

*Проаналізовано застосовувані в мобільних антенних установках методи наведення і стеження за телекомунікаційними супутниками. Проаналізовано способи побудови, переваги та недоліки розімкнутих і замкнутих систем управління позиціонуванням антени і стабілізацією платформи. Показані переваги застосування нечітких регуляторів для таких систем управління*

*Ключові слова: система керування, слідкуюча антенна система, нечітка логіка, супутниковий зв'язок, телекомунікації*

*Проанализированы применяемые в мобильных антенных установках методы наведения и слежения за телекоммуникационными спутниками. Проанализированы способы построения, преимущества и недостатки разомкнутых и замкнутых систем управления позиционированием и стабилизацией платформы. Показаны преимущества применения нечетких регуляторов для таких систем управления*

*Ключевые слова: система управления, следящая антенная система, нечеткая логика, спутниковая связь, телекоммуникации*

# СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ И СЛЕЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ АНТЕННЫХ УСТАНОВОК

**О. В. Мнушка**

Аспирант

Кафедра информационных технологий и

мехатроники

Харьковский национальный автомобильно-

дорожный университет

ул. Петровского, 25, г. Харьков, Украина, 61002

E-mail: mnushka@live.com

## 1. Введение

Спутниковые телекоммуникационные системы (СТС) широко используются в специальных и гражданских применениях. При размещении искусственных спутников Земли (ИСЗ) на геостационарной орбите данные системы обладают следующими преимуществами: глобальная зона покрытия; широкая полоса пропускания каналов связи (Ku, K и Ka-диапазоны), что делает их пригодными для широкополосного доступа в Интернет и цифрового телевидения; неизменная стоимость передачи данных на различные

расстояния; малая вероятность ошибки и хорошо отработанные способы их устранения [1]. Мобильные СТС получают все более широкое распространение и обеспечивают возможность использования преимуществ СТС в процессе движения транспортных средств, оборудованных специализированными следящими антенными установками, обеспечивающими постоянство связи при значительных внешних воздействиях, что позволяет устанавливать их на большинстве видов общественного и личного транспорта – автомобилях, автобусах, железнодорожном транспорте, кораблях и яхтах (табл. 1) [2 – 4].

Таблица 1

Типовые параметры мобильных АУ

| Модель                            | TracPhone V3 [3]                                | RaySat TM T5-R [4]  | SeaTel 3004 [2]     | TracVision R5 SL [3]        |
|-----------------------------------|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|
| Тип                               | рефлектор                                       | низко<br>профильная | рефлектор           | низко<br>профильная         |
| Работа в движении                 | +   | +                   | +                   | +                           |
| Размер, см                        | 82x79x 13.4                                     | 60x55x17            | диаметр - 76        | высота - 30<br>диаметр - 81 |
| Азимут                            | 7200  | неогранич.          | ±3450               | -                           |
| Угол места                        | 7,5-750   | 15-800              | -15... +1200        | -                           |
| Скорость поворота (град / с)      | 300   | 300                 | 300                 | -                           |
| Диапазон отклонения (град / 10 с) | ±900  | ±900                | ±900                | -                           |
| ЭИИМ, дБм                         | >75   | > 53                | > 45                | > 50                        |
| Сила ветра (ЕМЕ), км/ч            | 165   | -                   | -                   | -                           |
| Скорость передачи данных          | загрузка до 4 Мбит/с,<br>передача до 512 Кбит/с | +                   | -                   | -                           |
| Цена, USD                         | 18600 (комплект)                                | 2500<br>(антенна)   | 19000<br>(комплект) | 1400<br>(антенна)           |

Вне зависимости от вида транспорта основной проблемой является удержание направления на спутник под действием внешних влияющих факторов и траектории движения транспортного средства (ТС). При разработке АУ, устанавливаемых на ТС следует также учитывать назначение ТС, его тип – наземное, морское, воздушное, вследствие различной природы ошибок ориентации АУ. Переход к более высоким частотам обуславливает ужесточение требований к системам управления антенными установками (АУ) [2]. Применение систем VSAT (very small aperture terminal), обладающих достаточно мощными приемо-передающими антеннами, налагает еще большие ограничения к точности позиционирования АУ, регламентированные в разных странах, для предотвращения помех другим пользователям и ИСЗ.

**2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Типовая АУ мобильной СТС (рис. 1) состоит из антенны (А), стабилизированной платформы (СП), блока управления стабилизированной платформой (БСП), блока контроля и управления (БКУ) [2]. БКУ принимает сигналы управления (УС) от БСП, служебную информацию о положении ТС (СИ), уровень принимаемого сигнала (КУ) обеспечивает управление двигателями АУ с целью наведения и удержания направления на ИСЗ в процессе движения ТС.

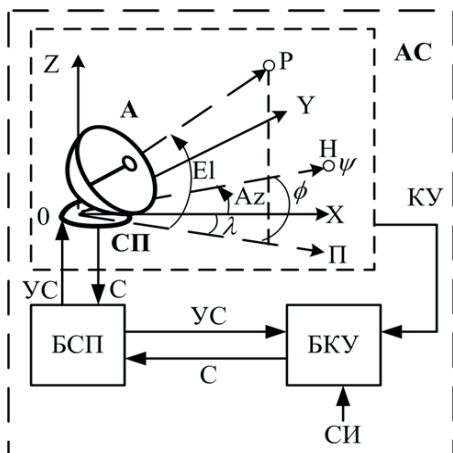


Рис. 1. Антенная система мобильной спутниковой телекоммуникационной системы

Стабилизированная платформа обеспечивает компенсацию смещений АУ относительно горизонтального положения в процессе движения ТС и под воздействием внешних факторов [5, 6].

Исходными данными для построения системы управления являются: положение (координаты) ИСЗ на орбите (точка Р), параметры приемо-передающего тракта, параметры приемной антенны, направление движения транспортного средства (т. Н), координаты ТС, влияющие факторы различной природы (скорость движения, скорость ветра, погодные условия и т.п.) и др. [1, 7, 8].

Анализируя [2 – 4] и типовые значения скоростей движения ТС можно определить границы допустимых

параметров мобильных АУ, существенных с точки зрения разработки СУ:

- угловое перемещение АУ, град/с: 30..100;
- скорость, км/ч: а) до 150-160 (автомобили, обычные поезда); б) до 300-400 км/ч (скоростные поезда); в) до 1000 (пассажирские самолеты); г) до 40-60 (морские суда);
- угол наклона ТС, град.: 5-25.

В связи с тем, что ошибки позиционирования приводят к существенному затуханию сигнала (рис. 2, [1, 7]), типовыми требованиями к системе управления для СТС сантиметрового диапазона являются: 1) погрешность установки АУ по каждой из координат ±10, а для систем миллиметрового диапазона – ±0,10; 2) смещения СП не более ±0,6480 относительно направления на ИСЗ для систем сантиметрового диапазона, и не более ±0,1420 для систем миллиметрового диапазона [8].

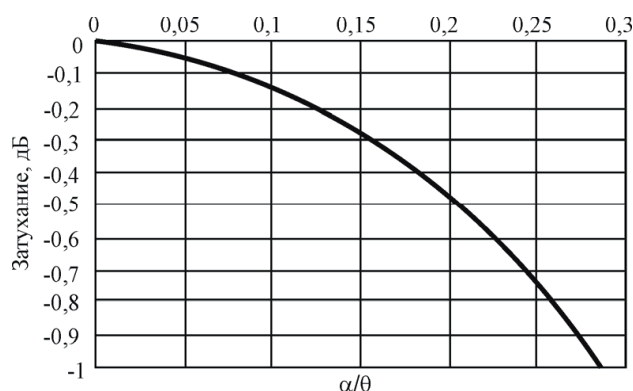


Рис. 2. Зависимость затухания сигнала в приемной антенне от ошибки позиционирования: α – отклонение от точки наведения, град, θ – ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны, град

Таким образом, эволюция мобильных СТС идет в направлении использования остронаправленных (ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны на уровне 3 дБ не более десятых долей градуса) широкополосных антенн (с полосой пропускания до 3,5 ГГц), к системам наведения, сопровождения и стабилизации которых предъявляются повышенные требования, что, требует поиска новых и усовершенствования существующих АУ, в т.ч. за счет использования нечетких и робастных систем управления [8 – 12].

Целью исследования является аналитический обзор, выбор системы управления и метода слежения для построения следящей АУ мобильной СТС.

**3. Методы позиционирования и слежения и их реализация в системах управления следящих антенных установок**

3.1. Направление на ИСЗ (рис. 1) определяется двумя величинами – азимутом (Az) и углом места (El) [1]:

$$Az = \arctg(\tg\phi / \sin\psi), El = \arctg \frac{\cos\psi \sin\phi - r/R}{\sqrt{1 - (\cos\psi \cos\phi)^2}}, \quad (1)$$

где угол  $\varphi$  – разница между долготой ИСЗ и ТС, град.; угол  $\psi$  – широта ТС, град.;  $r$  – радиус Земли, км;  $R$  – расстояние до ИСЗ, км.

В процессе движения ТС происходит постоянное изменение координат ТС и отклонения приемной антенны от точки наведения на ИСЗ, при этом отклонение точки максимума потока энергии антенны от направления на ИСЗ приводит к изменению уровня принимаемого сигнала, которое может быть аппроксимировано следующей зависимостью [10];

$$S(Az_T, El_T) = K_{AZ}(AZ_T - AZ_0)^2 + K_{EL}(EL_T - El_0)^2 + S_{MAX}, \quad (2)$$

где  $Az_T, El_T$  – текущие значения азимута и угла места, град.;  $Az_0, El_0$  – значения этих же углов, соответствующие максимальному уровню принимаемого сигнала, град.;  $K_{AZ}, K_{EL}$  – константы, зависящие от типа антенны;  $S_{MAX}$  – значение уровня сигнала при точном наведении антенны на ИСЗ.

Изменение координат ТС в процессе движения требует постоянной коррекции углов азимута и места (1), что обеспечивается СУ следящих АУ.

### 3.2. Методы наведения и слежения за ИСЗ.

**Метод программного слежения** используется для слежения за ИСЗ на основании предварительно рассчитанных данных о координатах приемной станции и координатах ИСЗ в указанный промежуток времени. Для краткосрочных периодов (до семи дней) возможно значительное упрощение вычислительной задачи, за счет аппроксимации известных соотношений и сокращения числа влияющих факторов (ВФ). На таком принципе основан метод IESS-412 компании Intelsat, позволяющий предсказать положение ИСЗ с погрешностью не более 0,010 [13, 14]. Для расчетов используется набор из одиннадцати параметров и эфемеридной информации, на основании которых для известной точки на земной поверхности с учетом рефракции в атмосфере и высоты над уровнем моря рассчитываются геометрические углы азимута и места (1). *Преимущества метода* – простота, высокая точность, возможность предварительного расчета данных и загрузка их по мере необходимости, возможность построения специализированных контроллеров управления. *Недостатки* – для подвижных систем требуются постоянные вычисления и значительный объем передаваемых данных, необходимо иметь достаточно подробную информацию о параметрах движения ИСЗ на орбите Земли. Для подвижных систем подходы, реализованные в данном методе могут быть использованы для первоначального наведения АУ, а так же в разомкнутых системах управления в качестве модуля предсказания положения ИСЗ.

**Метод пошагового слежения** (рис. 3, а) основан на измерении уровня принимаемого сигнала (отношения сигнал/шум, BER и т.д.) при смещении антенны от точки максимума потока энергии антенны (2). Практически данный алгоритм реализует функцию  $\max(S(Az_T, El_T))$ . В процессе слежения попеременно определяются максимумы по угловым координатам на основе соотношений (1), затем фиксируется уровень принимаемого сигнала (очередной шаг) и производится поворот АУ на некоторый фиксированный шаг. Сравняется новое значение уровня и принимается

решение о направлении [11, 12, 14, 15] и величине шага [16] следующего перемещения антенны.

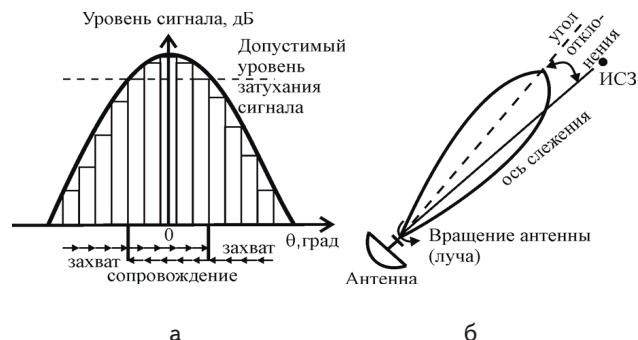


Рис. 3. Методы слежения: а – пошагового слежения; б – конического сканирования

*Преимущества метода* – простота реализации; можно использовать только приемные антенны; нет необходимости в постоянном определении координат; фиксированный и (или) переменный шаг регулирования. *Недостатки* – в процессе слежения уровень принимаемого сигнала находится в некоторой окрестности максимума, но не в самом максимуме; потери сигнала (ориентации на ИСЗ) вследствие резкого изменения направления движения ТС или под воздействием препятствий (здания, сооружения, деревья, столбы и т.д.). Для устранения указанного недостатка можно использовать: 1) системы с памятью, например, Enhanced Memory Track [14], способные предсказывать направление на ИСЗ по данным о его предыдущем движении; 2) дополнительную априорную информацию о положении ИСЗ относительно ТС, например, информационные карты [17, 18]; 3) другие методы слежения.

**Метод конического сканирования** [15, 19 - 21] (рис. 3, б) применяется в приемо-передающих антеннах СТС, в том числе в системах VSAT для организации широкополосного доступа к сети Интернет. В процессе слежения, когда антенна указывает на ИСЗ, уровень принимаемого сигнала не зависит от вращения и остается на постоянном уровне. Если антенна начинает отклоняться, происходит амплитудная модуляция принимаемого сигнала синхронно с движением контррефлектора, происходит формирование вектора ошибки на основе сравнения амплитуды и фазы модулированного сигнала с угловым положением контррефлектора и корректировка направления антенны.

*Преимущества метода* – высокая точность и скорость сканирования. *Недостатки* – более сложные конструкции антенн – антенны с электронным и механическим вращением луча, а также антенны Кассегрена; снижение усиления антенны на несколько децибел вследствие существования угла отклонения между осью слежения и осью максимального потока энергии сигнала; чувствительность к флуктуациям амплитуды принимаемого сигнала и др.

**Оптимизационные методы** переводят проблему слежения в плоскость решения задачи параметрической оптимизации. Градиентные методы [22, 23], примененные для стационарных систем слежения за геостационарными ИСЗ, практически сложно применить для подвижных систем, т.к. требуется большое число точек, в которых рассчитывается уровень сигнала, при

этом часть величин, таких как координаты приемной станции постоянно меняются, что не позволяет создать адекватную математическую модель.

Метод SPSA (*simultaneous perturbation stochastic approximation*) [10] применен для реализации метода слежения с учетом одновременного малого изменения амплитуд углов азимута и места. В данном методе решается задача параметрической оптимизации для функции  $\min(-S(Az_T, El_T))$ , при этом для определения градиента в каждой точке используется только два измерения уровня сигнала. В предложенном методе для достижения искомой точки в среднем требуется не более шести шагов, в отличие от традиционного метода (рис. 4).

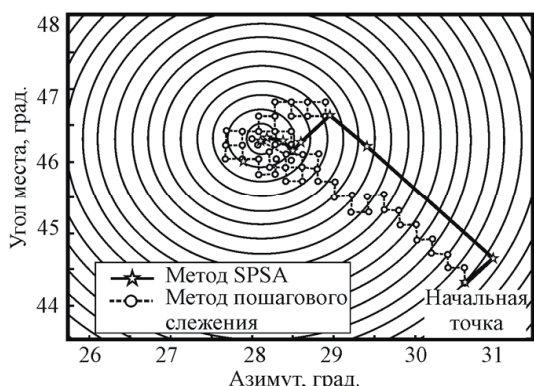


Рис. 4. Метод SPSA и метод пошагового слежения [10]

**Преимущества метода** – простота реализации метода и системы управления на его основе; высокое быстродействие; небольшой объем вычислений; возможность применения для существующих систем. **Недостатки** – не решена проблема потери сигнала вследствие воздействия ВФ рассмотренных выше.

**3.3. Модель системы управления АУ.** Для реализации рассмотренных выше методов слежения в основном применяют замкнутые СУ, а для высокоскоростных ТС – разомкнутые СУ.

**Разомкнутые СУ** характеризуются отсутствием обратной связи, следовательно, для управления положением АУ используется исходная модель устройства и данные о местоположении ТС и целевого ИСЗ [15, 24, 25]. В разомкнутых СУ АУ реализуют методы слежения, аналогичные методам программного слежения.

АУ [24] (рис. 5) предназначена для обеспечения широкополосного доступа (до 8 Мбит/с) к ИСЗ в К-диапазоне. АУ состоит из: БКУ, в котором на основе данных GPS (модуль ОК) вычисляются значения углов азимута и места (УМ), а также предсказывается будущее положение цели (модуль ПП); двухосевой системы позиционирования по углам азимута и места (СУ); антенны (А) в виде щелевой антенной решетки с шириной ДН около  $4^0$  на уровне -3 дБ (на частоте 15,4 ГГц); серводвигателя антенны с замкнутой СУ. Предложенный подход позволяет обеспечить высокое быстродействие системы, при этом обеспечивается стабилизация положения антенны. Суммарная погрешность позиционирования, обусловленная внешними факторами, составляет минимум  $(0,65-0,66)^0$  по обоим углам, которая возрастает с увеличением угла места.

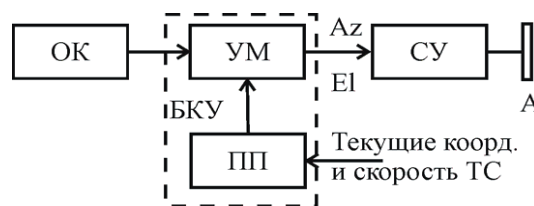


Рис. 5. Разомкнутая СУ следящей АУ [21]

В разомкнутой СУ для мобильных ТС L-диапазона, устанавливаемых на сухопутные ТС [25], стабилизация положения АУ обеспечивается при помощи волоконно-оптического гироскопа (ФОГ), а определение координат ТС – при помощи магнитного компаса (МК). Предложен метод компенсации кумулятивных ошибок ФОГ на основе МК, обусловленных угловыми перемещениями ТС, а также метод компенсации воздействий крупных строительных конструкций на МК.

Предложенная система управления обеспечивает работу АУ с шириной ДН антенны не менее  $10^0$ . На основе сравнения трехосевой и одноосевой СУ показано, что достаточно управления только по одной оси – азимуту.

**Преимущества** – простая модель СУ; высокое быстродействие; достижимый поворот антенны на угол до  $100^0$  в секунду. **Недостатки** – требуются высокоточные датчики – гироскопы, магнитные компасы и т.п.; чувствительность СУ к скорости движения ТС и помехам естественного и искусственного происхождения; дополнительные погрешности, обусловленные ошибками определения координат ТС; накопление ошибок; нельзя измерить абсолютное направление на ИСЗ.

**Замкнутые СУ** по сравнению с разомкнутыми имеют контуры обратной связи, для реализации системы слежения используется информация об уровне принимаемого сигнала или специальный сигнал (beacon), специфичный для каждого ИСЗ [15]. В системах позиционирования АУ применяются СУ с пропорционально-интегральными (ПИ), линейно-квадратично-гауссовыми (ЛКГ),  $H_\infty$ , пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) регуляторами [9, 11, 26]. В последнее время получили распространение СУ на основе нечеткой логики и нейронных сетей [8, 12, 27 - 29]. Замкнутые СУ АУ реализуют методы пошагового слежения и конечного сканирования.

В [12] проведено сравнение ПИД-регулятора и нечеткого регулятора на основе нечеткой логики (рис. 6) для реализации двухосевой системы стабилизации и слежения для модифицированной антенны SeaTel 1898. Показано, что нечеткий регулятор проще в реализации и имеет преимущество перед ПИД-регулятором для устранения влияния комбинаций внешних возмущений.

В [26] показано, что замена ПИ-регулятора на ЛКГ-регулятор в следящих АУ позволяет повысить производительность системы, снизить ошибки позиционирования, расширить полосу пропускания системы, путем замены контроллера без замены оборудования позиционирования АУ, а переход к  $H_\infty$  требует полной замены оборудования АУ.

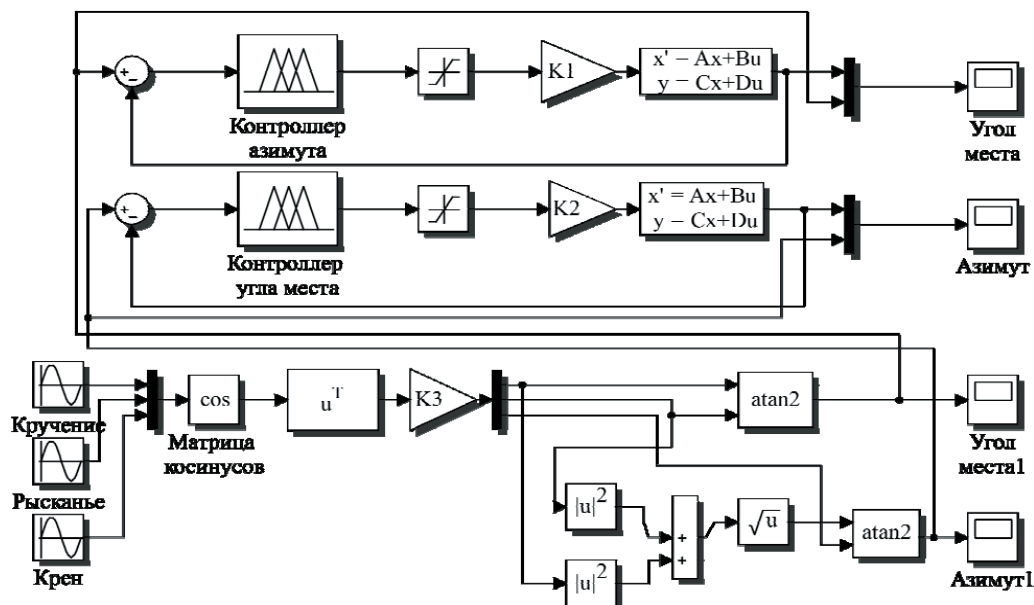


Рис. 6. Сравнительная имитационная модель для оценки нечеткого и ПИД-регуляторов [12]

В [28, 29] рассматривается вопрос применения нечетких регуляторов в системах слежения АУ в цепи обратной связи по уровню сигнала (рис. 7). Показаны преимущества применения нечетких регуляторов для малых изменений уровня сигнала и традиционных ПИД-регуляторов – для его больших изменений. Переход к нечетким регуляторам позволяет добиться большей производительности системы.

являются достаточно сложными и дорогостоящими устройствами, как правило, ориентированными на продаваемые вместе с ними сервисы. Основное применение для услуг непосредственного приема цифрового спутникового телевидения и персональной спутниковой связи находят мобильные СТС Ku-диапазона, для организации широкополосного доступа – Ka-диапазона.

#### 4. Выводы

Мобильные АУ

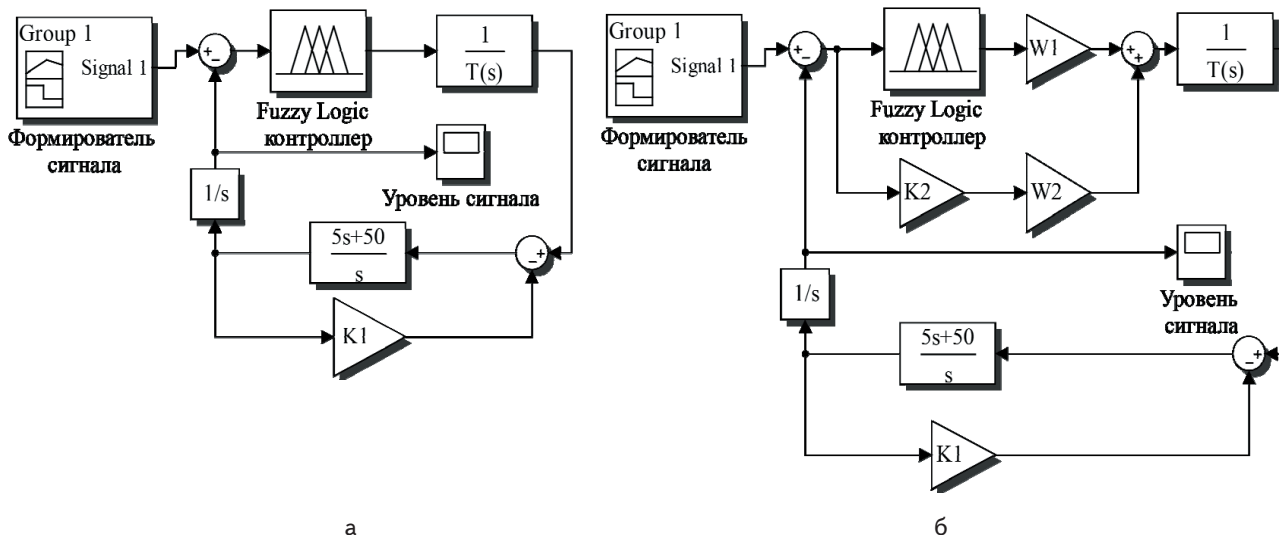


Рис. 7. Варианты реализации системы управления позиционированием АУ (узел контроля уровня сигнала): а – с нечетким регулятором [28]; б – совмещенная СУ, включающая нечеткий и традиционный ПИД-регуляторы [29]

**Преимущества** – замкнутые СУ АУ позволяют эффективно реализовать различные методы слежения за ИСЗ; отсутствуют ошибки, обусловленные погрешностями вычисления координат ТС (GPS или МК); простой алгоритм для первоначального захвата ИСЗ. **Недостатки** – модель СУ сложнее по сравнению с разомкнутыми системами; чувствительность к влиянию помех в контурах управления; чувствительность к изменениям уровня принимаемого сигнала.

Переход к использованию Ka-диапазона помимо известных проблем, связанных с затуханием сигнала в атмосфере, требует совершенствования технических решений и существующих методов построения АУ, их систем управления позиционированием и слежением.

Среди методов слежения, применяемых в мобильных АУ, наиболее простыми и эффективными являются методы пошагового слежения и конечного сканирования, которые достаточно просто реализуются

традиционными замкнутыми СУ. Для функционирования подобных систем должно выполняться требование к постоянной прямой видимости ИСЗ.

Для стабилизации положения АУ, ее позиционирования и слежения используют одно-, двух и трехосевые системы.

Для наземного транспорта часто достаточно одноосевой системы слежения по азимуту, что существенно снижает стоимость устройства.

В коммерческих системах в основном применяются замкнутые СУ позиционированием и слежением. Разомкнутые СУ обеспечивают больший диапазон и

скорость угловых перемещений АУ, при этом целесообразно использовать антенные решетки, что налагает ограничения на их использования для ИСЗ вблизи горизонта.

Применение нечетких регуляторов по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами позволяет добиться улучшения параметров СУ – быстродействия, точности, стабильности.

Перспективами дальнейших исследований является усовершенствование существующих замкнутых СУ позиционированием и слежением с целью улучшения параметров АУ в целом.

### Литература

1. Спутниковая связь и вещание [Текст]: справочник / В. А. Бартеев, Г. В. Болотов, В. Л. Быков и др.; под ред. Л. Я. Кантора. – М. : Радио и связь, 1997. – 528 с.
2. Sea Tel Model 3011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.cobham.com>.
3. KVH Россия - мобильное спутниковое ТВ, Интернет и телефон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.kvh.ru>.
4. RaySat and RaySat Antenna Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.raysat.com>.
5. Leghmizi, S. A Survey of Fuzzy Control for Stabilized Platforms [Text] / S. Leghmizi, S. Liu // Int. J of Comp. Sc. & Eng. Surv. – 2001. – Vol. 2. – No 3. – P.P. 48-57.
6. Ghahramani, A. Predictive Control of a Two Degrees of Freedom XY robot (Satellite Tracking Pedestal) and comparing GPC and GIPC algorithms for Satellite Tracking [Text] / A. Ghahramani, T. Karbasi, M. Nasirian, A. K. Sedigh // Contr., Instrum. and Autom. (ICCIA), 2nd Int. Conf., 2011. – P.P. 865-870.
7. Volakis, J. Antenna Engineering Handbook [Text] / ed. by J. Volakis. – McGraw-Hill. – 2007. – 1800 p.
8. Riling, D. The Evolution of U.S. Naval Satellite Systems Antenna Control Technology [Text] / D. Riling // Naval Engineer. J. – 1994. – Vol. 106. – P.P. 94-107.
9. Jiang, J. Desired Compensation Adaptive Robust Control of Mobile Satellite Communication System with Disturbance and Model Uncertainties [Text] / [J. Jiang, Q. Chen, B. Yao, J. Guo]. – Int. J of Innov. Comp., Informat. and Contr. – 2013. – Vol. 9. – No 1. – P.P. 153-164/
10. Hao, L. SPSA-based Step Tracking Algorithm for Mobile DBS Reception [Text] / L. Hao, M. Yao // Simul. Modell. Pract. and Theory. – 2011. – Vol. 19. – Iss. 2. – P.P. 837-846.
11. Ch, C. H. Antenna control system using step tracking algorithm with  $H_{\infty}$  controller [Text] / C. H. Ch, S. H. Lee, T. Y. Kwon, C. Lee. – Int. J. of Control, Automation and Systems. – 2003. – Vol. 1, No1. – P.P. 83-92.
12. Kim, J.-K. Simplified Fuzzy-PID Controller of Data Link Antenna [Text] / J.-K. Kim, S.-H. Park, T. Jin // Q. Yang and G. Webb (Eds.) : PRICAI 2006, LNAI. – Springer, 2006. – P.P. 1083 – 1088.
13. Document IESS-412 (Rev. 2). [Text] / Intelsat, 2002, 13 p.
14. Model 7134. Antenna Control System [Text] / General Dynamics SATCOM Technologies. – 2010. – 4 p.
15. Debruin, J. Control Systems for Mobile Satcom Antennas [Text] / J. Debruin // Control Systems, IEEE. – 2008. – Vol. 28, No 1. – P.P. 86-101.
16. Hao, L. A novel acquisition tracking algorithm for SATCOM on-the-move [Text] / L. Hao, Z. Ouya // 29th Chin. Contr. Conf. – 2010. – P.P. 3234-3237.
17. Порівняльний аналіз методів імітаційного моделювання ймовірності помилки при передачі інформації в системах цифрового зв'язку [Текст] / О. Я. Ніконов, О. В. Мнушка, В. М. Савченко, В. В. Нарожний // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2011. – Вип. 3(19). – С. 266-270.
18. Мнушка, О. В. Аналіз впливу помилок позиціонування антенних пристроїв земних станцій на ймовірність помилки в каналах супутникових систем цифрового зв'язку [Текст] / О. В. Мнушка // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 3(23). – С. 247-250.
19. Tracking Antenna for Mobile Bi-Directional Satellite Communications in Ka-band [Text] / [H. Bayer, C. Volmer, A. Krauss и др.] // 2010 IEEE Int. Conf. on Wireless Informat. Techn. and Syst. (ICWITS). – 2010. – P.P. 1-4.
20. Nateghi, J. Analysis of the Conical Tracking Technique in LEO Satellite Stations [Text] / J. Nateghi, L. Mohammadi, G. R. Solat // 11th Int. Conf. on Adv. Comm. Techn. (ICACT 2009). – 2009. – Vol. 03. – P.P. 1950-1953.
21. TrackVision G8 Owner's Manual [Text] / KVH Part # 54-0198 Rev. C. – KVH Industries, Inc., 2003. – 154 p.
22. Kenington, P.B. Electronic tracking systems for space communications [Text] / P. B. Kenington // Electron. & Comm. Engin. J. – 1990. – Vol. 2, Iss. 3. – P.P. 95 – 101.

23. Richharia, M. An Improved Step Track Algorithm for Tracking Geosynchronous Satellites [Text] / M. Richharia // Int. J. of Sat. Comm. – 1986. – No 4. – P.P. 147-156.
24. Nazari, S. Rapid Prototyping and Test of a C4ISR Ku-band Antenna Pointing and Stabilization System for Communications on-the-move [Text] / S. Nazari, K. Brittain, D. Haessig // IEEE Mil. Comm. Conf. (MILCOM 2005). – 2005. – Vol. 3. – P.P. 1528-1534.
25. An Antenna Tracking Method for Land-Mobile Satellite Communications System [Text] / [S.-I. Yamamoto, K. Tanaka, H. Wakana and S. Ohrnori] // Electron. Comm. Jpn. – Pt. I. – Vol. 78. – No 9. – 1995. – P.P. 91–102.
26. Gawronski, W. Antenna Control Systems: from PI to H $\infty$  [Text] / W. Gawronski // Anten. and Propag. Mag. – 2001. – Vol. 43. – No 1. – P.P. 52-60.
27. Palamar, M. Neurocontroller to Tracking Antenna Control of Information Reception from Earth Remote Sensing Satellites [Text] / M. Palamar // Intel. Data Acquis. and Adv. Comp. Syst/: Techn. and Appl. – 2005. – P.P. 340-344.
28. Lin, J.-M. Intelligent PD-type Fuzzy Controller Design for Mobile Satellite Antenna Tracking System with Parameter Variations Effect [Text] / J.-M. Lin, Po-K. Chang // IEEE Sym. on Comp. Intel. in Contr. and Autom. – 2011. – P.P. 1-5.
29. Chag, P.-K. Integrating traditional and fuzzy controllers for mobile satellite antenna tracking system design [Text] / Po-K. Chang, J.-M. Lin // Select. Pap. from: Comm. & Inf. Techn. 2008, Circ., Syst. and Sign. 2008, Appl. Math., Simul., Model. 2008. – Greece, 2008. – P.P. 102-108.

*У статті описана методологія штучної ортогоналізації планів пасивного експерименту з експериментальними значеннями функції виходу в багатовимірному факторному просторі малої вибірки нечітких даних. Реалізація описаних процедур, що формують методологію, дозволяє отримувати адекватні математичні моделі та знаходити оптимальне за кінцевим станом управління складними технологічними процесами в умовах невизначеності*

*Ключові слова: штучна ортогоналізація, інформаційно-керуюча система, математична модель, оптимальне управління*

*В статті описана методологія штучної ортогоналізації планів пасивного експерименту по експериментальним значенням функції виходу в багатовимірному факторному просторі малої вибірки нечітких даних. Реалізація описаних процедур, що формують методологію, дозволяє отримувати адекватні математичні моделі та знаходити оптимальне по кінцевому стану управління складними технологічними процесами в умовах невизначеності*

*Ключевые слова: искусственная ортогонализация, информационно-управляющая система, математическая модель, оптимальное управление*

УДК 681.5:519.24

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ОРТОГОНАЛИЗАЦИИ В ПОИСКЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**Д. А. Дёмин**  
 Доктор технических наук, профессор  
 Кафедра литейного производства  
 Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»  
 ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002  
 E-mail: c7508990@gmail.com

## 1. Введение

Результаты многочисленных исследований эффективности систем управления технологическими процессами в промышленном производстве показывают, что их целесообразно совершенствовать путем учета критериев качества управления, связанных с необходимостью минимизации отклонений показателей ка-

чества продукции от регламентированных значений на всех возможных этапах конкретного технологического процесса. Речь, таким образом, может идти об оптимальном управлении по конечному состоянию, поиск которого неизбежно связан с построением адекватной математической модели управляемого процесса. Одним из примеров таких сложных технологических процессов является процесс плавки, характерными