 & \emptyset & C_3 \\ D_1 & \emptyset & D_3 \end{bmatrix} \quad (D\text{-системы})$$

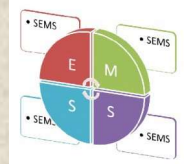
(В схему отношения добавляется атрибут Atr , а соответствующий столбец заполняется фиктивными компонентами)

Данная операция соответствует **Правилу обобщения** (**Generalization Rule**) в исчислении предикатов:

из формулы A выводима формула $\forall x(A)$

при условии, что в A нет свободной переменной x .

Логический анализ на основе АК



По сравнению с *математической логикой*, в которой решаются только задачи дедуктивного анализа без возможности выводить следствия с заранее заданными свойствами, в АК разработаны методы решения следующих задач:

- методы вычисления следствий с заранее заданными свойствами (интересных следствий);
- новые методы обнаружения и анализа некорректностей в рассуждениях;
- методы элиминации аномалии противоречия в базах знаний;
- методы формирования и анализа гипотез;
- методы вычисления абдуктивных заключений.

Обнаружены следующие некорректности в дедуктивном анализе на основе математической логики:

- В правиле обобщения «из формулы A выводима формула $\forall x(A)$ » нет ограничения «при условии, что в A нет свободной переменной x », что приводит к ошибке, если формула A не является тавтологией.
- При унификации выражений в исчислении предикатов разрешена замена переменных, что приводит к существенному искажению первоначальной формулы.